

**Batterien für E-Fahrzeuge:
Nachnutzung und Recycling**



BATTERIEN FÜR E-FAHRZEUGE: NACHNUTZUNG UND RECYCLING

Alessandra Angelini
David Fritz
Holger Heinfellner
Stefan Lambert

REPORT
REP-0847

WIEN 2023

Projektleitung Holger Heinfellner

AutorInnen Alessandra Angelini, David Fritz, Holger Heinfellner, Stefan Lambert

Lektorat Ira Mollay

Layout Elisabeth Stadler

Umschlagfoto © tamtam – Fotolia.com

Auftraggeber Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Abteilung II/1 – Mobilitätswende

Gesamtumsetzung BMK: Robin Krutak

Publikationen Weitere Informationen zu Umweltbundesamt-Publikationen unter:
<https://www.umweltbundesamt.at/>

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich

Diese Publikation erscheint ausschließlich in elektronischer Form auf <https://www.umweltbundesamt.at/>.

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2023

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-99004-677-7

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	5
SUMMARY	7
1 HINTERGRUND	9
2 TECHNISCHE GRUNDLAGEN	11
2.1 Funktionsweise einer Lithium-Ionen Zelle	11
2.2 Aufbau und chemische Zusammensetzungen von Lithium-Ionen-Batterien.....	13
2.3 Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen	17
2.4 Batteriekapazität und Batterielebensdauer	18
3 NACHNUTZUNG	23
3.1 Lebenszyklen von Akkumulatoren	23
3.2 Möglichkeiten der Nachnutzung bzw. Second Life von Akkumulatoren	24
3.3 Nachnutzung oder Recycling?	25
3.4 Leuchttürme der Nachnutzung	27
3.4.1 Johan Cruijff Arena.....	27
3.4.2 Speichersystem Powervault 3eco.....	27
3.4.3 The Reborn Light	28
3.4.4 „Smart Fossil Free Island“– Porto Santo	29
4 RECYCLING	31
4.1 Rechtlicher Rahmen.....	32
4.1.1 Europäische Ebene.....	32
4.1.2 Die Umsetzung in Österreich	34
4.1.3 Ausblick.....	34
4.2 Recycling von Batterien und Akkumulatoren in Österreich	36
5 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	43
6 TABELLENVERZEICHNIS	44

ZUSAMMENFASSUNG

Elektrisch betriebene Fahrzeuge fahren lokal emissionsfrei, können bei Einsatz erneuerbarer Energie vergleichsweise klimafreundlich betrieben werden und stellen somit eine wesentliche Säule des zukünftigen Gesamtverkehrssystems dar. Dem gegenüber steht ein höherer Rohstoffeinsatz für die Herstellung des Fahrzeugs, wobei ein Großteil dieser zusätzlichen Rohstoffe bzw. Rohstoffmengen in der Antriebs- oder „Traktionsbatterie“ des Elektrofahrzeugs verbaut wird.

Viele dieser Rohstoffe sind aufgrund ihrer reduzierten Verfügbarkeit, ihrer geringwertigen Fördermenge, des prognostizierten Bedarfs oder der sozialen oder ökologischen Implikationen in Verbindung mit der Rohstoffgewinnung als kritisch einzustufen. Zudem ist die Gewinnung und Veredelung dieser Rohstoffe sowie deren Verarbeitung zu Batteriezellen mit vergleichsweise hohem Energieeinsatz verbunden und verursacht somit im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen höhere Emissionen aus der Fahrzeugherstellung.

Um die Elektromobilität als nachhaltig energieeffiziente, ökologische und sozialverträgliche Technologie zu etablieren, gilt es, den Einsatz insbesondere von Primärrohstoffen zu reduzieren. Dies kann erfolgen, indem diese Primärrohstoffe über einen möglichst langen Zeitraum genutzt und anschließend als Sekundärrohstoffe wiederverwendet werden, sie also nach ihrer Nutzung im Fahrzeug ein weiteres Leben („Second Life“) zugeführt und anschließend recycelt werden.

In der aktuellen Generation von Elektrofahrzeugen kommen fast ausschließlich Lithium-Ionen-Akkumulatoren zum Einsatz. Mittelfristig ist hier auch keine Änderung zu erwarten. Jede Batteriezelle besteht aus einer Kathode und einer Anode, einem Elektrolyten, dem Separator und dem umgebenden Zellgehäuse gemeinsam mit dem Batteriemanagementsystem. Batterien können sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung mit variablen Anteilen einzelner metallischer und halbmehallischer Rohstoffe unterscheiden. Aber auch innerhalb derselben Akkumulatortypen werden unterschiedliche Anteile ausgesuchter Rohstoffe verbaut: Bei Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) Akkumulatoren reicht dies je nach Klassifizierung von annähernd gleich großen Anteilen dieser Rohstoffe bis zu Versionen, bei welchen der Anteil von Nickel rund achtmal höher ist als die Anteile von Mangan und Kobalt. Dadurch kann der Einsatz besonders kritischer Rohstoffe reduziert werden.

Die Lebensdauer eines Akkumulators hängt von der Zykluslebensdauer und von der kalendarischen Lebensdauer ab. Die Zykluslebensdauer beschreibt die Anzahl der möglichen Ladezyklen einer Zelle bzw. des gesamten Systems. Die vollständige Entladung und anschließende Ladung wird als ein Zyklus bezeichnet. Die kalendarische Lebensdauer bildet den reinen Alterungsprozess des Lithium-Ionen-Akkumulators ab, der sich unter anderem durch chemische Zersetzungsprozesse in der Batterie ergibt. Die kalendarische Lebensdauer wird dabei auch von externen Faktoren wie beispielsweise der Außentemperatur determiniert. Die tatsächliche Alterung der Batterie ergibt sich als Summe dieser beiden Alte-

rungeffekte und kann demnach nicht pauschal quantifiziert werden. Die Anwendung im mobilen Bereich ist in der Regel aber bis zu einer Restkapazität der Batterie (engl.: State of Health, kurz: SOH) von 80 % möglich, da darunter die hohen Anforderungen, zum Beispiel bei einer Beschleunigung, nicht mehr erfüllt werden können.

Die Nachnutzung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren hat zunächst den Vorteil, dass dadurch der Ressourceneinsatz sowie die hohen Herstellungskosten auf eine weitere Nutzung aufgeteilt werden können. Dabei kommen die unterschiedlichsten Einsatzzwecke, vom IT-Bereich über Fahrzeuge mit vergleichsweise niedrigen Leistungsanforderungen (z. B. Fahren) bis hin zu stationären Speichersystemen im Gebäudebereich, in Frage. Je nach Anforderungsprofil der Nachnutzung sind unterschiedliche Kapazitäten bzw. Ladeströme erforderlich. Durch eine Bestimmung dieser Parameter kann der optimale Anwendungsfall für die Nachnutzung gefunden werden.

Die Frage, ob eine Nachnutzung aus energetischer und ökologischer Sicht einem Recycling vorzuziehen ist, ist differenziert zu betrachten. Eine sinnvolle Weiternutzung schont den Einsatz von alternativ benötigten Primärressourcen: Hinsichtlich der Materialeffizienz, also der Menge an erforderlichen Rohstoffen bzw. Materialien je Kilowattstunde Batteriekapazität, sind nach der Erstnutzung (bspw. nach 15 Jahren) und der Zweit- und Drittnutzung (bspw. nach 30 Jahren) jedoch große Entwicklungen zu erwarten. So kann es sein, dass die Rohstoffe in neueren Anwendungen deutlich effizienter eingesetzt werden und dies in der Gesamtbewertung vorteilhaft ist.

Unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt Rohstoffe wiederverwendet werden, ist das Recycling an sich ein zentraler Baustein für die Etablierung der Elektromobilität als nachhaltige Antriebstechnologie. Aus technologischer Sicht können bis zu 99 % der Rohstoffe und Bestandteile eines Lithium-Ionen-Akkumulators recycelt werden. Die dazu notwendigen Verfahren sind entwickelt und werden bereits angewendet. Die Rohstoffe lassen sich dadurch in so hoher Qualität wiedergewinnen, dass daraus hergestellte neue Lithium-Ionen-Batterien die gleichen Eigenschaften aufweisen wie jene aus Primärrohstoffen.

Damit in der Praxis zukünftig auch nennenswerte Mengen an Rohstoffen in Batterien wiederverwendet werden, wird die relevante europäische Gesetzgebung derzeit überarbeitet. Aufbauend auf der geltenden Europäischen Richtlinie 2006/66/EG und der nationalen Batterienverordnung wird gegenwärtig eine neue *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020* finalisiert. Mit dieser Verordnung wird unter anderem die Kategorie der Traktionsbatterien für elektrische Straßenfahrzeuge eingeführt, die Berechnung und Ausweisung eines CO₂-Fußabdruck vorgeschrieben und es werden verpflichtende Sammel- und Recyclingquoten festgelegt. Die Verordnung wird nach Fertigstellung unmittelbar in Kraft treten und muss nicht erst in nationales Recht umgewandelt werden. Es ist davon auszugehen, dass sie einen wichtigen Impuls für den Hochlauf der Recyclingaktivitäten in Europa darstellen wird.

SUMMARY

Electrically powered vehicles are locally emission-free, can be operated in a comparatively climate-friendly manner when renewable energy is used, and thus represent a key pillar of the future overall transportation system. On the other hand, more raw materials are needed to manufacture the vehicle, with a large proportion of these additional raw materials or quantities of raw materials being used in the drive or "traction battery" of the electric vehicle.

Many of these raw materials are considered critical due to their reduced availability, current extraction levels, projected demand, or the social or environmental implications associated with raw material extraction. In addition, the extraction and refinement of these raw materials, as well as their processing into battery cells, is associated with comparatively high energy input and thus causes higher emissions from vehicle production compared with conventionally powered vehicles.

In order to establish electromobility as a sustainable, energy-efficient, ecological and socially acceptable technology, the use of primary raw materials in particular must be reduced. This can be achieved by using these primary raw materials for as long as possible and then reusing them as secondary raw materials, i. e. by giving them a second life after their use in the vehicle and then recycling them.

In the current generation of electric vehicles, lithium-ion batteries are used almost exclusively. No change is expected here in the medium term. Each battery cell consists of a cathode and an anode, an electrolyte, the separator and the surrounding cell housing together with the battery management system. Different chemical compositions with varying proportions of individual metallic and semi-metallic raw materials can be distinguished. But even within the same type of accumulator, different proportions of selected raw materials are used: In the case of nickel-manganese-cobalt (NMC) accumulators, this ranges, depending on the classification, from approximately equal proportions of these raw materials to versions in which the proportion of nickel is already around eight times higher than the proportions of manganese and cobalt. This allows the use of particularly critical raw materials to be reduced.

The service life of an accumulator depends on the cycle life and the calendar life. The cycle life describes the number of possible charging cycles of a cell or the entire system. The complete discharge and subsequent charge is called a cycle. The calendar life represents the pure aging process of the lithium-ion battery, which results among other things from chemical decomposition processes in the battery. The calendar life is also determined by external factors such as the outside temperature. The actual aging of the battery is the sum of these two aging effects and therefore cannot be quantified across the board. However, the application in the mobile sector is generally possible up to a residual capacity of the battery (State of Health, SOH) of 80 %, as the high requirements, for example during acceleration, can no longer be met below this level.

The reuse of lithium-ion batteries initially has the advantage that the resource input and the high manufacturing costs can be spread over a further use. A wide variety of applications is possible, from the IT sector to vehicles with comparatively low power requirements (e.g. ferries) to stationary storage systems in buildings. Depending on the requirement profile of the after-use, different capacities or charging currents are required. By determining these parameters, the optimal application for the after-use can be found.

The question of whether subsequent use is preferable to recycling from an energy and ecological point of view must be considered in a differentiated manner: Sensible further use conserves the use of primary resources required as alternatives. However, with regard to material efficiency, i. e. the quantity of raw materials or materials required per kilowatt-hour of battery usage, major developments can be expected after initial use (e. g. after 15 years) and second and third use (e. g. after 30 years). It may be that the raw materials are used much more efficiently in new applications and that this is advantageous in the overall assessment.

Regardless of the point in time at which raw materials are reused, recycling in itself is a central building block for establishing electromobility as a sustainable drive technology. From a technological point of view, up to 99 % of the raw materials and components of a lithium-ion battery can be recycled. The necessary processes have been developed and are already in use. The raw materials can be recovered in such a high quality that new lithium-ion batteries made from them have the same properties as those made from primary raw materials.

To ensure that significant quantities of raw materials are reused in batteries in the future, the relevant European legislation is currently being revised. Based on the current European Directive 2006/66/EC and the national Battery regulation, a new *Regulation of the European Parliament and of the Council on batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) 2019/1020* is currently being finalized. Among other things, this regulation will introduce the category of traction batteries for electric road vehicles, require the calculation and reporting of a carbon footprint, and set mandatory collection and recycling rates. The regulation will enter into force immediately upon finalization and does not need to be transposed into national law. It is expected to provide an important impetus for the ramp-up of recycling activities in Europe.

1 HINTERGRUND

Verkehr und Klima

Der Personen- und Güterverkehr verursachte 2020 global rund 15 % aller Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) (Shukla et al., 2022). In Österreich war der Verkehr im selben Jahr sogar für rund 28 % der gesamten nationalen THG-Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2022a). Der höhere Anteil ist auf den im globalen Vergleich hohen Motorisierungsgrad und die hohe Wirtschafts- und Gütertransportleistung in Österreich zurückzuführen. Dabei werden im Verkehrssektor derzeit fast ausschließlich fossile Energieträger eingesetzt. Der Verkehr zählt demnach zu den größten „Sorgenkindern“ im Hinblick auf die Erreichung der nationalen und internationalen Klimaziele.

Maßnahmen-Mix erforderlich

Um die negativen Auswirkungen des Verkehrs – neben der Emission klimaschädlicher Treibhausgase zählen hierzu beispielsweise auch Luftverschmutzung und Lärmbelastung – zu reduzieren, braucht es eine umfassende und tiefgreifende integrierte Mobilitäts- und Energiewende. Diese umfasst einen Mix aus unterschiedlichen Push-Maßnahmen (z. B. CO₂-Gesetzgebung für Fahrzeughersteller) und Pull-Maßnahmen (z. B. Förderungen für E-Fahrzeuge) in den Bereichen der Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung auf besonders ressourcenschonende und energieeffiziente Verkehrsmittel ebenso wie der Verkehrsverbesserung.

Emissionen bei Elektroantrieb

Für den letzten Punkt spielt der Wechsel der Antriebstechnologie hin zur Elektromobilität eine tragende Rolle: Elektrofahrzeuge emittieren lokal keine und über den gesamten Lebenszyklus vergleichsweise wenig Treibhausgase; insbesondere dann, wenn für den Betrieb ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt wird (Umweltbundesamt, 2021, Umweltbundesamt, 2022b). Ebenso niedrig sind die Luftschadstoffemissionen, die sich auf den Feinstaub aus Reifen- und Bremsabrieb reduzieren. Zudem ist die Lärmbelastung reduziert und Elektrofahrzeuge weisen im Vergleich aller Antriebstechnologien mit Abstand die höchste Energieeffizienz auf. Dem gegenüber steht beispielsweise ein höherer Rohstoffeinsatz für die Herstellung des Fahrzeugs.

Emissionen der Fahrzeugherstellung

Ein Großteil dieser zusätzlichen Rohstoffe bzw. Rohstoffmengen wird in der Antriebs- oder „Traktionsbatterie“ des Elektrofahrzeugs verbaut. Viele dieser Rohstoffe sind aufgrund ihrer reduzierten Verfügbarkeit, ihrer gegenwärtigen Fördermenge, dem prognostizierten Bedarf oder den sozialen oder ökologischen Implikationen in Verbindung mit der Rohstoffgewinnung als kritisch einzustufen (Umweltbundesamt, 2022c). Zudem ist die Gewinnung und Veredelung dieser Rohstoffe, sowie deren Verarbeitung zu Batteriezellen mit vergleichsweise hohem Energieeinsatz verbunden und verursacht somit im Vergleich mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen höhere Emissionen aus der Fahrzeugherstellung (Umweltbundesamt, 2021, Umweltbundesamt, 2022b).

Nachnutzung der Akkumulatoren

Um die Elektromobilität als nachhaltig energieeffiziente, ökologische und sozialverträgliche Technologie zu etablieren, ist die Reduktion der negativen Auswirkungen in Zusammenhang mit der Batterieherstellung von zentraler Bedeutung. Dies kann dadurch erfolgen, indem Akkumulatoren nach ihrer Nutzung als Traktionsbatterien einer zweiten oder dritten Nutzung, beispielsweise als

Stromspeicher im stationären Bereich, zugeführt werden. Daran anschließend, also wenn die Batterie auch nicht mehr stationär eingesetzt werden kann, sollte ein möglichst großer Anteil der verbauten Rohstoffe als sogenannte Sekundärrohstoffe wiederverwendet werden, um die Notwendigkeit der Gewinnung von Primärrohstoffen zu reduzieren. In der gegenständlichen Studie werden, aufbauend auf einer Diskussion der technischen Grundlagen einer Traktionsbatterie, die wichtigsten Aspekte sowohl der Nachnutzung als auch des Recyclings erläutert.

2 TECHNISCHE GRUNDLAGEN

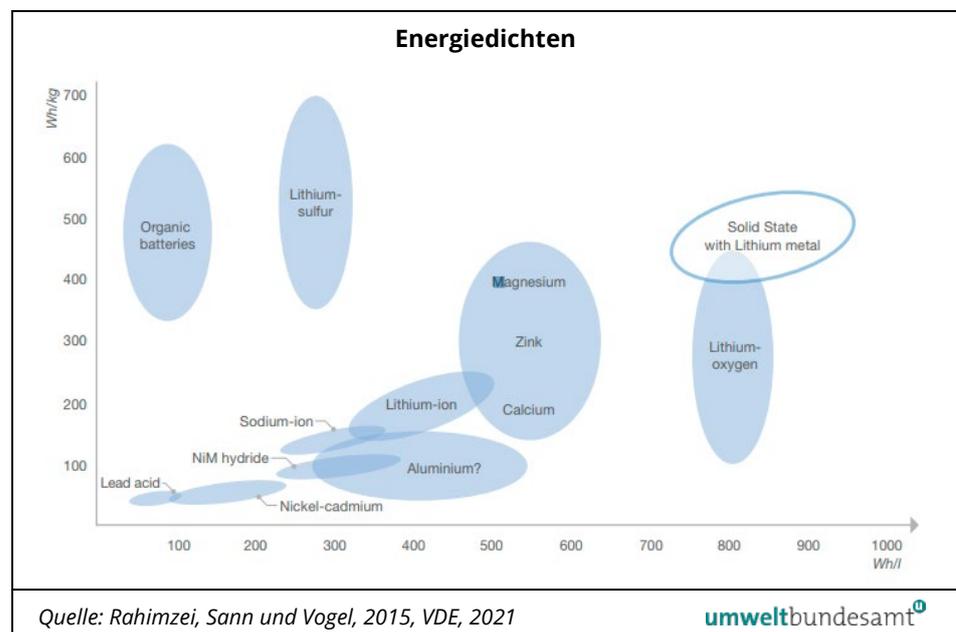
Arten von Akkumulatoren

Der Akkumulator gilt neben dem Elektromotor als Herzstück jedes vollelektrisch angetriebenen Fahrzeuges. In der aktuellen Generation von Elektrofahrzeugen kommen, mit Ausnahme weniger Prototypen und Versuchsfahrzeuge, ausschließlich Lithium-Ionen Akkumulatoren zum Einsatz. Bei einigen älteren Fahrzeugmodellen kamen auch andere Technologien zum Einsatz. Erwähnenswert sind hier der Blei-Akkumulator, der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator und die ZEBRA-Batterie (Zero Emission Battery Research Activities) auch „Natrium-Nickelchlorid-Zelle“ genannt.

technische Eigenschaften

Wesentliche technische Eigenschaften von Akkumulatoren sind die Kapazität, die Anzahl möglicher Ladezyklen bis zu einer gewissen Restkapazität, die Lebensdauer, die Performance bei tiefen bzw. hohen Temperaturen und die spezifische Energiedichte. Der Lithium-Ionen-Akkumulator hat insbesondere bei der spezifischen Energiedichte bzw. Kapazität große Vorteile gegenüber den anderen Technologien und weist zudem keinen Memory-Effekt auf. Das bedeutet, dass ein Nachladen jederzeit und bei jedem Kapazitätsstand erfolgen kann. Darüber hinaus gibt es Vorteile bei der Performance bei unterschiedlichen Außentemperaturen. Ein Nachteil von Li-Ionen-Akkumulatoren ist der vergleichsweise hohe Preis.

Abbildung 1: Volumetrische und gravimetrische Energiedichten etablierter und zukünftiger Materialsysteme unterschiedlicher Akkumulatorentechnologien.



2.1 Funktionsweise einer Lithium-Ionen Zelle

Jede Batteriezelle besteht aus einer Kathode und einer Anode, einem Elektrolyten, dem Separator und dem umgebenden Zellgehäuse gemeinsam mit dem Batteriemanagementsystem (kurz: BMS).

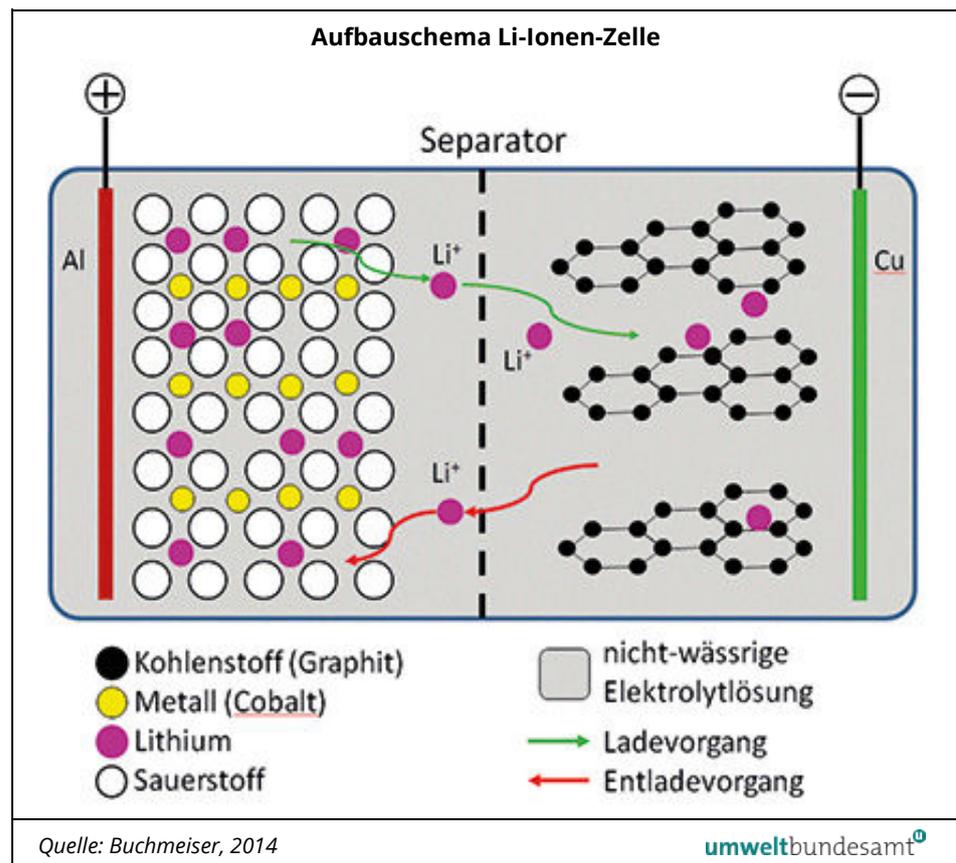
Der Elektrolyt ist beispielsweise wasserfreies Salz, wie Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6), und ermöglicht den Ionenaustausch. Derzeit werden vorwiegend flüssige Elektrolyte eingesetzt. In Zukunft werden auch Festkörperelektrolyte zum Einsatz kommen, welche die Kapazität noch einmal deutlich erhöhen können.

Der Separator dient als physikalische Trennung von Anode und Kathode und verhindert einen Kurzschluss, der Ionendurchgang wird aber ermöglicht. Das Zellgehäuse besteht aus Kunststoff, Kupfer und Aluminium, in dem das BMS sowie das Kühlsystem installiert sind.

Die negative Elektrode wird beim Entladen als Anode, beim Laden als Kathode bezeichnet, die positive Elektrode vice versa. In den meisten Fällen besteht die negative Elektrode aus Graphit, in dem sich die Lithium-Ionen einlagern können. Die positive Elektrode besteht aus verschiedenen Lithium-Ionen-Kombinationen, den sogenannten Lithium-Metall-Oxiden.

Das Funktionsprinzip ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Energie wird durch Austausch der Elektronen zwischen den Elektroden erzeugt.

Abbildung 2:
Schematischer Aufbau einer Li-Ionen-Zelle mit einer Lithium-Cobalt-Oxid (LCO)-Verbindung.



Beim Ladevorgang lagern sich die Lithium-Ionen in den Grafitebenen ein. Beim Entladevorgang wandern die Lithium-Ionen zurück in das Metalloxid, die Elektronen können dann über den äußeren Stromkreis abgegriffen werden.

2.2 Aufbau und chemische Zusammensetzungen von Lithium-Ionen-Batterien

gängige Kapazitäten

Ein Akkumulator wird über eine Verbindung von einer Vielzahl an Batteriezellen zu unterschiedlichen Kapazitäten zusammengefasst. Dabei werden gegenwärtig im mobilen Bereich je nach Anforderung Kapazitäten zwischen wenigen Wattstunden (Wh), beispielsweise bei E-Bikes, bis zu 1.000 Kilowattstunden (kWh) in schweren Nutzfahrzeugsbereich realisiert.

Derzeit kommen mehrere Lithiumverbindungen mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz.

Tabelle 1:
Derzeitige Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Automobilbereich (Meyer et al., 2019)

Verbindungen	Abkürzung	Strukturformel
Kobaltoxid	LCO	LiCoO_2
Manganoxid	LMO	LiMn_2O_4
Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$
Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid	NCA	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$
Eisenphosphat	LFP	LiFePO_4

Die wesentlichen Charakteristika der unterschiedlichen Verbindungen werden in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2: Vergleich der wesentlichen Eigenschaften verschiedener Verbindungen von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Rahimzei, Sann und Vogel, 2015).

	LCO	LMO	NMC	NCA	LFP
Nennspannung [V]	3,7	3,7	3,6–3,7	3,6	3,2–3,3
Volumetrische Energiedichte [Wh/l]	320–500	290–340	490–580	480–670	160–260
Gravimetrische Energiedichte [Wh/kg]	110–180	100–120	180–210	180–250	80–120
Entladestrom [C]	1–2	3–20	1–10	1–10	10–50
Lebensdauer (Zyklen)	300–1 000	1 000–1 500	500–1 000	500–1 000	2 000–5 000

Die durchschnittliche Energiedichte beträgt gegenwärtig rund 250 Wh/kg und wird sich bis 2030 deutlich auf rund 500 Wh/kg erhöhen.

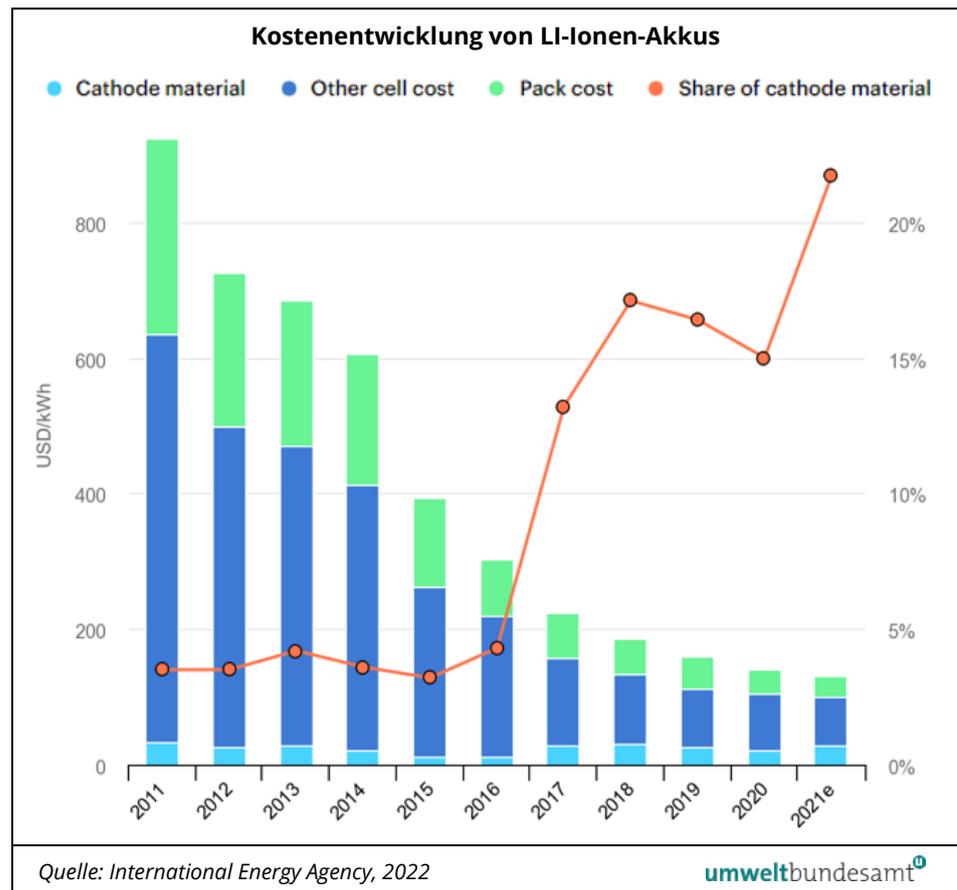
eingesetzte Anoden

Die Anoden der Lithium-Ionen Akkumulatoren dienen als Stromableiter, meist durch Kupferfolien verwirklicht, auf denen ein Aktivmaterial aufgebracht wird, das die Lithium-Ionen aufnehmen kann. Meistens werden Anoden eingesetzt, die auf Kohlenstoff basieren, d. h. Grafit. Grafit hat den Vorteil, dass er sich beim Aufladen kaum ausdehnt und somit materialschonend ist.

Es können jedoch auch Lithium-Titanatoxid-Anoden eingesetzt werden. Diese haben eine höhere Entladerate und Leistung bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen. Sie weisen zudem eine höhere Lebensdauer auf, sind aber durch das Titan kostenintensiver.

Kostenentwicklung Die Kostenentwicklung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren weist einen deutlichen Abwärtstrend auf.

Abbildung 3:
Kostenentwicklung von
LI-Ionen-Akkus
in USD je kWh.



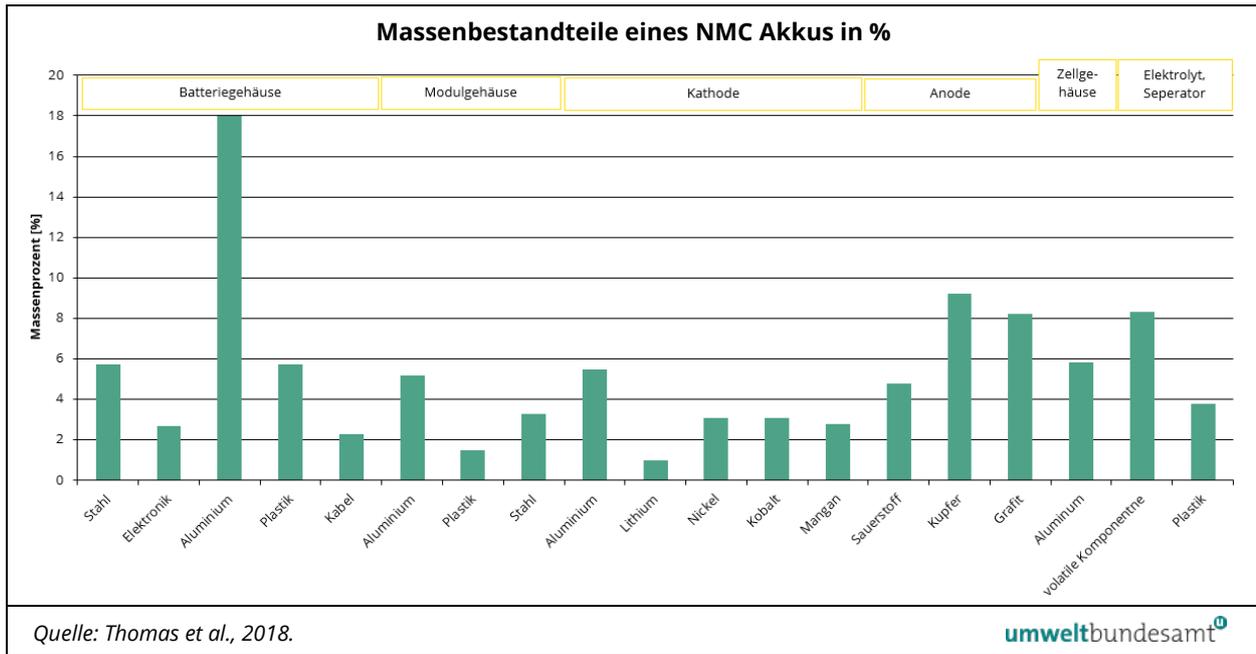
Seit 2011 konnten die Kosten um rund 80 % reduziert werden, wobei der Anteil des Kathodenmaterials von wenigen Prozentpunkten auf deutlich über 20 % gestiegen ist.

Herstellung und Bestandteile eines Lithium-Ionen-Akkumulators

Der Herstellungsprozess des Akkumulators kann in zwei wesentliche Phasen eingeteilt werden: die Herstellung der einzelnen Zellen und der anschließende Zusammenbau der Zellen zu einem Akkumulatorensatz, bei dem auch das BMS eingebaut und der Akkumulator eingehaust wird.

Massenbestandteile NMC-Akkumulatoren werden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Massenbestandteile weiter untergliedert. Der „ursprüngliche“ NMC-Akkumulator trägt die Bezeichnung 111. Diese deutet auf ähnlich hohe Massenanteile für die Bestandteile Nickel, Mangan und Kobalt hin. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die einzelnen Massenbestandteile eines NMC-111-Lithium-Ionen-Akkumulators.

Abbildung 4: Massenbestandteile eines NMC-111-Akkumulators, aufgeteilt nach den Rohstoffen in den Bauteilen: Batteriegehäuse, Modulgehäuse, Kathode, Anode, Zellgehäuse und Elektrolyt bzw. Separator.



Rund 44 % der Masse dieses Akkumulators entfallen auf das Batterie- und das Modulgehäuse. Die restlichen 56 % sind in der Zelle bzw. im Zellgehäuse verbaut. Die absoluten Anteile an Rohstoffen sind in der nachfolgenden Tabelle angeführt.

Tabelle 3:
Auflistung der Rohstoffe
nach Massenprozent
eines NMC-111-
Akkumulators
(Thomas et al., 2018).

Rohstoff	Massenprozent
Aluminium	34,5
Plastik	11,0
Kupfer	9,2
Stahl	9,0
volatile Komponenten	8,3
Grafit	8,2
Sauerstoff	4,8
Kobalt	3,1
Nickel	3,1
Mangan	2,8

Rohstoff	Massenprozent
Elektronik	2,7
Kabel	2,3
Lithium	1,0
SUMME	100,0

Rohstoffanteile

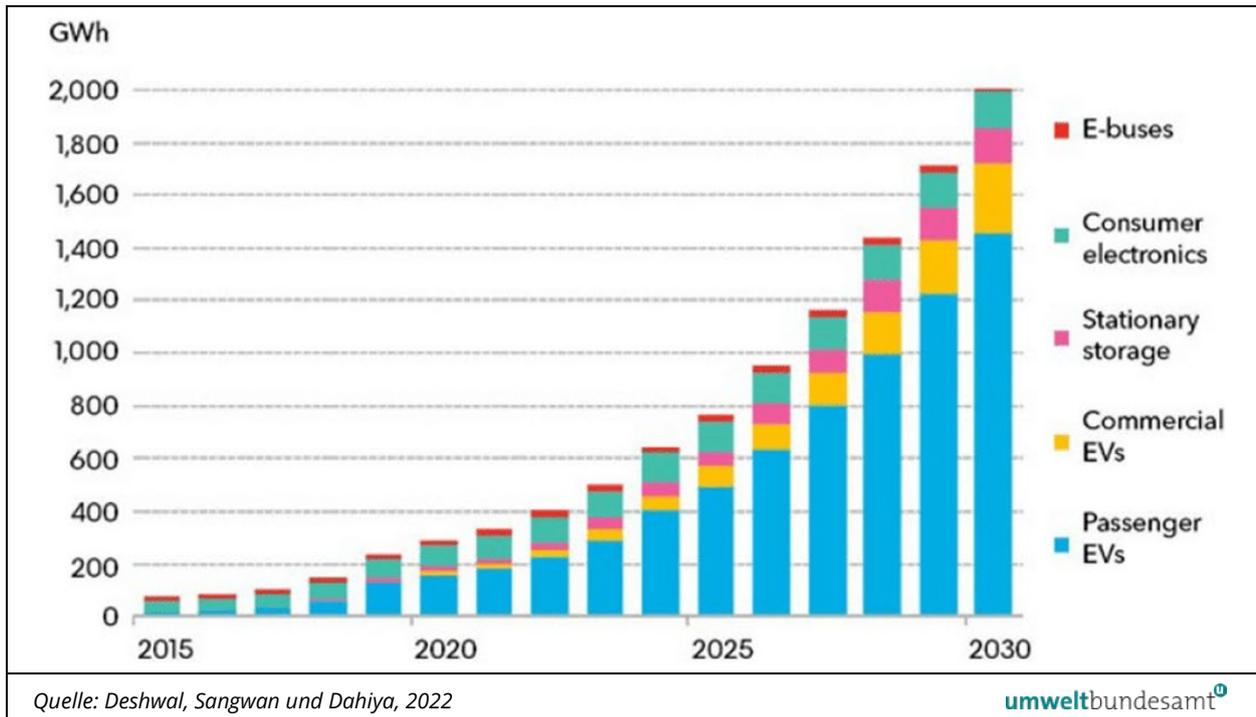
Wie Tabelle 3 entnommen werden kann, sind wesentlichen Bestandteile eines durchschnittlichen NMC-Akkumulators Aluminium, verschiedene Kunststoffteile der Einhausung, Kupfer für den Ladungstransport sowie Stahl. Zusammen mit dem Elektrolyten (hier als volatile Komponente bezeichnet) sowie dem Grafit in der Anode machen diese Bestandteile rund 80 % des Batteriegewichtes aus. Lithium spielt mit lediglich 1 % des Akkumulatorgewichtes eine untergeordnete Rolle.

Diese Verteilung ist für alle Kathodenmaterialien ähnlich, wobei bei Aluminium bzw. Kunststoff größere Schwankungen in Bezug auf die Gesamtmasse auftreten können.

Je nach Anforderungsprofil und Ausführung des Akkumulators gibt es Unterschiede bei der Verteilung der Rohstoffe der Aktivmaterialien. Mengenmäßig dominieren die Metalle Aluminium (Kühlsystem, Gehäuse und Kathodenstromabnehmer), Kupfer (Anodenstromabnehmer) sowie Stahl (Gehäuse) unabhängig vom Batterietyp.

In der Vergangenheit waren Lithium-Ionen-Akkumulatoren hauptsächlich in mobilen Elektronikgeräten wie Laptops und Mobiltelefonen im Einsatz. Durch die hohe Nachfrage und die bedeutend höheren Kapazitätsanforderungen wird mittlerweile schon die überwiegende Mehrheit der produzierten Akkumulatorkapazität im Fahrzeugbereich eingesetzt (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Globale Nachfrage nach Lithium-Ionen-Akkumulatoren nach Anwendung.



2.3 Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen

NMC-Akkus marktdominierend

Bis vor rund fünf Jahren wurden noch Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen in Elektrofahrzeugen verbaut. Mittlerweile hat sich eine eindeutige Präferenz herauskristallisiert: NMC-Akkumulatoren sind durch eine vergleichsweise hohe Leistung bei geringen Kosten gekennzeichnet und werden im Großteil der Elektrofahrzeuge, sowohl am europäischen als auch am asiatischen Markt, verbaut (Wangda, Erickson und Manthiram, 2020). Eine Ausnahme bildet das amerikanische Unternehmen Tesla, das die NMC-Technologie zwar in Akkumulatoren für stationäre Anwendungen verbaut, in den Fahrzeugen jedoch auch NCA- und LFP-Akkumulatoren einsetzt (Bolli, 2022).

Unterformen von NMC-Akkus

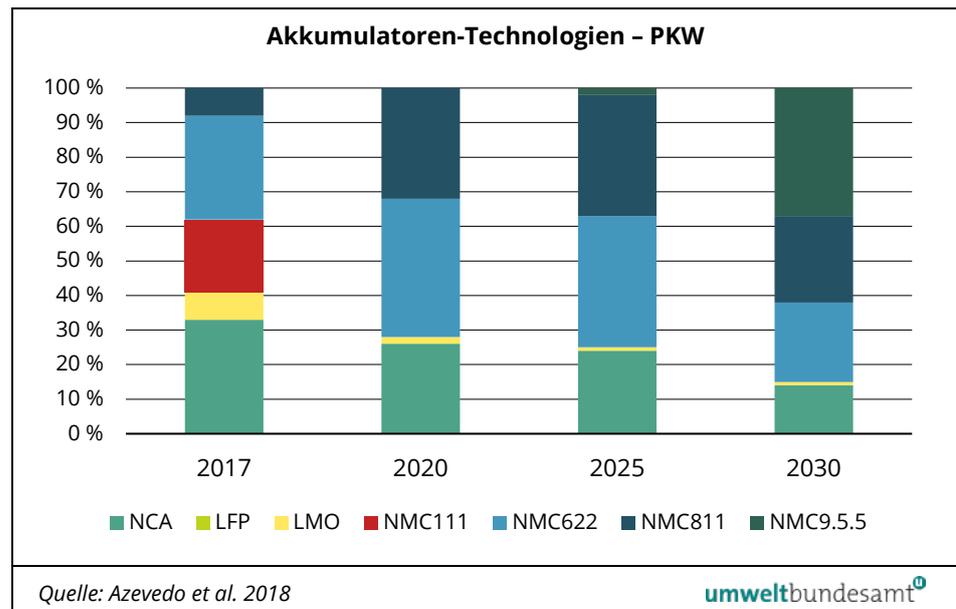
Aber auch NMC-Akkumulatoren unterscheiden sich untereinander in ihrer chemischen Zusammensetzung. Die namensgebenden Bestandteile bleiben zwar stets Nickel, Mangan und Kobalt. Allerdings wird dahingehend eine Weiterentwicklung vorangetrieben, dass der Anteil des sozial problematischen und kostenintensiven Kobalts stets zugunsten der anderen Elemente reduziert wird. Folgende Unterformen werden unterschieden, wobei der ergänzende Zahlen-code die Verteilung der Gewichtsanteile ausdrückt:

- NMC 111: die einfachste Variante, basierend auf einer annähernden Gleichverteilung der betreffenden chemischen Elemente,
- NMC 532/622 mit höherer Energieintensität und geringeren Kosten aufgrund des reduzierten Kobalt-Anteils und

- die aktuell fortschrittlichste Variante NMC 811.
- Zukünftig wird die Variante NMC 9.5.5 mit jeweils 0,5 Anteilen für Mangan und Kobalt dominieren.

Expert:innen gehen davon aus, dass NMC-Akkumulatoren mit stetig sinkenden Kobalt-Anteilen in den nächsten zehn bis 15 Jahren den globalen Elektrofahrzeugmarkt dominieren werden (vgl. nachfolgende Abbildung auf Basis (Azevedo et al., 2018)).

Abbildung 6:
Erwartete Verteilung
der Akkumulatoren-
Technologien im Auto-
mobil-Bereich bis 2030.



2.4 Batteriekapazität und Batteriebensdauer

zwei Betrachtungen der Lebensdauer

Die Lebensdauer eines Akkumulators hängt von der Zykluslebensdauer bzw. von der kalendarischen Lebensdauer ab. Im Normalfall ist die kalendarische Lebensdauer bedeutend höher, da durch häufiges Laden und Entladen der Akkumulator schneller geschädigt wird als bei reinen Alterungsprozessen. Die kalendarische Lebensdauer bezieht sich auf den nicht genutzten Zustand des Akkumulators und ist von den Wechselwirkungen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterialien sowie Korrosionsvorgängen abhängig. Hohe oder sehr tiefe Temperaturen, aber auch die qualitative Ausführung des Akkumulators haben Einfluss auf die kalendarische Lebensdauer.

Die Zykluslebensdauer beschreibt die Anzahl der möglichen Zyklen einer Zelle bzw. des gesamten Systems. Die vollständige Entladung und anschließende Ladung wird als ein Zyklus bezeichnet.

Alterungsprozesse

Die Alterung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren wird durch die Zell-Oxidation hervorgerufen, bei der die Elektroden die Fähigkeit verlieren, die Lithium-Ionen zu speichern. Auch hohe Lasten, hervorgerufen durch hohe Stromstärken, ver-

ursachen eine interne Wärmeproduktion, welche sich negativ auf die Materialien auswirkt. Dadurch können z. B. die Elektrodenmaterialien irreversibel beschädigt und die Alterung beschleunigt werden. Bei vielen Akkumulatoren ist daher eine aktive Kühlung notwendig, welche vom BMS (Batteriemanagementsystem) gesteuert wird. Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen verfügen durchgehend über eine aktive Kühlung. Lediglich Akkumulatoren mit geringen Kapazitäten bzw. Lasten, wie z. B. herkömmliche 3,6 V-Akkumulatoren, benötigen kein BMS bzw. keine Kühlung.

Akku-Zustand Wichtige Begriffe zur Beschreibung des Zustandes eines Akkumulators sind DOD (Depth of Discharge, die Entladetiefe) sowie SOC (State of Charge, der Ladezustand). Der Begriff SOH (State of Health, der Gesundheitszustand) beschreibt die Restkapazität des Akkumulators. Das BMS überwacht und steuert den Lade- bzw. Entladevorgang und dient als Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und Akkumulatoren.

erforderliche Restkapazität Die wesentliche Frage für den Anwendungsfall Elektromobilität ist, wie hoch die Restkapazität sein muss, damit die Anforderungen für den mobilen Einsatz (große Lasten für Beschleunigungsvorgänge bzw. hohe Reichweiten) erfüllt werden können. Der dafür verwendete Begriff ist Remaining Useful Life (RUL).

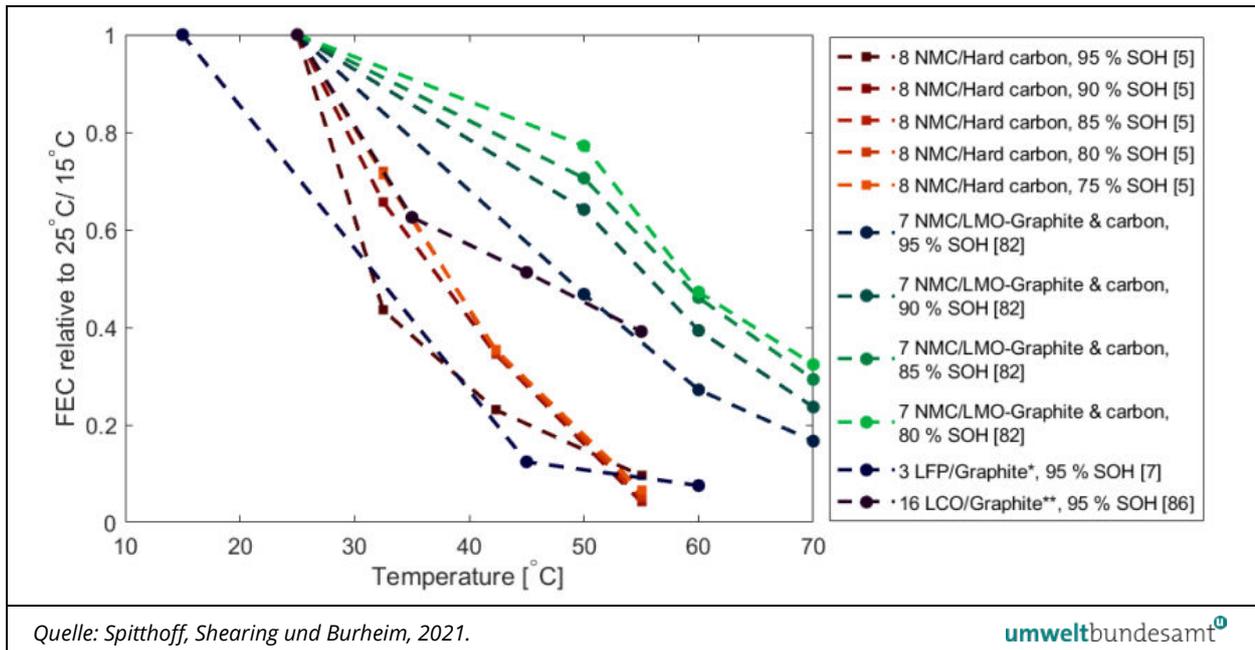
In vielen Anwendungsfällen ist das Lebensende des Akkumulators erreicht, wenn der SOH zwischen 70 % und 80 % liegt. Nach Teil 4 der DIN 43539 „Akkumulatoren; Prüfungen; Ortsfeste Zellen und Batterien“ tritt das Lebensdauerende ein, wenn die Speicherfähigkeit auf weniger als 80 % der Nennkapazität gesunken ist (DIN 43539-4:1980-12).

Verlängerung der Lebensdauer Die RUL bzw. die Lebensdauer des Akkumulators ist insbesondere auch vom Anwendungsprofil abhängig. Wird beispielsweise bei einem Lithium-Ionen-Akkumulator der SOC auf 80 % bis 90 % der Gesamtkapazität beschränkt, kann die Lebensdauer auf bis zu 3 000 Zyklen und mehr erhöht werden. Wenn ein Zyklus mit Beschränkung des SOC auf 80 % eine Reichweite von rund 100 Kilometern bringt, dann können dadurch bis zu 300 000 Kilometer mit einem Akkumulator zurückgelegt werden.

Bei vollständiger Nutzung der Kapazität fällt diese nach 500 Vollzyklen auf 70 %. Wenn die Entladetiefe (DOD) auf 80 % beschränkt wird, so werden bereits 1 000 (Teil-)Zyklen erreicht. Wird auch der Ladezustand (SOC) beschränkt, so können mit dem gleichen Akkumulator bis zu 6 000 Teilzyklen mit den Grenzen 70 % der Kapazität beim SOC und 80 % beim DOC erreicht werden. In diesem Beispiel kann dann zwar nur lediglich 50 % der tatsächlichen Kapazität abgerufen werden, dies aber immerhin 6 000 Mal.

Lebensdauer und Temperatur Neben der Abhängigkeit der Zyklenlebensdauer von der Handhabung des Akkumulators ist die kalendarische Lebensdauer stark von der Außentemperatur abhängig. Die Abhängigkeit des SOH eines Lithium-Ionen-Akkumulators von der Außentemperatur zeigt die folgende Abbildung 7.

Abbildung 7: SOH als Funktion von FEC (Full Equivalent Cycles) in Abhängigkeit von der Außentemperatur.



In obiger Abbildung sind Full Equivalent Cycles verschiedener Batterien mit unterschiedlicher SOH im Vergleich zur Zyklanzahl bei Raumtemperatur dargestellt. Es zeigt sich eine klare Temperaturabhängigkeit der Batterie: Je wärmer die Batterieumgebung, desto weniger vollständige Ladezyklen werden erreicht.

Richtiges Laden bzw. gute Akkumulatorenpflege können die Lebensdauer von Akkumulatoren erhöhen (Elektronik-Kompodium.de):

- Temperaturen über 40°C vermeiden,
- vollständiges Be- und Entladen vermeiden,
- möglichst selten auf über 90 % der Kapazität laden,
- möglichst weniger als 10 % leerlaufen lassen.

Diese Unsicherheiten bei der Restkapazität bzw. beim RUL machen eine Abschätzung, ab wann der Einsatz von Akkumulatoren im mobilen Bereich nicht mehr möglich ist, schwierig. Die Anwendung im mobilen Bereich wird in aller Regel bis zu einem Kapazitätsverlust auf 80 % begrenzt sein, da ab diesem Verlust die hohen Anforderungen, zum Beispiel bei einer Beschleunigung, nicht mehr erfüllt werden können (Canals Casals und García, 2016).

Die meisten Fahrzeughersteller geben jedoch Garantien auf die verbauten Akkumulatoren aus. Eine Auswertung des Allgemeinen Deutschen Automobilclubs (ADAC) zeigt, dass zahlreiche Hersteller eine Restkapazität von 70 % nach 96 Monaten beziehungsweise acht Jahre oder 160 000 Kilometer garantieren (ADAC, 2022). In allen drei Parametern, also der Restkapazität, der Nutzungsdauer sowie der Fahrleistung, sind aber auch Variationen zu beobachten. Tesla beispielsweise gibt für deren Akkumulatoren eine Garantie von mindestens acht Jahren aus bzw. je nach Modell für Fahrleistungen von bis zu 240 000 km. In we-

nigen Fällen sind auch die Anzahl der Ladezyklen und/oder die sachgemäße Behandlung der Batterie Teil der Garantiebedingungen. Datenauswertungen von Tesla-Nutzer:innen zeigen, dass bei vielen Fahrzeugen auch nach 250 000 Kilometer noch 90 % Restkapazität vorhanden sind (der Standard, 2018).

Tabelle 4: Auflistung der Garantiebedingungen auf Akkumulatoren ausgesuchter Fahrzeugmodelle (ADAC, 2022).

Hersteller	Modell	Batterie-Garantie [Monate]	Laufleistung [Kilometer]	Restkapazität [Prozent]
Aiways	U5	96	150 000	75 %
Audi	alle	96	160 000	70 %
BMW	alle	96	160 000	70 %
Citroën/DS	alle neueren Modelle	96	160 000	70 %
Citroën/DS	C-Zero, Berlingo (B9)	96	100 000	70 %
Fiat	500e (23 kWh)	96	100 000	70 %
Fiat	500e (42 kWh)	96	160 000	70 %
Ford	Mach-e	96	160 000	k. A.
Honda	e	96	160 000	k. A.
Hyundai	Kona, Ioniq 5	96	160 000	70 %
Hyundai	Ioniq elektro	96	200 000	70 %
Jaguar	I-Pace	96	100 000	70 %
Kia	alle	84	150 000	70 %
Lexus	UX300e	120	1 Mio	70 %
Mazda	MX-30	96	160 000	70 %
Mercedes-Benz	EQA, EQB, EQC	96	160 000	70 %
Mercedes-Benz	EQS	120	250 000	70 %
MINI	COOPER SE	96	160 000	70 %
Nissan*	alle	60/96	100 000/160 000	-
Opel	alle neuen Modelle	96	160 000	70 %
Opel	Ampera-e	96	160 000	60 %
Peugeot	alle neuen Modelle	96	160 000	70 %
Peugeot	iOn	96	100 000	70 %
Polestar	2	96	160 000	k. A.
Porsche**	Taycan	36/96	60 000/160 000	80 %/70 %
Renault	Zoe, Twingo	96	160 000	80 %
Renault	Kangoo	60	100 000	66 %
Seat	alle	96	160 000	70 %
Skoda	alle	96	160 000	70 %
Smart	alle	96	100 000	70 %
Tesla	Model 3 SR+	96	160 000	70 %
Tesla	Model 3 LR, Performance	96	200 000	70 %
Tesla	Model S/X	96	240 000	70 %

Hersteller	Modell	Batterie-Garantie [Monate]	Laufleistung [Kilometer]	Restkapazität [Prozent]
Toyota	bz4x	96	160 000	k. A.
Volkswagen	alle	96	160 000	70 %
Volvo	alle	96	160 000	70 %

**) erster Wert für Material und Verarbeitung, zweiter Wert auf Kapazitätsverlust; Mindestkapazität: 9 von 12 Balken im Fahrzeugdisplay*

****) erster Wert, wenn Hinweise in der Betriebsanleitung zu Standzeiten missachtet wurden*

Nach der Anwendung im mobilen Bereich können die Akkumulatoren nun einer Nachnutzung zugeführt werden, ehe sie als Rohstoffquelle recycelt werden.

3 NACHNUTZUNG

3.1 Lebenszyklen von Akkumulatoren

Die Nachnutzung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren hat zunächst den Vorteil, dass dadurch die hohen Herstellungskosten auf eine weitere Nutzung aufgeteilt werden können.

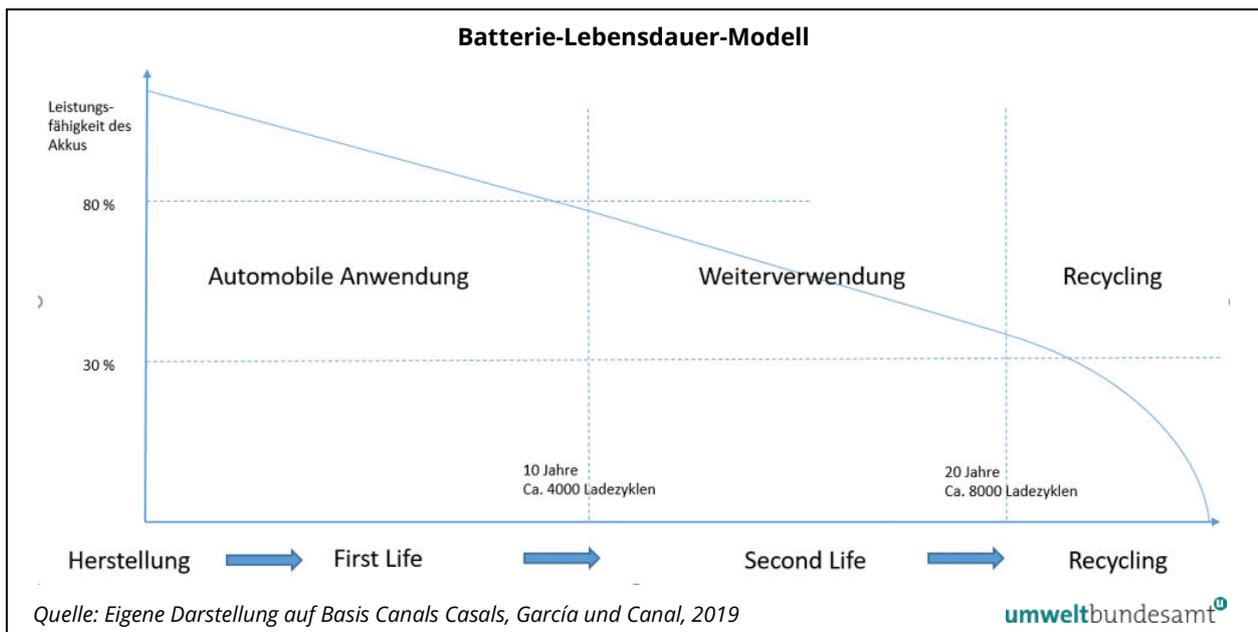
**Einsparungspotenzial
Treibhausgas**

Darüber hinaus ergibt sich durch die Nachnutzung ein signifikanter ökologischer Mehrwert: Da die Herstellung des Akkumulators große Mengen an Rohstoffen und Energie benötigt, ergibt sich, dass bei einer Ökobilanz eines batterieelektrischen Fahrzeugs (engl: Battery Electric Vehicle, kurz: BEV) der Akkumulator in allen relevanten Umweltkriterien eine maßgebliche Rolle spielt. Wird der Akkumulator nun weiterverwendet, so wird dadurch die Produktion von Neubatterien vermieden. Damit ergibt sich ein evidenter Umweltvorteil. Je nach Anwendungsfall der Nachnutzung (Bereitstellung von Primärregelleistung oder Haushaltsspeichersystem) ergeben sich Treibhausgaseinsparungen von 30 bis 110 kg CO_{2eq} je kWh Akkukapazität (Fischhaber et al., 2016). Die derzeitigen Treibhausgasemissionen je kWh Akkukapazität belaufen sich auf rund 80 bis 100 kg CO_{2eq} je kWh Kapazität (Meyer et al., 2019).

mögliche Lebensdauer

Bei einer Annahme der Nutzung in mobilen Anwendungen von zehn bis 15 Jahren kann die Nachnutzung des Akkumulators in Second-Life-Anwendungen die Lebensdauer auf bis zu 25 Jahre erhöhen (Canals Casals, García und Canal, 2019). Nach Ende dieses zweiten Lebenszyklus können die Akkumulatoren dann recycelt und die verbauten Rohstoffe und Bestandteile wiederverwendet werden.

Abbildung 8: Lebensdauerabschnitte eines Lithium-Ionen-Akkumulators.



Für den Fall, dass die ersten beiden Lebensabschnitte insgesamt nur rund 15 Jahre andauern, kann der Akkumulator mit ökonomischen Abstrichen auch noch einer Third-Life Anwendung zugeführt werden.

3.2 Möglichkeiten der Nachnutzung bzw. Second Life von Akkumulatoren

Einsatz-möglichkeiten

Mögliche Einsatzbereiche für eine zweite Nutzungsperiode einzelner Bestandteile eines Lithium-Ionen-Akkumulators sind vielseitig und reichen von kleinen weiterhin mobilen Anwendungen bis hin zu stationären Energiespeichern. Nachfolgend eine unvollständige Auflistung möglicher Einsatzgebiete:

- Stationäre Energiespeicher:
 - Hausspeichersysteme
 - Industrielle Großspeicher
 - Inselnetze
 - Spitzenlastmanagement
 - Netzstabile Einspeisung
- Elektrische Infrastruktur:
 - Primärregelleistung
 - Notstromversorgungssysteme
 - Schnellladesäulen
- Große mobile Anwendungen:
 - Hybrid-LKW
 - Fähren
 - Flurförderfahrzeuge/Stapler
- Kleine mobile Anwendungen:
 - Mobile Personal Computer (Laptops, Notebooks)
 - Hausroboter

Einschränkungen

Je nach Anforderungsprofil sind unterschiedliche Kapazitäten bzw. Ladeströme erforderlich. Das bedeutet, dass nur durch eine Untersuchung dieser Parameter der optimale Anwendungsfall gefunden werden kann. Nicht alle Akkumulatoren sind für sämtliche Einsatzbereiche geeignet. In Einzelfällen kann der Austausch oder die Erneuerung einzelner Zellen einen großen Einfluss auf die gesamte Leistungsfähigkeit des Akkumulators haben.

Optimierung

Die wesentlichen Stellschrauben für eine erfolgreiche Second-Life-Anwendung liegen in der Optimierung der Wiederaufbereitung und Detailkenntnissen über die Anwendungen (Fischhaber et al.):

- „Die Prüfung der Module von Traktionsbatterien auf ihre Weiterverwendungsfähigkeit in Second-Life-Batterien ist mit hohem Aufwand verbunden. Es besteht ein Bedarf an Alterungsschnelltests oder besser noch einer

kontinuierlichen Aufzeichnung geeigneter Zustandsgrößen in der Erstanwendung.

- Die Anforderungen von Sicherheits-Regularien sind zu berücksichtigen und zu bedenken. Dies gilt insbesondere für die Transportnorm UN 38.3, welche eine erneute Begutachtung bei Restkapazitäten kleiner als 80 % vorsieht.
- Je besser das Lastprofil der Second-Life-Anwendung auf den Alterungszustand der Traktionsbatterie abgestimmt ist, desto länger kann deren maximale Einsatzzeit dauern: Grundsätzlich sollten hohe Laderaten, hohe Ladeschlussspannungen sowie extreme (besonders tiefe) Temperaturen im Second-Life vermieden werden.
- Durch zunehmendes Wissen über Alterungsverläufe und Weiterentwicklung der Zellchemie kann eine übermäßige, nichtlineare Alterung gegebenenfalls verhindert und die Wirtschaftlichkeit des Second-Life-Betriebs weiter gesteigert werden.“

3.3 Nachnutzung oder Recycling?

kontroverse Diskussion Die Frage ob es nicht besser ist, die Lithium-Ionen-Akkumulatoren aus mobilen Anwendungen gleich zu recyceln und somit keiner Second-Life-Anwendung zuzuführen, wird kontrovers diskutiert (Lux Research, 2016, Köllner, 2019, Bernhart, 2019). Durch die Second-Life-Anwendung werden dem Markt die wichtigen Rohstoffe Kobalt bzw. Nickel entzogen, der energieintensive und ressourcenaufwendige Herstellungsprozess der Primärmaterialherstellung ist dadurch vermehrt notwendig. Die ökologische Bewertung dieser Fragestellung hängt derzeit noch von vielen Unsicherheiten ab, sodass keine abschließende Antwort möglich ist.

Primärrohstoffbedarf Die wesentliche Frage ist, ob durch die Verlängerung des Einsatzes des Akkumulators durch die Second-Life-Anwendung weniger oder mehr Primärrohstoffe benötigt werden, um den steigenden Bedarf an Lithium-Ionen-Akkumulatoren abzudecken. In jedem Fall reduzieren Second-Life-Anwendungen die anfallende Abfallmenge, da ein Akkumulator nie zu 100 % recycelt werden kann und es ist sehr wahrscheinlich, dass es insgesamt zu Einsparungen beim Energieverbrauch kommt (Pagliaro und Meneguzzo, 2019).

Materialeffizienz Eine zusätzliche Frage ist jene der Materialeffizienz, also die Menge an Rohstoffen bzw. Materialien je kWh Batteriekapazität. Der Recyclingzeitpunkt ist entweder nach zehn bis 15 Jahren, also gleich nach dem primären Einsatz, oder nach 20 bis 30 Jahren, also nach dem Second Life (siehe Abbildung 8). Welcher Recyclingzeitpunkt nun, aufgeteilt auf 30 Jahre, eine höhere Materialeffizienz aufweist, lässt sich derzeit nicht ausreichend beantworten. Zu bedenken ist, dass es innerhalb von 15 Jahren zu möglicherweise bedeutenden technologischen Entwicklungen kommen kann, die die Materialeffizienz signifikant erhöhen. Weiters können in Zukunft gänzlich andere Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit bedeutend anderen Eigenschaften am Markt verfügbar sein. Beispielfhaft genannt

werden sollen Lithium-Silizium, Lithium-Luft oder Lithium-Schwefel-Akkumulatoren.

Preis je kWh Üblicherweise beschränken sich die Diskussionen zur Frage Second-Life oder Recycling aber auf die ökonomische Betrachtung, bei der ausschließlich die Frage des Preises je kWh relevant ist. Nur bei hohen Preisen je kWh Kapazität ist eine Second-Life-Anwendung ökonomisch sinnvoll. Ist ein Recycling der Rohstoffe günstiger als die Beschaffung von Primärrohstoffen, werden sich Second-Life-Anwendungen reduzieren.

Eine neue Entwicklung, die hohen Recyclingraten entgegen läuft, ist, dass Batteriehersteller versuchen, wertvolle (und teils kritische) Metalle wie etwa Kobalt in möglichst geringen Mengen zu verwenden oder diese zu ersetzen, um den Batteriepreis zu senken (vgl. 2.3 Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen). Dadurch wird der Anreiz für Recyclingunternehmen geringer, die Batterien zu verwerten.

zu erwartende Verbesserungen Recycling oder Weiternutzung ist jedoch keine Entweder-oder-Frage, da es beim Testen der ausgemusterten Akkumulatoren bzw. beim Austausch und Erneuern einzelner Zellen in Zukunft zu Verbesserungen kommen wird. Der steigende Bedarf an Akkumulatoren durch die Elektromobilität macht einen geschlossenen Recyclingprozess auch bei Second-Life-Anwendungen notwendig. Auch bei Second- oder Third-Life-Anwendungen ist ein Recyclingvorgang am Ende des Lebenszyklus jedes Akkumulators ratsam.

Produktionskapazitäten Im Jahr 2019 wurde angenommen, dass bis zu 58 % aller ausgedienten Lithium-Ionen-Akkumulatoren recycelt werden (Pagliaro und Meneguzzo, 2019). Die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Akkumulatoren übersteigt die derzeitigen Produktionskapazitäten. Es wird zudem erwartet, dass die Primärproduktion der erforderlichen Materialien (insbesondere Lithium und Kobalt) nicht den Bedarf decken kann, was sich im Preisanstieg dieser Rohstoffe in den letzten Jahren widerspiegelt. Recycling ist mittlerweile aufgrund der hohen Nachfrage eine Notwendigkeit. Es wird erwartet, dass bis 2025 rund 9 % des Bedarfes an Lithium und rund 20 % des Bedarfes an Kobalt für Lithium-Ionen-Akkumulatoren über recycelte Rohstoffe gedeckt werden, wobei mehr als 66 % der Lithium-Ionen in China recycelt werden (Pagliaro und Meneguzzo, 2019). Neue Recycling-Technologien, die nicht auf pyrometallurgischen Verfahren beruhen, sondern mittels Metallauslaugung die wertvollen Rohstoffe wiedergewinnen, werden die Kosten und ökologischen Auswirkungen verringern. Die technisch möglichen Wiedergewinnungsraten von Kobalt und Lithium belaufen sich dabei auf über 99 %.

3.4 Leuchttürme der Nachnutzung

3.4.1 Johan Crujff Arena

Leistung Das Fußballstadion *Johan Crujff Arena* in Amsterdam wird seit November 2016 durch ein Projekt dreier Unternehmen (*Nissan*, *Eaton* und *The Mobility House*) mit 280 Nissan Leaf Second-Life-Akkumulatoren elektrisch versorgt. Das System ist in der Lage, eine Leistung von 3 MW bereitzustellen, die kumulierte Kapazität beträgt 2,8 MWh (Hammerschidt, 2018). Für den Sportbetrieb ist dies meist ausreichend, finden Musikveranstaltungen mit entsprechend höheren Leistungsanforderungen statt, muss zusätzlich noch Elektrizität aus dem öffentlichen Stromnetz zugekauft werden (Nissan Insider, 2016).

Wechselwirkungen mit Stromnetz Das System speichert die Solarenergie von 4 200 Photovoltaik-Modulen, die sich auf dem Dach der Arena befinden. So wird der Strombedarf reduziert, der andernfalls durch die öffentliche Elektrizitätsinfrastruktur bzw. Dieselgeneratoren gedeckt werden müsste. Das Stromnetz wird entlastet, indem die Lastspitzen abgefangen werden. Durch die Vermeidung solcher Spitzen wird auch eine gleichmäßigere Frequenz im öffentlichen Stromnetz erzielt.

Die Nutzung dieses Speichersystems bringt den Vorteil einer höheren Unabhängigkeit von Energieversorgern, zusätzlich ist es in der Lage, Stromausfälle zu überbrücken. Dies ist einerseits eine kosteneffektive Lösung und andererseits wird die Versorgungssicherheit erhöht. Weiters stellen die Second-Life-Akkumulatoren eine preiswertere Lösung dar als z. B. die Anschaffung neuer Akkumulatoren.

geplante Erweiterung In Planung ist eine Erweiterung des Projektes um 200 Lademöglichkeiten für Elektroautos, die am Parkplatz realisiert werden sollen. Dieses Ladesystem wird in der Lage sein, Elektrizität bidirektional zu übertragen. Das bedeutet, dass neben dem Laden von E-Autos zusätzlich die Möglichkeit besteht, Energie von parkenden E-Autos ins Netz bzw. ans Stadion zu übertragen (Vehicle-to-Grid).

Die *Johan Crujff Arena* hat eine Kapazität von 55 000 Plätzen und zählt jährlich mehr als zwei Millionen Besucher:innen.

3.4.2 Speichersystem Powervault 3eco

Beim *Powervault* handelt es sich um einen stationären Stromspeicher, vorrangig für Haushalte, der in unterschiedlichen Kapazitäten vertrieben wird und zur Zwischenspeicherung von – beispielsweise mittels Photovoltaikanlage erzeugtem – erneuerbaren Strom eingesetzt wird.

Neben dem *Powervault 3* vertreibt das Unternehmen in Kooperation mit den Fahrzeugherstellern Nissan und Renault auch den *Powervault 3eco*. Dabei kommen Lithium-Ionen-Akkumulatorenmodule (chemische Zusammensetzung der Kathode: Lithium-Manganoxid – LMO, Strukturformel LiMn_2O_4) zum Einsatz, die

mangels ausreichender Restkapazität für eine mobile Anwendung aus Elektrofahrzeugen entnommen wurden und in diesem Produkt einer Sekundäranwendung zugeführt werden.

Das Speichersystem wird in drei verschiedenen Kapazitäten (3,9; 5,9 und 7,9 kWh) angeboten (Powervault, 2019) und wird laut Hersteller zu günstigeren Preisen angeboten als das Schwestermodell mit neuen Akkumulatorenmodulen.

3.4.3 The Reborn Light

Abbildung 9:
Nissan Reborn Light



The Reborn Light ist ein innovatives Straßenbeleuchtungssystem des japanischen Fahrzeugherstellers *Nissan* in Kooperation mit seinem Tochterunternehmen *4R Energy Corporation*. Es handelt sich dabei um eine autarke Straßenlaterne, wobei die Stromversorgung durch zwei Zellen aus Second-Life-Akkumulatoren aus Nissan Leaf E-PKW sichergestellt wird. Durch ein PV-Solarpanel werden die Akkumulatoren tagsüber aufgeladen. Bei Einbruch der Dunkelheit werden die Lampen aktiviert und sorgen so für beleuchtete Straßen (Nissan, 2019).

als Inselösung möglich

Der Vorteil besteht unter anderem darin, dass keine Elektrizitätsinfrastruktur vorhanden sein muss – es kann als Inselssystem betrieben werden. Dadurch ist es möglich, in Gebieten eine Straßenbeleuchtung sicherzustellen, in denen eine Erschließung des Infrastrukturnetzes unverhältnismäßig kostenintensiv wäre.

Testbetrieb

In der japanischen Stadt *Namie* (knapp zehn Kilometer vom ehemaligen Kernkraftwerk Fukushima entfernt) gibt es bereits einen Testbetrieb der smarten Straßenlaternen (Projektmotto: „Reborn Light for a reborn city“). Die Atomkatastrophe von 2011 gilt als Auslöser für diese Idee, da damals die gesamte Elektrizitätsversorgung ausgefallen war (Pluta, 2018).

Marktpotenzial Laut Anbieter haben gegenwärtig 17 % der Weltbevölkerung keinen Zugang zu Elektrizität, nicht-elektrifizierte Gebiete stellen für den Hersteller ein großes Potenzial dar.

3.4.4 „Smart Fossil Free Island“ – Porto Santo

Abbildung 10:
Photovoltaik-Anlage
auf Porto Santo.



Bei der Stromversorgung der portugiesischen Insel Porto Santo handelt es sich um ein Pionierprojekt, bei dem die drei Flexibilitätsformen intelligentes Laden, Vehicle-to-Grid-Anbindung von Elektrofahrzeugen und Second-Life-Akkumulatoren kombiniert und von einer zentralen Softwareplattform gesteuert werden.

Porto Santo hat 5 000 Einwohner:innen und liegt ca. 30 Kilometer nordöstlich von Madeira. Aufgrund seiner abgeschiedenen Lage hat Porto Santo keinen Anschluss an das Stromnetz auf dem Festland. Es setzt – wie so viele Inseln weltweit – für eine zuverlässige Stromversorgung daher vor allem auf Dieselgeneratoren. Das Konzept von Renault, The Mobility House und dem örtlichen Stromversorger EEM basiert zum einen auf der Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft. So gibt es einen großen Solarpark mit 2,3 Megawatt Leistung auf der Insel. Dazu kommen über die Insel verstreut weitere 19 dezentrale Photovoltaik-Anlagen auf Dächern und Freiflächen mit insgesamt 340 Kilowatt Leistung (Enkhardt, 2019).

Ausgleich von Schwankungen

Stromschwankungen, sowohl in der Produktion als auch in der Nachfrage, werden durch ausgediente Akkumulatoren aus Elektrofahrzeugen sowie durch eine intelligente Cloud-Plattform ausgeglichen. Besteht ein Überschuss an erneuerbaren Energien, wird dieser Strom an die stationären Speicher sowie die Elektroautos abgegeben. Ist die Erzeugung von nachhaltiger Energie durch Wind und Wetter eingeschränkt, geben die stationären Speicher und die bidirektionalen E-Autos ihre Energie wieder ans Netz ab.

Weiterentwicklung Weiterentwicklungsmöglichkeiten bestehen weiterhin, da immer noch der größte Teil der erzeugten Energie aus Dieselgeneratoren gewonnen wird. Im Mai 2018 lag der Anteil an erneuerbaren Energieträgern (Solarstrom und Windkraft) bei knapp 15 %. Das Ziel gänzlich ohne fossile Energieerzeugung auszuweisen ist also noch nicht erreicht. Der größte Energiebedarf entsteht übrigens durch die notwendige Entsalzung des Meerwassers (Context Crew, 2019).

Nach und nach soll das Gesamtsystem um weitere Elektrofahrzeuge, stationäre Akkumulatoren sowie Solar- und Windkraftanlagen ergänzt werden.

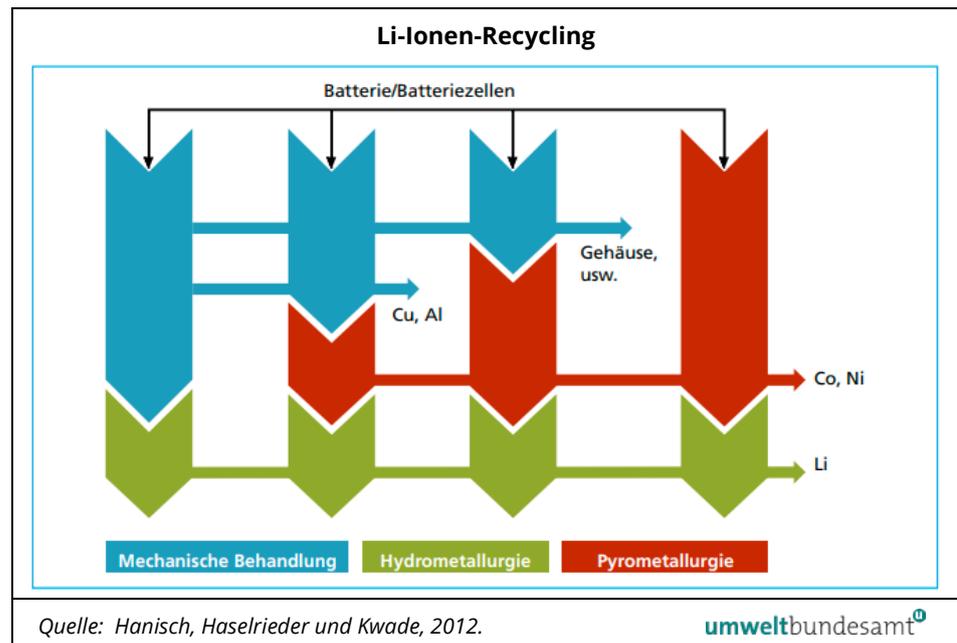
4 RECYCLING

Prozessschritte

Der Recyclingprozess gliedert sich in Demontage, Deaktivierung und anschließende mechanische Behandlung. Das Recycling der Materialien wird üblicherweise hydrometallurgisch und pyrometallurgisch bzw. durch eine Kombination aus beiden Verfahren durchgeführt.

Die verschiedenen Möglichkeiten des Recyclingprozesses sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 11:
Grundoperationen und
Prozesswege des
Li-Ionen-Recyclings.



Beim pyrometallurgischen Verfahren werden die Zellen gemeinsam mit einem schlackebildenden Zusatzstoff (z. B. Kalkstein) bei sehr hohen Temperaturen in einem Schachtofen erhitzt, wodurch die Metalle zum Schmelzen gebracht werden. Dabei verdampfen Elektrolyt und Graphit, andere kohlenstoffhaltige Plastikteile verbrennen. Neben der Schlacke bleibt dabei eine Legierung übrig, die die Metalle Kupfer, Nickel und Kobalt sowie Aluminium enthält. In einem weiteren Verarbeitungsschritt werden aus dieser Legierung Kupfer, Nickel und Kobalt zurückgewonnen, wobei bis zu 99 % der enthaltenen Metalle wiedergewonnen werden können (Meyer et al., 2019).

Beim hydrometallurgischen Verfahren werden die vorher demontierten Zellen mit Lauge behandelt und die Metalle herausgelöst.

Bei der mechanischen Behandlung werden die wertvollen Metalle Aluminium und Kupfer wiedergewonnen. Derzeit liegt der Fokus beim Recyclingprozess auf der Wiedergewinnung der Aktivmaterialien Nickel und Kobalt. Lithium kann theoretisch ebenfalls mit hydrometallurgischen Verfahren recycelt werden, jedoch

wird dies derzeit noch nicht gemacht, da der Aufwand dafür zu hoch ist. Die lithiumhaltige Schlacke, die beim pyrometallurgischen Prozess anfällt, wird meist anderen Anwendungen z. B. in der Bauindustrie zugeführt.

Forschung zur Weiterentwicklung

Forschungsprojekte wie beispielsweise *LithoRec* zielen darauf ab, Lithium mittels mechanischen und hydrometallurgischen Verfahren gemeinsam mit den Aktivmaterialien zurückzugewinnen. Ein weiterer Vorteil des LithoRec-Prozesses ist, dass die zurückgewonnenen Materialien bei mechanischer Aufbereitung im Labormaßstab nachgewiesenermaßen Batteriequalität aufweisen und somit ein geschlossener Kreislauf der strategisch wichtigen Batterierohstoffe erfolgt (Harnisch, Haselrieder und Kwade, 2012).

Recyclingqualität

Der Lithium-Ionen-Akkumulator ist, bis auf den Elektrolyten, im Prinzip vollständig recycelbar. Das Hauptaugenmerk liegt derzeit bei der Rückgewinnung der wertvollen Metalle Aluminium, Kupfer sowie Eisen, welche auch den Großteil der Massenprozent eines Lithium-Ionen-Akkumulators ausmachen. Der zweite Grund für das Recycling ist die Rückgewinnung der Aktivmaterialien Kobalt und Nickel. Diese Metalle lassen sich mit Ausnahme von Aluminium mit so hoher Qualität wiedergewinnen, dass daraus hergestellte neue Batterien die gleichen Eigenschaften aufweisen wie die Lithium-Ionen-Akkumulatoren aus Primärrohstoffen. Die Anforderungen an das Aluminium der Zelle können nur mittels Primäraluminium befriedigt werden, beim Batteriegehäuse bzw. Kühlsystem kann auch Gussaluminium bzw. Sekundäraluminium herangezogen werden.

4.1 Rechtlicher Rahmen

4.1.1 Europäische Ebene

EU-Richtlinien

Auf europäischer Ebene ist die Batterierichtlinie 2006/66/EG (EK, 2006) die zentrale Rechtsvorschrift für den Bereich Batterien und Akkumulatoren. Sie gilt (mit wenigen Ausnahmen) für alle Typen von Batterien und Akkumulatoren, unabhängig von Form, Volumen, Gewicht, stofflicher Zusammensetzung oder Verwendung. Die Batterierichtlinie wurde in den vergangenen Jahren mehrmals novelliert, zuletzt durch die Richtlinie (EU) 2018/849 (EK, 2018).

Ziel der Batterierichtlinie

Das vorrangige Ziel der Batterierichtlinie besteht darin, die negativen Auswirkungen von Batterien und Akkumulatoren sowie von Altbatterien und -Akkumulatoren auf die Umwelt so gering wie möglich zu halten und somit zum Schutz, zur Erhaltung und zur Verbesserung der Umweltqualität beizutragen. Parallel zu den Umweltzielen soll mit der Richtlinie das reibungslose Funktionieren des europäischen Binnenmarktes sichergestellt werden, indem die Produkt- und Kennzeichnungsanforderungen für Batterien harmonisiert werden.

Diese beiden allgemeinen Ziele der Richtlinie – der Umweltschutz und das Funktionieren des Binnenmarktes – spiegeln die Probleme wider, die mit der Richtlinie gelöst werden sollen. Die in der Richtlinie angesprochenen Umweltprobleme konzentrieren sich auf potenzielle Auswirkungen gefährlicher Substanzen

in Batterien. Probleme, die der Umsetzung der Batterierichtlinie vorausgingen, haben den europäischen Binnenmarkt in verschiedener Hinsicht behindert: unterschiedliche nationale Normen für die Kennzeichnung von Batterien und unterschiedliche nationale Schwellenwerte für gefährliche Inhalte.

**Geltungsbereich
und Inhalt**

Die Batterierichtlinie gilt für alle innerhalb der Europäischen Union in Verkehr gebrachten Batterien und Akkumulatoren und befasst sich mit dem gesamten Lebenszyklus, von den Ressourcen für neue Batterien und Akkumulatoren bis hin zur Abfallentsorgung und zum Recycling von Altbatterien bzw. Akkumulatoren.

Die Richtlinie legt Ziele und Vorgaben fest (z. B. Sammlung, Rücknahme und Recycling). Sie spezifiziert Maßnahmen (wie das Auslaufen von Quecksilber oder die Einführung nationaler Sammelsysteme) und ermöglicht Maßnahmen (z. B. Berichterstattung oder Kennzeichnung), um diese zu erreichen. Die beiden wichtigsten Ziele der Richtlinie, die sowohl konkret als auch quantitativ sind, sind die Sammelquote und die Recyclingeffizienz von Batterien und Akkumulatoren. Um die mit der ordnungsgemäßen Sammlung und dem Recycling verbundenen Kosten zu decken, hat die Richtlinie die Herstellerverantwortung für die verschiedenen Batteriekategorien festgelegt.

Im Hinblick auf die Vorgaben zu Recycling legt die Richtlinie fest, dass Altbatterien und -Akkumulatoren möglichst weitgehend getrennt zu sammeln und die endgültige Beseitigung von Batterien und Akkumulatoren als unsortierte Siedlungsabfälle so weit wie möglich zu verringern sind, damit bei allen Altbatterien und -Akkumulatoren ein hohes Recyclingniveau sichergestellt werden kann (Art. 7). Mitgliedstaaten haben sicherzustellen, dass geeignete Rücknahmesysteme für Geräte-Altbatterien und -Akkumulatoren vorhanden sind (Art. 8) und können wirtschaftliche Instrumente einsetzen, um die Sammlung zu fördern (Art. 9). Art. 10 der Richtlinie legt Sammelziele in Form von Mindestsammelquoten fest, während Art. 12 Vorgaben zu Behandlung und Recycling enthält. Dort ist auch die Vorgabe enthalten, dass bis spätestens 26. September 2011 den in Anhang III Teil B der Richtlinie enthaltenen Recyclingeffizienzen (d. h. Mindestrecyclingquoten) entsprochen werden muss. Diese sind:

- 65 % des durchschnittlichen Gewichts von Blei-Säure-Batterien und -Akkumulatoren bei einem Höchstmaß an Recycling des Bleigehalts, das ohne übermäßige Kosten technisch erreichbar ist;
- 75 % des durchschnittlichen Gewichts von Nickel-Cadmium-Batterien und -Akkumulatoren bei einem Höchstmaß an Recycling des Cadmiumgehalts, das ohne übermäßige Kosten technisch erreichbar ist;
- 50 % des durchschnittlichen Gewichts sonstiger Altbatterien und -Akkumulatoren.

Verordnung Nr. 493/2012 (EK, 2012) legt die Bestimmungen zur Berechnung der Recyclingeffizienzen von Recyclingverfahren für Altbatterien und Alt-Akkumulatoren fest. Eine Evaluierung (SWD (2019) 300 final) der Europäischen Kommission im Jahr 2019 hat ergeben, dass die Recyclingeffizienzziele von den Mitgliedstaaten zum größten Teil erreicht wurden, in einigen Fällen allerdings gravierende Datenlücken bestehen (EK, 2019).

4.1.2 Die Umsetzung in Österreich

Rechtsvorschriften

In Österreich wurde die Batterierichtlinie primär in der Batterienverordnung (BGBl. II Nr. 159/2008 idF. BGBl. II Nr. 311/2021) umgesetzt. Auch das Abfallwirtschaftsgesetz (BGBl. I Nr. 102/2002 idF. BGBl. I Nr. 200/2021) enthält eine relevante Bestimmung im Hinblick auf die Meldepflichten von Abfallbehandlern von Altbatterien und -Akkumulatoren (§ 21 Abs. 3a AWG).

Inhalt

Entsprechend § 3 Abs. 6 werden Batterien und Akkumulatoren, die in Elektrofahrzeugen Anwendung finden als „Industriebatterien“ definiert. Hersteller, die Industriebatterien in Verkehr setzen, haben Industrialtbatterien unabhängig vom Datum ihres Inverkehrsetzens und unabhängig von ihrer Herkunft oder chemischen Zusammensetzung zurückzunehmen (§ 15 Abs. 1 Batterienverordnung). Sie können allerdings auch mit den Letztverbrauchern der Industriebatterien Vereinbarungen über die Finanzierung der Sammlung oder Behandlung treffen (§ 15 Abs. 2 Batterienverordnung). Weiters treffen die Hersteller von Industriebatterien Verpflichtungen nach § 5 Abs. 1 und 2 Batterienverordnung. Diese Bestimmungen definieren Anforderung an die Behandlung von Altbatterien und verpflichten Hersteller zur Erreichung der in Anhang I enthaltenen Recyclingeffizienzen und zur Führung von Aufzeichnungen über die Masse der Altbatterien. § 7 Abs. 1 der Batterienverordnung, welcher die Informationsbereitstellung für Letztverbraucher regelt, kommt ebenso zur Anwendung (vgl. § 16 Abs. 2 Batterienverordnung). Hersteller von Industriebatterien haben die Möglichkeit, die Verpflichtungen gemäß § 5 Abs. 1, § 2, § 7 Abs. 1 und § 15 Abs. 1 der Verordnung je Sammel- und Behandlungskategorie gesamthaft an ein dafür genehmigtes Sammel- und Verwertungssystem für Industrialtbatterien vertraglich zu übertragen, womit die entsprechenden Verpflichtungen auf den Betreiber dieses Systems übergehen (§ 16 Abs. 2 Batterienverordnung).

4.1.3 Ausblick

Schwachstellen führen zu EU-Verordnung

Die oben erwähnte Evaluierung der europäischen Batterierichtlinie hat einige Schwachstellen der Richtlinie offenbart. Diese gewinnen im Hinblick auf den stetigen Markthochlauf der Elektromobilität auch in Europa zudem zunehmend an Bedeutung. Am 10. Dezember 2020 legte die EU-Kommission ihren Entwurf für eine neue EU-Batterieverordnung (COM (2020) 798 final, EK, 2020) vor. Der Umstieg von einer Richtlinie zur Verordnung wird damit begründet, dass eine Verordnung nicht erst in nationale Gesetzgebungen umgesetzt werden muss, sondern unmittelbar in jedem Mitgliedstaat gilt. Auch erwartet man sich dadurch einen höheren Grad der Harmonisierung zwischen den Mitgliedstaaten. Der aktuelle Stand ist die Verabschiedung der gemeinsamen Ratsposition der EU-Umweltminister am 17. März 2022, woraufhin am 20. April 2022 die Trilog-Verhandlungen gestartet sind. Diese dauern zum Zeitpunkt der Finalisierung des gegenständlichen Berichts noch an.

Änderungen durch die Verordnung

Die neue EU-Batterieverordnung wird umfangreiche Änderungen im Bereich des Inverkehrbringens, des Handlings, der Kennzeichnung und der Rücknahme von Batterien und Akkumulatoren in den Ländern der Europäischen Union mit

sich bringen. Die Änderungen werden teilweise sofort ab Inkrafttreten der neuen EU-Verordnung gelten. Zusätzlich sind stufenweise Übergangsfristen bis 2035 vorgesehen. Die wichtigsten geplanten Änderungen werden nachfolgend aufgelistet.

- | | |
|----------------------------------|--|
| Kategorie LMT | <ul style="list-style-type: none"> • Einführung neuer Kategorien: Neben den Kategorien der Gerätebatterien, Starterbatterien und Industriebatterien wird die Kategorie der Traktionsbatterien für elektrische Straßenfahrzeuge eingeführt; im Schienen- und Flugverkehr sowie in der Schifffahrt eingesetzte Batterien sind weiterhin als Industriebatterien definiert. Hinzu kommt auf Wunsch des EU-Parlaments die Kategorie der „Batterie für leichte Verkehrsmittel“ (engl: Batteries for light means of transport, kurz: LMT). Gerätebatterien haben dabei Gewichtsgrenze von maximal 5 kg, LMT von maximal 25 kg. |
| schrittweise Verschärfung | <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung und Ausweisung des CO₂-Fußabdrucks: Die EU strebt eine Senkung der Emissionen an und sieht daher die Einführung eines CO₂-Fußabdrucks als Beitrag zur Verwirklichung des Ziels der Union, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Dies soll in drei Stufen erfolgen: <ul style="list-style-type: none"> • Ab 1. Juli 2024 benötigen die meisten Batterien eine Erklärung zu ihrem CO₂-Fußabdruck. • Ab 1. Januar 2026 müssen die Batterien eine Kennzeichnung tragen, die ihre CO₂-Intensität mit einer bestimmten Kategorie oder Leistungsklasse angibt. • Ab 1. Juli 2027 sollen (noch nicht festgelegte) Höchstwerte für den CO₂-Fußabdruck eingeführt werden. Für die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks soll ein eigenes IT-Tool entwickelt werden. |
| Mindestquoten | <ul style="list-style-type: none"> • Angabe und Verschreibung des Rezyklatgehalts: Der verpflichtende Einsatz von recycelten Rohstoffen, sogenannten Sekundärrohstoffen, soll dazu beitragen, die Kreislaufwirtschaft in der EU zu fördern, Rohstoffe ressourceneffizienter zu nutzen und die Rohstoffunabhängigkeit der EU zu fördern. Während ab 2025 der Rezyklatgehalt, also der Anteil wiederverwendeter Rohstoffe, lediglich angegeben werden muss, treten ab 2030 Mindestquoten ein, die bis 2035 ansteigen. Diese Quoten gelten für Kobalt (12 % bis 20 %), Blei (85 %), Lithium (4 % bis 10 %) und Nickel (4 % bis 12 %). |
| schrittweise Anhebung | <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Sammelquoten: Das Ziel der Kommission ist es, die derzeitige Sammelquote für Gerätealtbatterien von 45 % (gültig bis zum 31. Dezember 2023) auf 65 % bis 31. Dezember 2025 und auf 70 % bis 31. Dezember 2030 zu erhöhen. Für Gerätealtbatterien und LMT-Batterien werden die Inkrafttretenszeitpunkte und die Quoten noch zwischen EU-Kommission und EU-Parlament diskutiert. |
| Lieferketten-transparenz | <ul style="list-style-type: none"> • Elektronisches Informationsaustauschsystem und Batteriepass: Damit soll die Verfolgung und Rückverfolgung von Batterien ermöglicht und Informationen über die CO₂-Intensität ihrer Fertigungsverfahren sowie über die Herkunft der verwendeten Materialien, ihre Zusammensetzung (einschließlich der Rohstoffe, gefährlicher Chemikalien und ähnlichem) bereitgestellt werden. Übergeordnetes Ziel ist es, die Transparenz entlang der Liefer- und Wertschöpfungsketten zu erhöhen. |

weitere Inhalte Weitere Aspekte der neuen EU-Batterienverordnung betreffen Mindestanforderungen an Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit, Vereinfachungen hinsichtlich Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Gerätebatterien, Kennzeichnungspflichten sowie die verpflichtende Einführung von Batteriemanagementsystemen mit Informationen zum Alterungszustand und zur voraussichtlichen Lebensdauer.

Mindestkapazitäten für Traktionsbatterien In dem am 10. November 2022 veröffentlichten Verordnungsvorschlag zur Einführung der neuen Abgasemissionsnorm Euro 7 (COM (2022) 586 final) und dessen Anhängen werden auch Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge thematisiert (EK, 2022). Hier wird festgehalten, dass Traktionsbatterien für vollelektrische und extern aufladbare Hybridfahrzeuge der Kategorie Personenkraftwagen nach fünf Jahren oder 100 000 Kilometern Fahrleistung (je nachdem, was früher eintritt) noch eine Mindestkapazität von 80 % aufweisen müssen. Nach acht Jahren oder 160 000 Kilometern Fahrleistung müssen noch 70 % Kapazität vorhanden sein. Für leichte Nutzfahrzeuge gelten geringfügig niedrigere Mindestquoten von 75 % bzw. 65 %. Diese Vorgaben haben zwar keinen direkten Bezug zum Batterierecycling, reduzieren aber durch die längere Nutzungsdauer die Notwendigkeit für den Einsatz von Primär- und auch Sekundärrohstoffen.

4.2 Recycling von Batterien und Akkumulatoren in Österreich

Transkription eines **Interviews mit Frau Dr.ⁱⁿ Astrid Arnberger**, Projektmanagerin Forschung & Entwicklung bei der Saubermacher Dienstleistungs AG, vom Jänner 2023.

Bitte beschreiben Sie grob den Prozess des Recyclings von Akkumulatoren elektrisch betriebener Fahrzeuge, wenn diese am Ende ihrer Lebensdauer angelangt sind.

Der Recyclingprozess von Batterien sieht bei Saubermacher wie folgt aus: Saubermacher erhält Gerätebatterien z. B. von Abgabestellen an Supermärkten, welche unsortiert gesammelt wurden. Die Batterien werden dann sortiert, z. B. in Zellen aus Power tools, Batterien aus dem Hobby-Bastler-Bereich und einzelne Lithium-Ionen-Batterien.

Momentan ist es so, dass die Akkus nach der Sortierung in die thermische Verwertung gehen. Dort werden die Kunststoffe verbrannt, der Elektrolyt ausgetrieben und der Separator zerstört. Dieser Vorgang deaktiviert die Lithium-Ionen-Batterien und sie gehen weiter in die mechanische Aufbereitung, in welcher vier verschiedene Fraktionen hergestellt werden. Diese sind das Aktivmaterial – ein feines schwarzes Pulver aus der Kathoden- und Anoden-Beschichtung –, Aluminium-Kupfer Folien sowie eine Grobfraktion aus Aluminium und eine separate Eisenfraktion.

Eine Trennung der verschiedenen Stoffe bietet viele Vorteile. Deshalb wird nach Möglichkeit z. B. bei Fahrrad-Akkus zwischen Lithium-Eisen-Phosphat und Nicht-Lithium-

Eisen-Phosphat unterschieden. Die dafür notwendige Kennzeichnung der verschiedenen Kathodenmaterialien ist aber oftmals nicht vorhanden.

Lithium-Eisen-Phosphat wird oft beworben, weshalb teilweise eine Kennzeichnung vorhanden ist und eine Separierung daher vorgenommen werden kann. Dies ist auch unbedingt notwendig, da Lithium-Eisen-Phosphat in den nicht kobalthaltigen Fraktionen, wie z. B. in den metallischen Hüllen, ein Störstoff ist, mit dem man die Qualität des finalen Produktes verschlechtert. Daher ist es wichtig, dass die Sortenreinheit möglichst gegeben ist.

Recycling von E-PKW-Akkus bei Saubermacher:

- *Im ersten Schritt werden Batterien geöffnet. Die Gehäusedeckel (Akku-Hüllen) werden entfernt und recycelt.*
- *Weiterfolgend werden die Batterien entladen bzw. konkret tiefentladen. Dies ist ein sicherheitstechnischer Aspekt, denn Lithium-Ionen-Batterien sind im geladenen Zustand sehr reaktiv. Die Akku-Kapazität kann zwischen 0 % und 100 % betragen. Man kann sagen, dass sie meist mindestens 50 % Kapazität haben und daher eine Entladung erfolgen muss.*
- *Dann geht es weiter in die Demontage. Die ca. 600 kg schweren Batterien werden auf Modulebene auf durchschnittlich rund 20 kg demontiert. Der verbleibende Rest wird separiert und geht die einzelnen dafür vorgesehenen Recyclingwege. Das heißt, dass z. B. die Elektronik weitergeht zum Elektronikrecycling und Kunststoff zum Kunststoffrecycling.*
- *Im vierten Schritt gehen die Zellenpakete (Akku-Zelle) in den thermischen Prozess der Vorbehandlung. Der Elektrolyt mit dem Leitsalz wird thermisch vorbehandelt, um die organischen Lösungsmittel auszutreiben bzw. zu verbrennen. Die gesamten Bestandteile werden in der Abluftreinigung ausgeschieden.*
- *In der mechanischen Aufbereitung werden die Einzelbestandteile separiert und diese Zwischenprodukte werden direkt an die passenden Industriezweige weitergegeben.*

Zu welchem Grad wird ein Fahrakkumulator am Ende seiner Lebensdauer gegenwärtig recycelt? Welche (halb)metallischen Rohstoffe können wiedergewonnen werden?

Zwischen Können und Werden liegen hierbei Unterschiede. Technisch machbar ist wesentlich mehr, aber die Frage ist, ob es wirtschaftlich und ökologisch gesehen auch sinnvoll ist. Momentan recycelt wird:

- *Aluminium, Kupfer, Eisen, Nickel und alle edelmetallhaltigen Stoffe.*
- *Aktivmaterial: Hauptschwerpunkt ist Nickel und Kobalt.*
- *Das Recycling von Lithium ist technisch möglich, aber es ist ein sehr unedles Metall d. h. sehr komplex und aufwendig in der Rückgewinnung. Wenn man sich den Primärrohstoffpreis anschaut, kann der Sekundärrohstoffpreis nicht mithalten. Möchte man künftig Lithium rückgewinnen, so könnte man das über eine Lithium-Quote erreichen. In einer Batterie sind max. 1–2 % Lithium enthalten, welches aktuell nicht wiederverwendet wird. Durch die Einführung der Rückgewinnungsrate für Lithium in der neuen Batterieverordnung wird zukünftig Lithium auch recycelt.*

Kann dieser Prozess optimiert werden und wenn ja: wie?

Optimierungen gibt es immer. Wir befinden uns sozusagen am Anfang. Vorhanden ist Potenzial z. B. bei der Aufbereitungstechnik oder bei der Sortenreinheit. Außerdem kommt hinzu, dass sich die Batterien noch verändern. Man muss auch bedenken, dass Batterien aus dem Automotive-Bereich, die jetzt auf dem Markt kommen, erst in frühestens sieben bis zehn Jahren bei Saubermacher landen.

Momentan ist es eine rein manuelle Demontage, in den nächsten zehn bis 15 Jahren könnte dies schon anders sein. Wenn es größere Mengen an Batterien und auch mehrere einheitliche Systeme geben wird, ist eine Automatisierung wahrscheinlich. Es gibt viele Automatisierungsbereiche, die möglich sind, aber noch nicht umgesetzt wurden, weil es sich aus wirtschaftlicher Sicht bei den aktuell noch geringen Mengen nicht rentiert.

Mit welchem Energieaufwand ist das Recyceln von Fahrakkus verbunden?

Die Demontage ist hauptsächlich ein personeller Aufwand (und auch ein Akkuschrauber wird benötigt). Im Entlade- und Demontageschritt wird die Energie der Akkus zurückgewonnen und im eigenen Betriebsnetz genutzt.

Wie hoch ist der Anteil der Fahrakkumulatoren, der heute schon recycelt wird?

Alle Akkus, die zu Saubermacher kommen, werden recycelt. Hierzu zählen auch Akkus aus dem Produktionsausschuss oder von Unfallwagen. Im Elektromobilitätsbereich gibt es aktuell noch sehr wenige, denn die meisten Fahrzeuge haben ihr Lebensende noch nicht erreicht.

Werden Batterien in andere Länder transportiert und verbrannt (z. B. illegale Verschiffung nach Afrika)?

Momentan ist das bei Batterien noch kein Thema, zukünftig vielleicht schon. Dies ist aber auch ein sicherheitstechnisches Thema, denn Elektronikschrott geht nicht so leicht in Flammen auf wie eine Lithium-Ionen-Batterie, die unsachgemäß bzw. illegal transportiert wird.

Warum werden nicht 100 % des verfügbaren Materials recycelt und was passiert mit dem Rest?

Metalle werden schon weitestgehend 90–95 % recycelt:

- *Kupfer, Eisen, Aluminium, wenn sie als Metall vorliegen, werden in Sekundärhütten wieder in den Kreislauf rückgeführt. Aluminium zu einem großen Anteil recycelt, wobei es hier sehr wichtig ist, ein gewisses Temperaturfenster beim Recyclingprozess einzuhalten.*
- *Dies gilt ebenfalls für Nickel und Kobalt, da dies sehr hochwertige Metalle sind.*

Bei Metallen können Recyclingquoten von 90–95 % erzielt werden. Auf die gesamte Batterie umgelegt liegen wir bei rund 70 %.

Ein Recycling von Lithium ist grundsätzlich machbar. Die industriellen Prozesse hierzu sind bereits in der Planung. Jedoch wird es Verluste im Zuge der Aufbereitung immer geben. Grundsätzlich liegt es immer an der Berechnungsmethodik, wie hoch dann die jeweilige Quote ist.

Weiters gelangen organische Lösungsmittel sowie Elektrolyt und Separator in die thermische Verbrennung.

Wie kann man sicherstellen, dass der Anteil recycelter Fahrakkus in den kommenden Jahrzehnten auf annähernd 100 % steigt?

Aufgrund der großen Vielfalt an Akkus und der Tatsache, dass man nicht weiß, was in Zukunft noch kommen wird, ist die Frage sehr schwierig zu beantworten. Man braucht einen Aufbereitungsschritt, der möglichst universell ist. Saubermacher ist der Meinung, dass die thermische Vorbehandlung der beste Verwertungsschritt ist.

Solange es keinen Standard gibt, der festlegt, dass Lithium-Ionen-Batterien ähnlich ausschauen müssen oder es einheitliche Aufbereitungsschienen gibt, muss man einen möglichst universellen Behandlungsschritt haben.

Welche Materialmengen könnten in den Jahren 2030, 2040 und 2050 im Optimalfall recycelt werden?

Ein eigener Ofen für die thermische Verbrennung rentiert sich ab einer Menge von 10 000 Tonnen Akkus pro Jahr, da die dafür benötigte Abluftreinigung sehr kostenintensiv ist. Momentan werden diese Kapazitäten noch fremd vergeben. Kapazitäten zur Entladung und zur Demontage von Batterien sowie zur mechanischen Aufbereitung werden in den nächsten Jahren ausgebaut. Derzeit sind die Rücklaufmengen von Akkumulatoren aus elektrisch betriebenen Fahrzeugen noch zu gering.

Was sind die wichtigsten (technischen, organisatorischen, regulativen etc.) Maßnahmen, um ein konsequentes Recycling in den kommenden Jahrzehnten zu gewährleisten?

Eine Recycling-Quote für die einzelnen Metalle ist eine wichtige Maßnahme sowie ein enger Austausch mit der Forschung. Dies ist besonders wichtig, um zukünftige Veränderungen abschätzen zu können, damit Anlagen früh genug ausgebaut oder adaptiert werden können. Das hängt auch mit sicherheitstechnischen Aspekten zusammen, denn es wird versucht, die Energiedichte in der Batterie zu erhöhen. Dabei gilt: je höher die Energiedichte, umso reaktiver der Akku, wobei man hier klar festhalten muss, dass dies im Gebrauch aber nicht gefährlich ist.

Welche Auswirkung hätte eine Änderung der chemischen Zusammensetzung des Akkus bzw. der eingesetzten Technologie (z. B. Festkörperbatterie) auf den Recyclingprozess?

Da es derzeit eine Vielfalt an Möglichkeiten gibt, kann man noch nicht genau sagen, in welche Richtung es geht. Die Frage ist aber: Wenn Feststoff-Elektrolyten kommen,

inwieweit eine mechanische Aufbereitung ohne thermische Vorbereitung, wie es Saubermacher aktuell macht, möglich ist.

Was sind aus Ihrer Sicht die größten Herausforderungen bei der Nachnutzung von Fahrakkumulatoren? Welche Lösungsansätze sehen Sie?

- Die Kennzeichnungspflicht der Akkus, denn dadurch kann Saubermacher bessere Qualitäten erzielen, z. B. durch eine Unterscheidung zwischen nickel-reich oder kobaltreich. Ein Lösungsansatz wäre es, diese Informationen über einen Barcode auszulesen;
- Den Demontageschritt verbessern, um die Kunststoffrückgewinnung zu erhöhen, sodass Kunststoffe nicht in der thermischen Behandlung verbrannt werden;
- Eine Vereinfachung der Entladetechnik bei Automotive-Akkus durch Entladen über eine Steckverbindung. Von den OEM ist dies aber nicht gewünscht, da es Missbrauchsmöglichkeiten bringt, weshalb Saubermacher aktuell mit Hochvolt-Expert:innen die Akkus tiefentladen muss;
- Bei Fahrradakkus ist der Entladeschritt schwer wirtschaftlich darstellbar, aber auch hier bauen wir nachhaltige Kooperationen auf.

Was sind aus Ihrer Sicht die (drei) größten Herausforderungen beim Recycling von Fahrakkus? Welche Lösungsansätze sehen Sie?

Grundsätzlich gilt: Je länger die Nutzungsdauer, desto besser ist es für die Ökobilanz. Ein Beispiel hierfür wäre die Nachnutzung einer Traktionsbatterie für E-PKW. Hier spielt immer die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eine große Rolle. Wenn man eine Batterie in einem E-PKW wiedereinsetzen möchte, ist für die Kundschaft die Frage der Reichweite gegeben. Das ist wiederum im stationären Bereich, z. B. bei einem Einfamilienhaus, anders. Hier spielen der Platzverbrauch und das Gewicht nur eine untergeordnete Rolle, man bräuchte eben gegebenenfalls mehrere Batterien, um eine gewisse Kapazität sicherzustellen.

Große Herausforderungen bzw. Lösungsansätze bei der Nachnutzung sind aus meiner Sicht:

- *ein verpflichtender Re-Use-Anteil für Akkumulatoren;*
- *ein Testing-Gerät, um herauszufinden, wie gut die Batterie noch ist. Dies ist jedoch zeit- und kostenaufwendig. Bei Betrachtung der Preisentwicklung sieht man, dass der Batteriepreis sinkt und hier kann dann auch die Second-Use-Batterie nicht mithalten;*
- *Kriterien für OEM: Man sollte leichter den Ist-Zustand von Batterien erfassen können. Grundsätzlich werden viele Daten in der Batterie erhoben, diese sind aber nur für die OEMs zugänglich und nicht für andere, wie z. B. Saubermacher;*
- *Das Batteriemanagementsystem kann oftmals nicht weiterverwendet werden, weil es die OEMs nicht freigeben. Dadurch muss ein neues Batteriemanagementsystem implementiert werden, wodurch hohe Kosten entstehen. Wenn dasselbe OEM den Akku wiederverwendet, ist es natürlich kostengünstiger.*

Die neue Batterieverordnung der Europäischen Union wird gegenwärtig final verhandelt (vgl. 4.1.3). Was sind aus Ihrer Sicht die vielversprechendsten Neuerungen?

Die neue Batterieverordnung regelt eine Vielzahl von Bereichen über den gesamten Lebenszyklus der Batterie. Dies zeigt sich auch im Umfang des Dokumentes mit stolzen 130 Seiten plus 28 Seiten Annex. Die aktuelle Batterierichtlinie ist 15 Seiten stark.

Für die Abfallwirtschaft besonders hervorzuheben sind die diversen Quotenvorgaben. Beispielsweise soll die Sammelquote von aktuell 45 % bei Gerätebatterien in 2025 auf 65 % und in 2030 auf 70 % angehoben werden. In den letzten Jahren ist der Li-Batterien-Anteil sowohl in der in Verkehr gesetzten Menge als auch in den gesammelten Mengen stetig gestiegen. Jede Li-Batterie, die nicht ordnungsgemäß entsorgt wird, erhöht das Brandrisiko bei den Entsorgungs- und Recyclingbetrieben. Um die richtige Mülltrennung zu stärken und Fehlwürfe zu reduzieren, wäre aus Branchensicht ein Pfandsystem auf Li-Batterien dienlich gewesen.

Eine weitere wesentliche Veränderung ist, dass für Lithiumbatterien zukünftig eine eigene Recyclingeffizienz (RE) vorgeschrieben wird. Bisher ordnete man die Lithium-Ionen-Batterien den sonstigen Batterien mit einer RE von 50 % zu. Mit der neuen Batterieverordnung werden RE von 65 % (2025) und 70 % (2030) vorgeschrieben.

Die Berechnung der RE wird in der Recyclingeffizienzverordnung geregelt. Diese soll ebenfalls überarbeitet werden, jedoch erst 1–2 Jahre später. Dies sehe ich als bedenklich an. Denn für Recycler ist es derzeit unklar, wie die RE zukünftig berechnet wird. Dadurch entsteht ein Investitionsrisiko für Neuanlagen. Aktuell werden in der RE-Verordnung Stoffe als stofflich recycelt angesehen, wenn sie das Abfallrecht verlassen und ins Chemikalienrecht (REACH) übergeführt werden. Da es kaum Abfalldeverordnungen gibt, wird dieser Punkt länderspezifisch geregelt. In letzter Konsequenz führt dies dazu, dass bei gleichem Recyclingverfahren je nach Land die RE unterschiedlich berechnet werden.

Eine besondere Neuerung ist die Rückgewinnungsrate auf Elementebene. Hier wird erstmalig ein gezieltes Recycling von spezifischen Elementen vorgeschrieben. Aufgrund ihrer hohen Wertigkeit wurde beim Recycling bereits früh ein Fokus auf Co und Ni gelegt. Li war aufgrund der geringen Wertigkeit, des unedlen Charakters sowie des geringen Anteils in der Batterie für die RE nicht relevant. Dies ändert sich nun durch die Einführung der Rückgewinnungsrate von Li mit 35 % (2025) und 70 % (2030). Ebenso gibt es Rückgewinnungsraten für Co und Ni mit 90 % (2025) und 95 % (2030). Die Berechnung dieser Rückgewinnungsraten über eine Vielzahl an Recyclingschritten und eventuell auch Unternehmen wird eine große Herausforderung darstellen. Eine wesentliche Problematik ist, dass das Inputmaterial sehr heterogen ist und dass man die Zusammensetzung kaum quantitativ ausreichend genau bestimmen kann. Die Nachweisführung zu den Rückgewinnungsraten ist meiner Meinung nach noch offen. Ein praxistauglicher Leitfaden könnte hier Abhilfe schaffen.

Eine weitere Neuerung ist der Recyclatgehalt. Die Mindestquoten steigen von 2030 bis 2035 für Kobalt von 12 % auf 20 %, Lithium von 4 % auf 10 % und Nickel von 4 % auf 12 %. Für die Abfallwirtschaft bzw. Batterierecycler ist dies eine der wesentlichsten Änderungen, da sie auf die Recycler einen sehr großen Einfluss hat und zu einer Veränderung des Marktes führen wird. Für den Hersteller von Batterien besteht

durch diese Regelung ein hohes Interesse, dass die Rohstoffe, die in den Abfällen (Produktionsabfälle, Altbatterien) stecken, wieder in die Produktion von neuen Batterien zurückfließen. Um dies zu ermöglichen, müssen hochreine Ausgangsstoffe für die Kathodenproduktion hergestellt werden. Früher deckten Batterierecycler oft nur einzelne Teilbereiche des gesamten Recyclingvorganges ab. Um dem Kunden zukünftig „sein“ Li, Ni, Co wieder rückliefern zu können, muss der Batterierecycler den gesamten Aufbereitungsprozess bis zu batteriegrade Stoffen anbieten. Dies werden nur wenige Großunternehmen darstellen können. Ebenso ist es derzeit fraglich, ob zum Zeitpunkt 2030/2035 ausreichende Mengen an recyceltem Co, Ni und Li in Europa zur Verfügung stehen werden. Persönlich gehe ich davon aus, dass Sekundärlithium zukünftig höher gehandelt wird als Primärlithium. Diese These führe ich darauf zurück, dass aktuell Li kaum bzw. nicht recycelt wird und daher sich auch bis jetzt kein Sekundärlithium im Kreislauf befindet.

Weitere Regelungen, wie die neuen Batteriekategorien, die Ausweisung des CO₂-Fußabdruckes, der Batteriepass sowie Mindestanforderungen an die Haltbarkeit, sind ebenfalls wesentliche Neuerungen.

Wird die neue EU- Batterieverordnung das Recycling tatsächlich nennenswert fördern? Welche Wünsche hätten Sie noch an die neue VO?

Die neue Batterieverordnung ist sicherlich ein wesentlicher Erfolg für die Kreislaufwirtschaft. Um sämtliche Anforderungen nachweisen zu können, steigt der administrative Aufwand sehr stark an – ohne eine höhere Wertschöpfung für das jeweilige Unternehmen zu schaffen. Für kleinere Betriebe wird es so immer schwieriger, gegenüber großen Unternehmen konkurrenzfähig zu sein. Gleichzeitig wird es sich zeigen, wie diese Vielzahl an Anforderungen zukünftig geprüft werden.

5 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Volumetrische und gravimetrische Energiedichten etablierter und zukünftiger Materialsysteme unterschiedlicher Akkumulatorentechnologien.....	11
Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Li-Ionen-Zelle mit einer Lithium-Cobalt-Oxid (LCO)-Verbindung.....	12
Abbildung 3: Kostenentwicklung von LI-Ionen-Akkus in USD je kWh.	14
Abbildung 4: Massenbestandteile eines NMC-111-Akkumulators, aufgeteilt nach den Rohstoffen in den Bauteilen: Batteriegehäuse, Modulgehäuse, Kathode, Anode, Zellgehäuse und Elektrolyt bzw. Separator.	15
Abbildung 5: Globale Nachfrage nach Lithium-Ionen-Akkumulatoren nach Anwendung.....	17
Abbildung 6: Erwartete Verteilung der Akkumulatoren-Technologien im Automobil-Bereich bis 2030.	18
Abbildung 7: SOH als Funktion von FEC (Full Equivalent Cycles) in Abhängigkeit von der Außentemperatur.....	20
Abbildung 8: Lebensdauerabschnitte eines Lithium-Ionen-Akkumulators.....	23
Abbildung 9: Nissan Reborn Light	28
Abbildung 10: Photovoltaik-Anlage auf Porto Santo.	29
Abbildung 11: Grundoperationen und Prozesswege des Li-Ionen-Recyclings .	31

6 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Derzeitige Kathodenmaterialien für Lithium- Ionen-Akkumulatoren im Automobilbereich (Meyer et al., 2019)	13
Tabelle 2:	Vergleich der wesentlichen Eigenschaften verschiedener Verbindungen von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Rahimzei, Sann und Vogel, 2015).....	13
Tabelle 3:	Auflistung der Rohstoffe nach Massenprozent eines NMC-111-Akkumulators (Thomas et al., 2018).	15
Tabelle 4:	Auflistung der Garantiebedingungen auf Akkumulatoren ausgesuchter Fahrzeugmodelle (ADAC, 2022).	21

7 LITERATUR

- ADAC, 2022. *Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/>
- AZEVEDO, M., N. CAMPAGNOL, T. HAGENBRUCH, K. HOFFMAN, A. LALA und O. RAMSBOTTOM, 2018. *Lithium and cobalt – a tale of two commodities* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/lithium%20and%20cobalt%20a%20tale%20of%20two%20commodities/lithium-and-cobalt-a-tale-of-two-commodities.ashx>
- BERNHART, W., 2019. *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien im Kontext von Technologie- und Preisentwicklungen* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/recycling-von-lithium-ionen-batterien-im-kontext-von-technologie-und-preisentwicklungen/16486674>
- BGBL. I NR. 102/2002 IDF. BGBL. I NR. 200/2021. *Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft. Abfallwirtschaftsgesetz* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086>
- BGBL. II NR. 159/2008 IDF. BGBL. II NR. 311/2021. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von Altbatterien und – Akkumulatoren. Batterienverordnung.*
- BOLLI, P., 2022. *Tesla Batterie: Unterschiede der verschiedenen Akkus* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://teslawissen.ch/tesla-batterie-unterschiede-der-verschiedenen-akkus/#m3my>
- BUCHMEISER, M.R., 2014. *Wiederladbare Batterien: Möglichkeiten und Grenzen* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://analyticalscience.wiley.com/doi/10.1002/gitfach.11559/full/>
- CANALS CASALS, L. und B.A. GARCÍA, 2016. *Assessing Electric Vehicles Battery Second Life Remanufacture and Management*, 6, S. 77-98 [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/306004593_Assessing_Electric_Vehicles_Battery_Second_Life_Remanufacture_and_Management
- CANALS CASALS, L., B.A. GARCÍA und C. CANAL, 2019. *Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis* [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/329267992_Second_life_batteries_lifespan_Rest_of_useful_life_and_environmental_analysis

- CONTEXT CREW, 2019. „*Smart Fossil Free Island*“: *E-Mobilität soll ein stabiles regeneratives Energiesystem stützen* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.contextcrew.de/smart-fossil-free-island-e-mobilitaet-soll-ein-stabiles-regeneratives-energiesystem-stuetzen/>
- DER STANDARD, 2018. *Tesla-Akkus halten offenbar länger als gedacht* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.derstandard.at/story/2000078091342/tesla-akkus-halten-offenbar-laenger-als-gedacht>
- DESHWAL, D., P. SANGWAN und N. DAHIYA, 2022. Economic Analysis of Lithium Ion Battery Recycling in India [online]. *Wireless Personal Communications*, 124(2). *Wireless Personal Communications* [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/357887808_Economic_Analysis_of_Lithium_Ion_Battery_Recycling_in_India
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 43539-4:1980-12, *Blei-Akkumulatoren; Prüfungen, Ortsfeste Zellen und Batterien*.
- EK, 2006. *Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatormotoren sowie Altbatterien und Alt-Akkumulatormotoren*. RL 2006/66/EG.
- EK, 2012. *Verordnung 493/2012 der Kommission vom 11. Juni 2012 mit Durchführungsbestimmungen zur Berechnung der Recyclingeffizienzen von Recycling-verfahren für Altbatterien und AltAkkumulatormotoren gemäß der Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*. VO 493/2012/EU.
- EK, 2018. *Richtlinie 2018/849/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge, der Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren sowie der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Text von Bedeutung für den EWR)*. RL 2018/849/EU [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0849&from=DE>
- EK, 2019. *Comission Staff Working Document on the evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC. SWD (2019) 1300 final* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/batteries/evaluation_report_batteries_directive.pdf
- EK, 2020. *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020. COM (2020) 798 final* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF

- EK, 2022. *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Emissionen und der Dauerhaltbarkeit von Batterien (Euro 7) und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009. COM (2022) 586 final* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9a25dc0b-60db-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF
- ELEKTRONIK-KOMPENDIUM.DE. *Lithium-Ionen-Akkus* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0810281.htm>
- ENKHARDT, S., 2019. *Porto Santo: Auf dem Weg zur ersten „smart fossil free island“ in Europa* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/2019/05/24/porto-santo-auf-dem-weg-zur-ersten-smart-fossil-free-island-in-europa/>
- FISCHHABER, S., A. REGETT, S. SCHUSTER und H. HESSE, 2016. *Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen*. Ergebnispapier Nr. 18.
- FISCHHABER, S., A. REGETT, S.F. SCHUSTER und H. HESSE. *Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen* [online]. Ergebnispapier Nr. 18 [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/294086022_Second-Life-Konzepte_fur_Lithium-Ionen-Batterien_aus_Elektrofahrzeugen
- HAMMERSCHIDT, C., 2018. *Second life for traction batteries in Amsterdam football arena* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.eenewseurope.com/en/second-life-for-traction-batteries-in-amsterdam-football-arena/>
- HANISCH, C., W. HASELRIEDER und A. KWADE, 2012. *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien - das Projekt LithoRec* [online]. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Goldmann, Daniel. Recycling und Rohstoffe. 5. ISBN 978-3-935317-81-8 [Zugriff am: 16. Januar 2023]. Verfügbar unter: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR5/2012_RuR_691_698_Kwade.pdf
- KÖLLNER, C., 2019. *Ist Second Life besser als direktes Akku-Recycling?* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/batterie/recycling/ist-second-life-besser-als-direktes-akku-recycling-/16512034>
- LUX RESEARCH, 2016. *Reuse or Recycle: The Billion-Dollar Battery Question* [online] [Zugriff am: 16. März 2021]. Verfügbar unter: <https://members.luxresearchinc.com/research/report/21100>

- MEYER, K., H. HELMS, C. KÄMPER, K. BIEMANN, U. LAMBRECHT und J. JÖHRENS, 2019. *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf
- NISSAN INSIDER, 2016. *Second life LEAF batteries to power Amsterdam Arena* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://nissaninsider.co.uk/second-life-leaf-batteries-to-power-amsterdam-arena/>
- NISSAN, 2019. *The Reborn Light* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.nissan.co.jp/THEREBORNLIGHT/EN/>
- PAGLIARO, M. und F. MENEGUZZO, 2019. *Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight* [online]. *Heliyon*, 5(6), e01866. Heliyon [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019347012>
- PLUTA, W., 2018. *Reborn Light* [online]. *Nissan-Autoakkus speisen Straßenlaternen* [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.golem.de/news/reborn-light-nissan-autoakkus-speisen-strassenlaternen-1803-133497.html>
- POWERSVAULT, 2019. *Powervault3eco* [online]. *The green and economic Energy Storage System for the smart home* [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://www.powervault.co.uk/wp-content/uploads/2019/04/Powervault3-Eco_TechSpecs-A5x2_v7.pdf
- RAHIMZEI, E., K. SANN und M. VOGEL, 2015. Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen.
- SHUKLA, P.R., J. SKEA, A. REISINGER, R. SLADE, R. FRADERA, M. PATHAK, A. AL KHOURDAJIE, M. BELKACEMI, R. VAN DIEMEN, A. HASIJA, G. LISBOA, S. LUZ, J. MALLEY, D. MCCOLLUM, S. SOME und P. VYAS, 2022. *Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. New York, USA [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf
- SPLITTHOFF, L., P.R. SHEARING und O.S. BURHEIM, 2021. *Temperature, Ageing and Thermal Management of Lithium-Ion Batteries* [online]. *Energies*, 14(5), 1248. *Energies* [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1248>
- THOMAS, M., L.A.-W. ELLINGSEN, C.R. HUNG und A.H. STROMANN, 2018. *Research for TRAN, Committee-Battery-powered electric vehicles: market development and life cycle emissions* [online] [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_S TU\(2018\)617457_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_S TU(2018)617457_EN.pdf)

- UMWELTBUNDESAMT, 2021. *Die Ökobilanz von Personenkraftwagen. Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-Reduktionspotential und Energieeinsparung* [online]. Wien. Reports. REP-0763 [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0763.pdf>
- UMWELTBUNDESAMT, 2022a. *Austria's Annual Greenhouse Gas Inventory 1990-2020. Submission under Regulation (EU) No 525/2013* [online]. Wien. Reports. REP-0798 [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0798.pdf>
- UMWELTBUNDESAMT, 2022b. *Die Ökobilanz von schweren Nutzfahrzeugen und Bussen. Bewertung ausgesuchter Anwendungsfälle alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich Reduktionspotenzial von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch* [online]. Wien. Reports. REP-0801 [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0801.pdf>
- UMWELTBUNDESAMT, 2022c. *Rohstoffe der Elektromobilität. Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten von Elektrofahrzeugen*. Wien. Reports.
- VDE, 2021. *Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen* [online]. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. Frankfurt am Main. Verfügbar unter:
<https://www.dke.de/resource/blob/933404/0fe46d3ca210956dec28adb0048d424b/kompendium-li-io-batterien-2022-de-data.pdf>
- WANGDA, L., E.M. ERICKSON und A. MANTHIRAM, 2020. *High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries* [online]. *Nature Energy*, **5**(1). Nature Energy [Zugriff am: 3. Dezember 2022]. Verfügbar unter:
https://www.researchgate.net/publication/338561968_High-nickel_layered_oxide_cathodes_for_lithium-based_automotive_batteries

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich

Tel.: +43-(0)1-313 04

office@umweltbundesamt.at
www.umweltbundesamt.at

Viele Rohstoffe für elektrisch betriebene Fahrzeuge sind begrenzt und schwer verfügbar. Zudem werden sie oft unter sozial und ökologisch kritischen Bedingungen gewonnen. Nachnutzung und Recycling von E-Fahrzeug-Batterien bieten die Chance, die Nachfrage nach Primärrohstoffen deutlich zu reduzieren und so ihre Ressourceneffizienz zu steigern. Die Studie liefert einen Überblick über technische Potentiale, Hürden und rechtliche Vorgaben dafür.

Analysiert werden Einsatzmöglichkeiten für gebrauchte Batterien als stationärer Energiespeicher, für elektrische Infrastruktur oder mobile Anwendungen, vom Lkw bis hin zum Hausroboter. Beim Batterierecycling zeigt sich, dass bis zu 99 % der Rohstoffe und Bestandteile wiederverwertet werden können. Beide Optionen tragen dazu bei, Ressourcen für den Ausbau der Elektromobilität zu schonen und nachhaltig zu nutzen.