

Rohstoffe der Elektromobilität

Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und
möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten
von Elektrofahrzeugen



ROHSTOFFE DER ELEKTROMOBILITÄT

*Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und
möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten
von Elektrofahrzeugen*

David Fritz
Holger Heinfellner
Stefan Lambert

REPORT
REP-0850

WIEN 2023

Projektleitung Holger Heinfellner

Autor:innen David Fritz
Holger Heinfellner
Stefan Lambert

Lektorat Ira Mollay

Layout Doris Weismayr, Sarah Perfler

Umschlagfoto © gui yong nian - Fotolia.com

Auftraggeber Diese Publikation wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Abteilung II/1 – Mobilitätswende, erstellt.

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 978-3-99004-680-7

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	6
SUMMARY	8
1 WARUM ELEKTROMOBILITÄT?	10
2 ROHSTOFFE DER (ELEKTRO-)MOBILITÄT	12
2.1 Lithium-Ionen-Akkumulator	14
2.2 Brennstoffzelle und H₂-Speicher	18
2.2.1 Brennstoffzelle	18
2.2.2 Wasserstoffspeicher	18
2.3 Elektromotor	19
2.4 Welche Elemente sind kritisch?	19
3 KRITIKALITÄTSANALYSE	21
4 BLICK IN DIE ZUKUNFT	23
4.1 Zukünftige Verfügbarkeit von Rohstoffen	23
4.1.1 Einfluss von Recycling auf die Verfügbarkeit	24
4.2 Versorgungsrisiko und Nachfrageintensitäten verschiedener Rohstoffe für die wesentlichen Bauteile der Elektromobilität entlang der Herstellungskette	25
4.2.1 Lithium-Ionen-Akku	25
4.2.2 Brennstoffzelle	31
4.2.3 Elektromotor	34
5 AUSGEWÄHLTE KRITISCHE ROHSTOFFE DER ELEKTROMOBILITÄT ...	39
5.1 Lithium	39
5.1.1 Vorkommen und Herstellung	39
5.1.2 Anwendungsbereiche	40
5.1.3 Soziale und ökologische Herausforderungen	41
5.2 Kobalt	42
5.2.1 Vorkommen	42
5.2.2 Herstellung und Aufbereitung	43
5.2.1 Anwendungsbereiche	44
5.2.2 Soziale und ökologische Herausforderungen	45
5.3 PGM	46
5.3.1 Vorkommen und Herstellung	46

5.3.2	Anwendungsbereiche	48
5.3.3	Soziale und ökologische Herausforderungen.....	48
5.4	(Natürlicher) Grafit	49
5.4.1	Vorkommen und Herstellung	49
5.4.2	Anwendungsbereiche	51
5.4.3	Soziale und ökologische Herausforderungen.....	52
5.5	Seltene Erden.....	52
5.5.1	Vorkommen und Herstellung	53
5.5.2	Anwendungsbereiche	54
5.5.3	Soziale und ökologische Herausforderungen.....	55
6	SCHLUSSFOLGERUNG	56
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	58
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	60
	TABELLENVERZEICHNIS	62

ZUSAMMENFASSUNG

Elektrisch betriebene Fahrzeuge fahren lokal emissionsfrei, können bei Einsatz erneuerbarer Energien vergleichsweise klimafreundlich betrieben werden und stellen somit eine wesentliche Säule des zukünftigen Gesamtverkehrssystems dar. Bis 2050 ist mit einer starken Zunahme an elektrisch betriebenen Fahrzeugen über alle Kategorien zu rechnen. Geopolitische Entwicklungen könnten jedoch an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungsketten dämpfend auf den Hochlauf der Elektromobilität wirken.

Über die auch in konventionell angetriebenen Fahrzeugen eingesetzten Rohstoffe und deren Mengen hinaus werden bei Elektrofahrzeugen Komponenten verbaut, die zusätzliche Rohstoffe oder größere Mengen davon erfordern. Diese Komponenten sind:

- der Lithium-Ionen-Akkumulator, für dessen Herstellung zumeist relevante Mengen an **Lithium, Kobalt, Mangan** oder **Nickel** erforderlich sind,
- Wasserstoffspeicher und Brennstoffzelle, für die zusätzlich Elemente der **Platinmetallgruppe** und **Grafit** von Bedeutung sind, sowie
- der Elektromotor, für den meist relevante Mengen an **Seltenerdoxiden** erforderlich sind.

Die Frage, ob ein Rohstoff als kritisch eingestuft wird, wird anhand verschiedener Kriterien unterschiedlichen beurteilt. Wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungssicherheit stehen dabei im Zentrum, es kann jedoch auch kurzfristig zu disruptiven Änderungen kommen.

Gegenwärtig werden alle der oben genannten Rohstoffe als kritisch eingestuft, vor allem wegen der stark steigenden Nachfrage. Die höchsten erwarteten Nachfragesteigerungen bis 2050 finden sich bei

- Lithium (bis zu 56-mal mehr als heute),
- natürlichem Grafit (15-mal) und
- Kobalt (14-mal).

55 % der globalen Minenproduktion von **Lithium** entfielen 2021 auf Australien, 26 % auf Chile und 14 % auf China. Die geschätzte globale Reserve befindet sich zu 42 % in Chile, ist derzeit jedoch noch nicht wirtschaftlich förderbar. Durch den verstärkten Einsatz in Akkumulatoren hat sich der Einsatz von Lithium von 2005 bis 2020 fast verfünffacht. Das Absinken des Grundwasserspiegels durch die Rohstoffgewinnung führt zu signifikanten ökologischen und sozialen Herausforderungen.

Durch den Einsatz in Akkumulatoren hat sich der weltweite Kobaltverbrauch seit der Jahrtausendwende etwa verdreifacht, vielerorts unter prekären Arbeitsbedingungen. Die globale Minenproduktion von **Kobalt** erfolgte 2021 zu 71 % in der Demokratischen Republik Kongo, wo auch knapp die Hälfte der derzeit wirtschaftlich abbaubaren weltweiten Reserven zu finden sind. Weitere große Mengen werden am Tiefseemeeresgrund vermutet, deren Förderung wäre aber mit erheblichen negativen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden.

90 % der Reserven und der Großteil der Minenproduktion der Edelmetalle (Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium und Platin) der **Platingruppe** (PGM) befinden sich in Südafrika. Die PGM-Ressourcen werden auf weitere 100 000 Tonnen geschätzt. Platin kommt vorwiegend in der Automobilindustrie zum Einsatz. Sein Abbau erfordert immense Materialbewegungen und einen hohen Bedarf an Strom, der in Südafrika größtenteils in Kohlekraftwerken produziert wird.

Natürlicher **Grafit** ist weltweit ausreichend vorhanden. China ist sowohl als Produzent wie auch als Konsument führend, dies vor allem in der Bauteilherstellung für Elektromobilität. Werden alle Umweltvorschriften eingehalten, so stellt der Grafitabbau keine Umweltgefahr dar.

Während die leichten **Seltenerdoxide** nur ein geringes Versorgungsrisiko bergen, sind schwere Seltenerdoxide in der E-Mobilität und vielen anderen High-tech-Anwendungen von hoher strategischer Bedeutung. Der größte Teil der Minenproduktion und weltweiten Reserven befindet sich in China. Der Abbau der Seltenerdoxide führt oft zu giftigen und radioaktiven Rückständen, die sich bei mangelhafter Lagerung auch negativ auf Flora und Fauna auswirken.

Konventionell angetriebene Fahrzeuge sind ebenso von endlichen Rohstoffen abhängig wie Elektrofahrzeuge. Bei ersteren führt insbesondere die Förderung des Rohöls zu signifikanten negativen ökologischen (z. B. Verschmutzungen, Ölkatastrophen) und sozialen (kriegerische Auseinandersetzungen) Auswirkungen. Aufgrund des Wegfalls des fossilen Kraftstoffs ist die erforderliche Menge eingesetzter endlicher Rohstoffe bei Elektrofahrzeugen in Summe schätzungsweise achtmal niedriger als bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen. In Elektrofahrzeugen kommen aber neue Rohstoffe zum Einsatz, die allesamt in mehrfacher Hinsicht als kritisch einzustufen sind. Deshalb erfordert der Einsatz dieser Rohstoffe spezielle Strategien und Aktivitäten entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wie etwa:

Dämpfung der Nachfrage nach Primärstoffen durch

- eine verringerte Anzahl überdies kleinerer Fahrzeugen infolge eines geänderten Mobilitätsverhaltens
- Maximierung von Recycling
- Vorstöße in Richtung Substitution kritischer Rohstoffe

Verbesserung von Umwelt- und Sozialbedingungen der Förderung durch

- Bergbau in Europa auf Basis hoher Umwelt- und Sozialstandards
- Allianzen für globale nachhaltige Rohstoffförderung
- unternehmerische Sorgfaltspflichten entlang der Wertschöpfungsketten

Das übergeordnete Ziel muss sein, Elektromobilität auf Basis hoher Umwelt- und Sozialstandards in der globalen Rohstoffförderung zu etablieren.

SUMMARY

Electrically powered vehicles drive with zero local emissions, can be operated in a comparatively climate-friendly manner when renewable energies are used, and thus represent an essential pillar of the future overall transportation system. A strong increase in electrically powered vehicles across all categories is expected by 2050. However, geopolitical developments could have a dampening effect on the ramp-up of electromobility at various points in the value chain.

In addition to the raw materials and their quantities used in conventionally powered vehicles, electric vehicles contain components that require additional raw materials or larger quantities of them. These components are:

- the lithium-ion accumulator, for the production of which relevant quantities of **lithium, cobalt, manganese** or **nickel** are usually required,
- hydrogen storage and fuel cells, for which elements of the **platinum metal group** and graphite are also important, and
- the electric motor, for which relevant quantities of **rare earth oxides** are usually required.

The question of whether a raw material is classified as critical is assessed differently on the basis of various criteria. Economic importance and security of supply are central, but disruptive changes can also occur in the short term.

Currently, all materials mentioned above are classified as critical, mainly because of the strong increase in demand. The highest expected increases in demand until 2050 are found for

- Lithium (up to 56 times more than today),
- natural graphite (15 times) and
- cobalt (14 times).

55% of global mine production of **lithium** in 2021 was in Australia, 26% in Chile, and 14% in China. Chile accounts for 42% of the estimated global reserve, but it is currently not economically recoverable. Due to increased use in rechargeable batteries, the use of lithium has increased almost fivefold from 2005 to 2020. The lowering of the groundwater table due to the extraction of raw materials leads to significant ecological and social challenges.

Through its use in rechargeable batteries, global cobalt consumption has roughly tripled since the turn of the millennium, in many places under precarious working conditions. In 2021, 71% of global mine production of **cobalt** took place in the Democratic Republic of the Congo, which is also home to just under half of the world's currently economically mineable reserves. Additional large quantities are believed to exist at the bottom of the deep ocean, but their extraction would have significant negative environmental impacts.

90% of the reserves and most of the mine production of the precious metals (ruthenium, rhodium, palladium, osmium, iridium and platinum) of the **Platinum Group** (PGM) are located in South Africa. PGM resources are estimated at

an additional 100,000 tons. Platinum is mainly used in the automotive industry. Its mining requires immense material movements and a high demand for electricity, which in South Africa is largely produced in coal-fired power plants.

Natural **graphite** is available in sufficient quantities worldwide. China is a leading producer and consumer, especially in the production of components for electric vehicles. If all environmental regulations are observed, graphite mining does not pose an environmental hazard.

While the light **rare earth oxides** pose only a low supply risk, heavy rare earth oxides are of high strategic importance in e-mobility and many other high-tech applications. Most of the world's rare earth oxide production and reserves are located in China. The mining of rare earth oxides often results in toxic and radioactive residues, which also have a negative impact on flora and fauna if not stored properly.

Conventionally powered vehicles are just as dependent on finite raw materials as electric vehicles. In the case of the former, the extraction of crude oil in particular leads to significant negative ecological (e.g. pollution, oil disasters) and social (armed conflicts) impacts. Due to the elimination of fossil fuels, the total amount of finite raw materials required for electric vehicles is estimated to be eight times lower than for conventionally powered vehicles. However, new raw materials are used in electric vehicles, all of which are critical in several respects. Therefore, the use of these raw materials requires special strategies and activities along the entire value chain, such as:

Dampening of demand for primary materials due to

- a reduced number of smaller vehicles as a result of changes in mobility behavior
- Maximization of recycling
- Advances toward substitution of critical raw materials

Improving environmental and social conditions of extraction through

- Mining in Europe based on high environmental and social standards
- Alliances for global sustainable raw material extraction
- Corporate due diligence along the value chains

The overriding goal must be to establish electromobility on the basis of high environmental and social standards in global raw materials extraction.

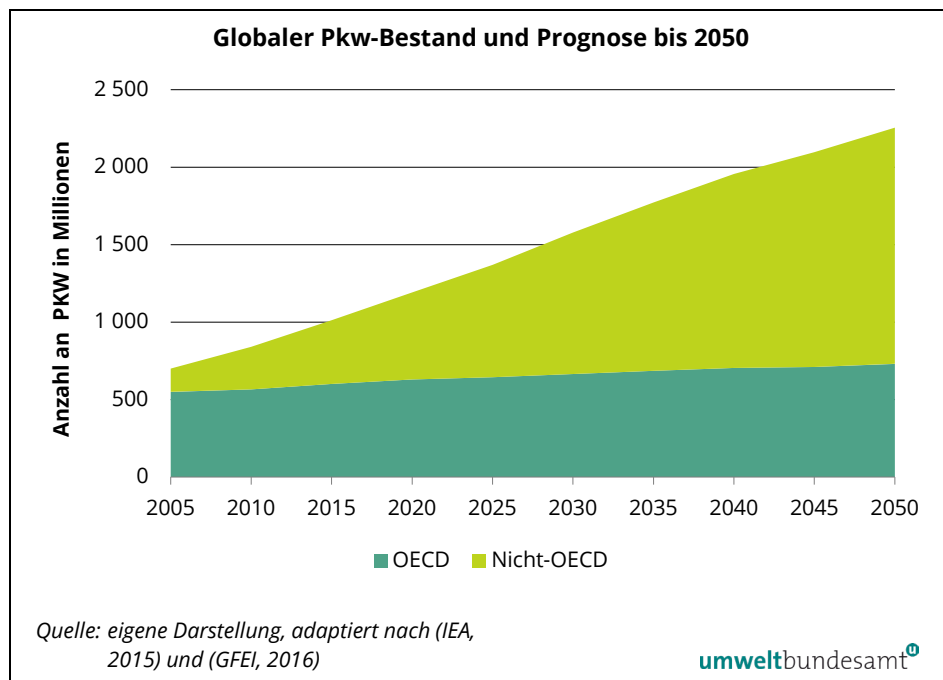
1 WARUM ELEKTROMOBILITÄT?

Beitrag zu THG-Emissionen

Der Personen- und Güterverkehr verursachte 2020 global rund 15 % aller Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) (IPCC, 2022). In Österreich war der Verkehr im selben Jahr sogar für rund 28 % der gesamten nationalen THG-Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2022). 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.

Der globale Personenkraftfahrzeugbestand betrug 2015 rund eine Milliarde Fahrzeuge und könnte bis 2050 auf 2,3 Milliarden anwachsen, wobei das Wachstum in erster Linie in Nicht-OECD Staaten stattfinden wird.

Abbildung 1:
Globaler Pkw-Bestand
und Prognose bis 2050



Status E-Mobilität

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.

Im Global *Electric Vehicle Outlook 2022* der Internationalen Energieagentur wird die Anzahl der elektrisch betriebenen Pkw für 2021 mit rund 16,5 Millionen beziffert. Hinzu kommen 670 000 Elektrobusse, 66 000 elektrische schwere Nutzfahrzeuge und eine nicht näher ausgeführte Zahl elektrischer leichter Nutzfahrzeuge und Zweiräder (IEA, 2022). In diesem Bericht werden unterschiedliche Szenarien abgebildet, in denen die zukünftige Anzahl an Plug-In-hybridelektrischen und vollelektrischen Fahrzeugen abgeschätzt wird. Diese Zahl reicht von

knapp 200 Millionen bis mehr als 350 Millionen Fahrzeugen schon im Jahr 2030, was einen massiven Anstieg des elektrischen Fahrzeugbestandes darstellt.

Genaugenommen werden auch leitungsgebundene Transporte, wie beispielsweise mit der Eisenbahn oder der mit U-Bahn, zur Elektromobilität gezählt. Der Fokus liegt in dieser Kurzstudie aber bei der leitungsfreien Mobilität.

Hauptbauteile Wesentliche Bauteile elektrischer Fahrzeuge sind der Akkumulator bzw. die Wasserstoff-Brennstoffzelle, beides in Kombination mit einem Elektromotor. Die Herstellung von batterieelektrischen Fahrzeugen (engl.: Battery Electric Vehicle, kurz: BEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (engl.: Fuel Cell Electric Vehicle, kurz: FCEV), aber auch von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (engl.: Internal Combustion Engine Vehicle, kurz: ICEV) benötigt eine breite Palette unterschiedlicher Rohstoffe. Bei den für die Elektromobilität notwendigen Bauteilen (Akkumulator, Brennstoffzelle und Elektromotor) werden Rohstoffe verwendet, die bei ICEV nicht oder nur in einem deutlich geringeren Ausmaß eingesetzt werden. Dabei drängt sich folgende Frage auf:

Kernfrage Sind die für eine mehrheitlich oder sogar vollständig elektrische globale Fahrzeugflotte erforderlichen Rohstoffe bzw. (natürlichen) Ressourcen in ausreichenden Mengen vorhanden?

Für die Beantwortung dieser Frage müssen einige Definitionen und Beschreibungen vorangestellt und weitergehende Fragen vorab beantwortet werden.

Zu klären sind die folgenden Fragen:

- Was sind Rohstoffe und (natürliche) Ressourcen und
- welche Rohstoffe, Ressourcen und Materialien kommen in Elektrofahrzeugen zum Einsatz?

2 ROHSTOFFE DER (ELEKTRO-)MOBILITÄT

Definition Rohstoffe

In der Studie „Die Nutzung natürlicher Ressourcen, Bericht für Deutschland 2018“ werden Ressourcen folgendermaßen definiert (Lutter et al., 2018): „Zu den natürlichen Ressourcen zählen alle Bestandteile der Natur. Dazu gehören nachwachsende (biotische) und nicht-nachwachsende (abiotische) Rohstoffe, der physische Raum, die Fläche, die Umweltmedien, also Wasser, Boden und Luft, die strömenden Ressourcen sowie alle lebenden Organismen.“ Unter Rohstoffen als Teilmenge der Ressourcen werden im Allgemeinen unbearbeitete Grundstoffe verstanden. Eine Reihe von Unterteilungen ist möglich: erneuerbare und nicht erneuerbare Rohstoffe, Primär- sowie Sekundärrohstoffe (aus Recycling), Energie-, chemische, Metall- sowie Rohstoffe für den Bau und die Keramik etc.

negative Folgen und Begleiterscheinungen

Neben der Tatsache, dass abiotische Rohstoffe endlich sind, hat auch deren Gewinnung und Weiterverarbeitung oftmals negative ökologische und soziale Folgen. Zudem erzeugt deren Einsatz Abhängigkeiten, die je nach Herkunft, Rohstoffverfügbarkeit und Fördermenge kritisch sein können. Eine umfassende Bewertung der verwendeten Rohstoffe umfasst darüber hinaus noch die Betrachtung der Kosten und Preise.

Die Wirtschaft ist von Rohstoffen abhängig. Stehen die notwendigen Rohstoffe für eine Dienstleistung oder ein Produkt nicht zur Verfügung, können manchmal Alternativen (im weitesten Sinn) gefunden werden oder der Engpass an Rohstoffen verhindert aber eine Durchsetzung und Etablierung der Dienstleistung oder des Produkts. Davon ist auch die Mobilität nicht ausgenommen. Für eine Abschätzung dieser Abhängigkeit von Rohstoffen ist es zuerst notwendig zu wissen, welche Rohstoffe in der Elektromobilität eingesetzt werden.

Liste der Rohstoffe

Die folgende Liste gibt einen Überblick der für die Produktion eines durchschnittlichen batterieelektrischen Fahrzeuges (engl.: Battery Electric Vehicle, kurz: BEV) benötigten abiotischen Rohstoffe (nicht dargestellt ist der Einsatz von Energie (Strom und Prozesswärme)). Die Mengen variieren mit der Fahrzeugklasse: Die Gesamtmasse eines Elektro-Pkw liegt zwischen 1 200 kg (Kleinwagen) und 2 200 kg (Oberklasse).

*Tabelle 1:
Einsatz abiotischer Rohstoffe für einen durchschnittlichen Elektro-Pkw (Habib, Hansdóttir und Habib, 2020; Helms et al., 2016; GEMIS).*

Rohstoff bzw. Ressource	Mengen
Eisen	1 060 kg
Plastikteile/Gummi/Kunststoff	200 kg
Aluminium	150 kg
Kupfer	115 kg
Nickel	105 kg
Grafit	>50 kg
Chrom	40 kg
Glas	30 kg
Lack	20 kg

Rohstoff bzw. Ressource	Mengen
Mangan	20 kg
Lithium	12 kg
Textilien	10 kg
Zink	10 kg
Kobalt	4 kg
Magnesium	4 kg
Sauerstoff	2 kg
Titan	2 kg
Molybdän	2 kg
Carbon	1 kg
Seltene Erden	0,3 kg
Silber	10 g
Gold	5 g
Tantal	5 g
Zirkon	3 g
PGM ¹	2 g
Tellur	1 g
Indium	<1 g
Summe	Ca. 1 800 kg

Eisen in unterschiedlicher Form ist der Hauptbestandteil jedes Fahrzeuges und wird in vielen Bauteilen eingesetzt. Aber auch andere Metalle wie Aluminium, Kupfer und Nickel spielen eine maßgebliche Rolle. Lacke, Kunststoffteile (z. B. Reifen, Innenausstattung) und Glas sind ebenfalls relevante Posten in der Materialbilanz. Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe von unterschiedlichen anderen Metallen und Rohstoffen, die insbesondere in den für die Elektromobilität relevanten Bauteilen benötigt werden. Diese Bauteile sind:

- der Lithium-Ionen-Akkumulator,
- die Brennstoffzelle inkl. Wasserstoff-Speicher und
- der Elektromotor.

In diesen Bauteilen wird eine Reihe von unterschiedlichen abiotischen Rohstoffen eingesetzt. Im Folgenden werden diese drei fundamentalen Bauteile der Elektromobilität näher dargestellt.

¹ Platin Group Metals: Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd) und Osmium (Os), Iridium (Ir), Platin (Pt)

2.1 Lithium-Ionen-Akkumulator

Funktion, Aufbau, Kathodenmaterialien

Der Lithium-Ionen-Akkumulator (kurz: Lithium-Ionen-Akku) dient als Energiespeicher für den Elektromotor und ist einer der fundamentalen Bauteile der Elektromobilität. Neben Lithium als Aktivmaterial und Graphit als Anodenmaterial sind die Kathodenmaterialien die wesentlichen Rohstoffe für den Lithium-Ionen-Akku. Als Kathodenmaterialien kommt eine Reihe von Kombinationen unterschiedlicher metallischer Rohstoffe in Frage (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2:
Derzeitige Kathodenmaterialien in Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Automobilbereich (Agora Verkehrswende, 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

Für den Individualverkehr werden im BEV sowie FCEV in der Regel Varianten von NMC bzw. NCA eingesetzt. LFP kommt beispielsweise vermehrt bei Bussen zum Einsatz, wobei insbesondere chinesische Hersteller oft LFP-Akkumulatoren verwenden.

Akku-Aufbau

Vereinfacht dargestellt besteht ein Lithium-Ionen-Akku aus Zellen (Anode und Kathode), die zu Modulen verarbeitet werden und gemeinsam mit dem Batteriemanagementsystem (BMS) ein Batteriesystem bilden. Je mehr Module zu einem Akku zusammengeschlossen werden, desto höher ist die Kapazität.

im Akku eingesetzte Materialien

Jene Materialien, die massenmäßig im Akku am relevantesten sind, sind Aluminium, Stahl, Kupfer, Graphit und Kunststoffe. Zusätzlich kommen je nach Ausführung noch die metallischen Rohstoffe Nickel, Kobalt, Lithium sowie Mangan zum Einsatz. Darüber hinaus sind in der Umhüllung auch Kunststoffteile verbaut und in der Kathode wird Sauerstoff eingesetzt. Bei Elektrolyten gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten in der Ausführung. Es kann grundsätzlich unterschieden werden, ob dieser flüssig, fest oder als Polymer ausgeführt ist. Außerdem gibt es noch unterschiedliche Ausführungen und damit zusätzlichen Bedarf an Rohstoffen. Derzeit kommen meist flüssige Lithium-Ionen enthaltende Leitsalze als Elektrolyt zum Einsatz.

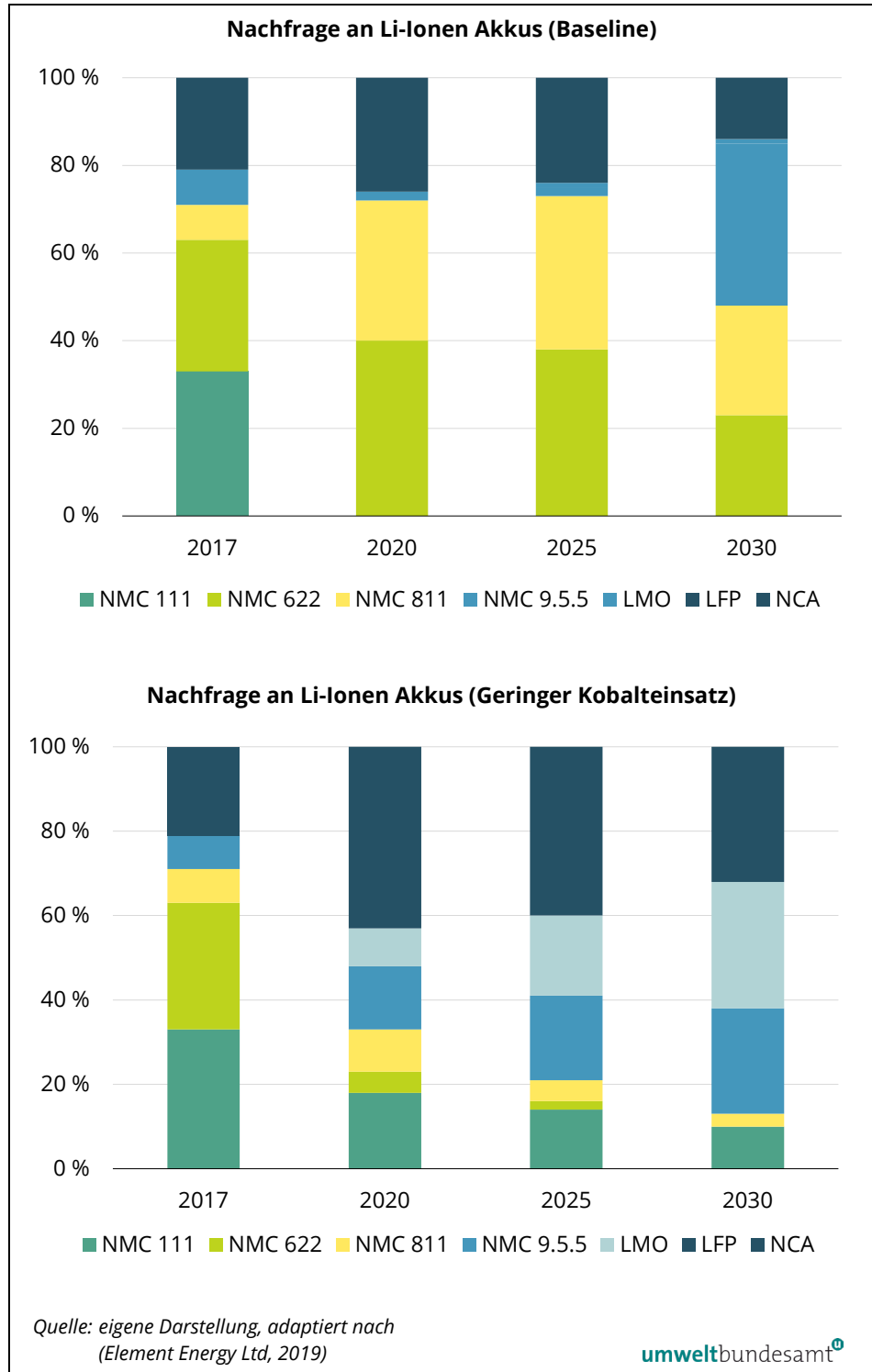
technologische Entwicklung Kathodenmaterialien

Der Bereich der Lithium-Ionen-Akkus ist von einer sehr starken technologischen Entwicklung geprägt. So war beispielsweise bis vor wenigen Jahren in BEV hauptsächlich LMO verbaut. Derzeit kommt vermehrt NMC 111 zum Einsatz. Die Einteilung 111 bedeutet, dass zu gleichen Teilen Nickel, Mangan und Kobalt in der Kathode eingesetzt werden. Die technologische Entwicklung ist derzeit vielfach damit beschäftigt, den Kobaltanteil zu reduzieren. Für 2025 geht die Internationale Energieagentur davon aus, dass vermehrt NMC 811, NMC 622 oder NMC 532 zum Einsatz kommen werden. Im Vergleich zu heute würde damit der Gewichtsanteil von Kobalt am Kathodenmaterial von 20 % auf 6–12 % reduziert

werden, der Anteil von Nickel jedoch auf bis zu 50 % ansteigen. Sauerstoff macht rund ein Drittel der Masse der aus.

- Rohstoffabhängigkeiten** Die Rohstoffabhängigkeiten bzw. das Risiko von Versorgungsengpässen sind für Lithium-Ionen-Akkus sehr dynamisch und es können durch neue disruptive Änderungen in der Technologie beim Akku völlig neue Rohstoffversorgungsabhängigkeiten entstehen bzw. können sich derzeitige Abhängigkeiten innerhalb kurzer Zeit vollständig auflösen.
- Feststoffbatterien, Energiedichten** Mögliche disruptive Änderungen können Feststoffbatterien wie z. B. Lithium-Schwefel oder Lithium-Luft-Akkus darstellen. Bei diesen Technologien könnte ab 2030 eine gravimetrische Energiedichte von rund 5 kWh/kg bzw. volumetrische Energiedichten von rund 10 kWh/l erreicht werden (Thielmann, Sauer und Wietschel, 2015). Benzin hat zum Vergleich Energiedichten von rund 12 kWh/kg sowie 8 kWh/l.
- Diese technologischen Entwicklungen können bei der Bewertung von Rohstoffabhängigkeiten und der Abschätzung von Versorgungsengpässen derzeit nur bedingt berücksichtigt werden.
- Entwicklung Kathodenmaterialien** Die Abschätzung ab 2030 gestaltet sich schwierig. Aber auch die Abschätzung bis 2030 ist aus heutiger Sicht insbesondere im Hinblick auf die eingesetzten Kathodenmaterialien nur unter Annahmen möglich. In einer Studie von Element Energy wird bei der Entwicklung der Kathodenmaterialien unterschieden, ob versucht wird, den Anteil von Kobalt zu reduzieren oder nicht. Ersteres ist insbesondere im asiatischen Raum zu beobachten, wo vermehrt auf LFP-Akkumulatoren gesetzt wird (Element Energy Ltd, 2019). Je nach gewählter Strategie ergeben sich dadurch unterschiedliche Anteile der zukünftig eingesetzten Kathodenmaterialien (vergleiche Abbildung 2).

Abbildung 2:
Nachfrage nach
Lithium-Ionen-Akkus in
Abhängigkeit des
Einsatzes von Kobalt



**Entwicklung
Beschichtungs-
materialien**

Andere Studien (Bobba et al., 2020) sehen noch viel Potenzial bei der Weiterentwicklung der Lithium-Metall-Oxid-Akkumulatoren (NMC, NCA etc.). Der Fokus liegt derzeit auf neuen Beschichtungsmaterialien (Niob oder Titan) oder der Integration von Niob in die Kathode. Weiters wird versucht bei der Ummantelung und beim Gehäuse mit neuen Materialien Gewicht zu sparen und so die Material- und Energieeffizienz zu steigern.

**Gewichtsanteile
eingesetzter Akku-
Materialien**

Für einen heute verwendeten Akku, der 400 kg schwer ist und dabei eine Kapazität von rund 50 kWh aufweist, sind exemplarisch derzeit rund 80–100 kg Graphit, 15–32 kg Nickel, 0–10 kg Mangan, 0–20 kg Kobalt sowie 6 kg Lithium verbaut. Den Hauptbestandteil mit rund 100–120 kg macht jedoch Aluminium aus, Kupfer trägt rund 60 kg und Stahl rund 80 kg zum Gewicht bei. Zusätzlich wird auch Kunststoff eingesetzt.

Akku-Kapazitäten Die Bandbreite der eingesetzten Akku-Kapazitäten bewegt sich zwischen 20 kWh und bis zu über 100 kWh bei Pkw. Bei Lkw bzw. Bussen sind teilweise noch bedeutend höhere Kapazitäten im Bereich von 150 kWh im Lieferverkehr und bis zu 1 000 kWh im Fernverkehr erforderlich. Für Zweiräder, wie z. B. E-Bikes, werden Akkus mit Kapazitäten von rund 200–800 Wh eingesetzt.

2.2 Brennstoffzelle und H₂-Speicher

Alternativ zum reinen batterieelektrisch betriebenen Pkw ist der Einsatz von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle eine weitere vielversprechende technologische Variante der Elektromobilität. In diesem Fall ist der Wasserstoff der Energieträger, der über die Brennstoffzelle in Elektrizität umgewandelt, in einem Lithium-Ionen-Akku zwischengespeichert wird und anschließend den Elektromotor antreibt.

2.2.1 Brennstoffzelle

Es gibt eine Reihe von unterschiedlichen Brennstoffzellen, die teilweise sehr unterschiedliche Funktionsweisen haben, sich in jedem Fall aber in den verwendeten Rohstoffen unterscheiden.

verwendete Rohstoffe Bei der PEM-Brennstoffzelle umschließen zwei Bipolarplatten die Membran-Elektroden-Einheit. Diese Einheit besteht aus der Polymer-Elektrolytmembran (PEM), welche den Ionentransport von Anode zur Kathode ermöglicht. Die Elektroden bestehen aus einem Edelmetall-Kohlenstoff-Gemisch. Dabei werden Elemente der Platinmetallgruppe, insbesondere Platin und Iridium, eingesetzt (VDI und VDE, 2019). In den Bipolarplatten wird in der Regel Grafit eingesetzt (Bach, 2015).

Im Mobilitätsbereich werden typischerweise Niedertemperatur-Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (engl.: Low Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, kurz: LT-PEMFC) verwendet.

2.2.2 Wasserstoffspeicher

Für FCEV ist neben der Brennstoffzelle auch ein Wasserstoffspeicher notwendig, wenn Wasserstoff (H₂) nicht durch Onboard-Reforming hergestellt wird. Onboard-Reforming – d. h. die unmittelbare Herstellung von H₂ direkt an Bord des Fahrzeugs – ist zukünftig beispielsweise für Schiffe vorstellbar.

Speichervarianten im Mobilitätsbereich Bei der Speicherung von H₂ wird zwischen vier verschiedenen Varianten unterschieden. Typ I bis III bezeichnen Speicherungen bei unterschiedlichen Drücken in Metallbehältern. Diese werden beispielsweise bei Bussen eingesetzt. Für den Anwendungsbereich im Pkw sind diese Speicher jedoch zu schwer und es wird

meist auf Typ-IV-Speicher zurückgegriffen. Diese können H₂ mit 700 bar speichern und bestehen aus mit gewickelten Karbonfasern verstärktem Kunststoff (z. B. Epoxidharz) (Reuter et al., 2019). Ein Vorteil dieser Verbundwerkstoffe im Gegensatz zum metallischen Speicher ist, dass H₂ keine chemischen oder physikalischen Reaktionen damit eingeht.

2.3 Elektromotor

Elektromotoren benötigen wiederum andere Rohstoffe. Hier sind insbesondere die Seltenerdoxide (z. B. Neodym und Dysprosium) von Bedeutung.

eingesetzte Rohstoffe

Als Elektromotoren kommen oft Synchronmotoren, die mittels Permanentmagneten angeregt werden, zum Einsatz. Diese Permanentmagnete bestehen oft aus Neodym-Eisen-Bor-Verbindungen, wobei Eisen mit 70 %, Neodym mit rund 30 % und Bor lediglich mit rund 1 % in der Materialbilanz aufscheinen (VDI und VDE, 2019). Anstelle von Neodym kommen auch andere Seltenerdmetalle (SEM) wie Dysprosium, Europium oder Terbium zum Einsatz. Das Magnetfeld wird in Kupferspulen erzeugt.

In geringen Ausmaß kann auch Graphit, z. B. bei den Schleifkontakten, verwendet werden.

Einsatzbereiche

Elektromotoren kommen im Pkw jedoch nicht nur zum Antrieb zum Einsatz. Eine Vielzahl an Elektromotoren ist auch in konventionellen Fahrzeugen (engl.: Internal Combustion Engine Vehicle, kurz: ICEV) verbaut: Fensterheber, Scheibenwischer oder auch bei der Ölpumpe.

Entwicklungen zum Ersatz kritischer Rohstoffe

Technologische Entwicklungen z. B. durch Substitution zielen derzeit darauf ab, Dysprosium und Terbium vollständig zu ersetzen bzw. den Bedarf an Neodym deutlich zu reduzieren. So kann der Einsatz von weniger kritischen Seltenen Erden Lanthan oder Cer den Bedarf an Neodym im Motor um 50 % reduzieren. Auch wurde bereits eine vollständige Substitution der Seltenerdmetalle in Motoren in Elektroautos zumindest demonstriert (VDI und VDE, 2019).

2.4 Welche Elemente sind kritisch?

Eine Bewertung der sozialen, ökologischen, ökonomischen, politischen und technischen Rahmenbedingungen sowie der Relevanz von allen angeführten Rohstoffen, insbesondere der Metalle, ist nur mit erheblichem Aufwand möglich. Es ist in jedem Fall erforderlich eine Auswahl zu treffen, welche Rohstoffe

besonders relevant bzw. kritisch sind. Diese Auswahl wird anhand der Kritikalitätsanalyse (siehe Kapitel 3) ausgeführt und es werden die folgenden Fragen beantwortet:

1. Wie wird Kritikalität von Rohstoffen definiert?
2. Wie werden die relevanten kritischen Rohstoffe herausgefunden und welche Parameter werden dafür herangezogen?

3 KRITIKALITÄTSANALYSE

EK-Kriterien für Kritikalität

Die Europäische Kommission definiert zwei Kriterien zur Bestimmung der Kritikalität bestimmter Metalle, wobei beide Kriterien erfüllt sein müssen, damit das Metall als kritisch für die Versorgungssicherheit der EU eingestuft wird (EK, 2020):

- **Wirtschaftliche Bedeutung:** die Bedeutung des Materials für die Wirtschaft in der EU im Bereich der Endverwendungszwecke sowie der Wertschöpfung in den produzierenden Sektoren (NACE² 2 Ebene) auf der Grundlage von industriellen Anwendungen. Die wirtschaftliche Bedeutung wird noch mit einem Indikator, der die technische und ökonomische Möglichkeit der Substitution der Rohstoffe beschreibt, korrigiert.
- **Risiko von Versorgungsengpässen:** Hier wird die Konzentration der globalen Produktion von Primärrohstoffen und die Lieferung in die EU auf Länderebene untersucht. Dabei wird die Abhängigkeit der Versorgung von Rohstoffen unter Berücksichtigung der Importabhängigkeit und Ausfuhrbeschränkungen bestimmt und zusätzlich werden z. B. auch Umweltaspekte verwertet. Für die Bestimmung des Versorgungsrisikos wird entweder die Herstellung oder die Extraktion der Rohstoffe herangezogen. Substitutions- und Recyclingmöglichkeiten reduzieren das Risiko.

weitere Bezugspunkte

Wird ein gewisser Schwellenwert überschritten, so wird der Rohstoff als kritisch eingestuft. Neben dem Vorkommen wird auch auf die internationalen Lieferketten Bezug genommen und zusätzlich berücksichtigt, ob die Kritikalität bei der Förderung und/oder der Verarbeitung liegt. Aktuell sind 30 Rohstoffe als kritisch eingestuft und in der folgenden Tabelle dargestellt.

*Tabelle 3:
Kritische Rohstoffe, definiert von der Europäischen Kommission, 2020 (COM(2020) 474 final).*

Antimon	Hafnium	Phosphor	Baryt	Schwere Seltene Erden
Scandium	Beryllium	Siliciummetall	Wismut	Leichte Seltene Erden
Indium	Tantal	Borat	Magnesium	Wolfram
Kobalt	Natürl. Grafit	Vanadium	Kokskohle	Naturkautschuk
Bauxit	Flussspat	Niob	Lithium	Metalle der Platinmetallgruppe
Gallium	Germanium	Phosphorit	Strontium	Titan

Aktionsplan für Zugangssicherung

Im Rahmen dieser Studie (COM(2020) 474 final) wurde auch ein Aktionsplan der EU-Kommission zu kritischen Rohstoffen entwickelt, mit welchem der Zugang der EU zu kritischen Rohstoffen sichergestellt werden soll. Viele der genannten Metalle sind essenziell für die grüne und digitale Transformation und insbesondere auch für die Elektromobilität.

Europäische Rohmaterialallianz

Eine Europäische Rohmaterialallianz (European Raw Materials Alliance (ERMA)) wurde im Oktober 2020 etabliert. Dazu sollen strategische Partnerschaften mit

² Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne.

Drittstaaten geschlossen werden, um den Zugang zu Rohstoffquellen zu diversifizieren. Die Gewinnung der Rohmaterialien soll nachhaltig und sozial verantwortlich erfolgen. Durch Kreislaufwirtschaft und Innovation soll die Abhängigkeit von primären kritischen Rohstoffen reduziert werden. Eine Arbeitsgruppe soll u. a. Rohstoffvorkommen in der EU ausfindig machen, die bis 2025 erschlossen werden können. Diese Allianz besteht neben Regierungen aus verschiedenen Unternehmen, Universitäten sowie NGOs und Verbänden.

**alternative
Einstufungskriterien
und -parameter**

Die Thinkstep-Studie (Reuter et al., 2019) „Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien – Herausforderungen und Lösungsansätze“, die im Auftrag der Landesagentur e-mobil Baden-Württemberg durchgeführt wurde, verwendet einen der EU-Kommission ähnlichen Zugang zur Bestimmung der für die E-Mobilität essenziellen kritischen Rohstoffe und betrachtet die beiden folgenden Parameter:

- **Versorgungsrisiko:** Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Engpass der Versorgung für einen bestimmten Rohstoff eintritt.
- **Vulnerabilität:** Quantifizierung der Auswirkungen, die ein eintretender Engpass der Versorgung eines bestimmten Rohstoffes haben würde.

Bei Überschreiten eines abgestimmten Schwellenwertes für beide Parameter wird der entsprechende Rohstoff als kritisch eingestuft. Darüber hinaus werden ökonomische, politische und soziale Komponenten bei der Versorgung der einzelnen Rohstoffe berücksichtigt. Besagte Studie verwendet für die Bewertung zusätzlich noch Indikatoren, ausgewählt nach der VDI Richtlinie 48000:

- *Statistische Reichweite eines Rohstoffes, d. h. das Verhältnis von Reserve zur globalen Rohstoffförderung*
- *Kritische Konzentration der Rohstoffproduktion, ausgedrückt durch den Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) der Länderproduktion*
- *Kritische Konzentration der Rohstofflagerstätten, d. h. der HHI der Reserven*
- *Politisches Länderrisiko (z. B. politische Stabilität oder Abwesenheit von Gewalt)*
- *Regulatorisches Länderrisiko (z. B. Bürokratieaufwand, Korruption, etc.)“*

Einstufungsergebnis

Als Ergebnis wurden die folgenden Rohstoffe im Bereich der Elektromobilität als kritisch eingestuft: Lithium, Kobalt, Nickel, Platin, SEM und Kupfer. Alle Elemente wurden auch schon von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft (siehe Tabelle 3).

4 BLICK IN DIE ZUKUNFT

Für die Bewertung der Kritikalität der Rohstoffe im Akku ist insbesondere die Berücksichtigung der Nachfrageentwicklung von erheblicher Bedeutung, d. h. inwiefern wird einerseits der Markthochlauf die Nachfrage nach bestimmten Rohstoffen verstärken bzw. inwiefern werden technologische Entwicklungen (wie z. B. Lithium-Luft-, Graphen- bzw. Festkörper-Akkus, kobaltfreie Akkus) den gegenteiligen Effekt haben bzw. die Nachfrage schwächen und damit in andere Richtungen, auf andere Rohstoffe lenken.

4.1 Zukünftige Verfügbarkeit von Rohstoffen

rasante Marktentwicklung

Der Markthochlauf der Elektromobilität in den globalen Märkten ist rasant (vgl. Kapitel 1) und wird in Europa insbesondere von den neuen CO₂-Zielvorgaben für neuzugelassene Fahrzeuge angetrieben: Ab dem Jahr 2035 dürfen in Europa praktisch nur mehr emissionsfreie Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge neu zugelassen werden (EK, 2021). Die Entwicklung der globalen Flotte der Elektromobilität hat einen großen Einfluss auf die Bestimmung der Kritikalität.

Risiko von Versorgungs- engpässen

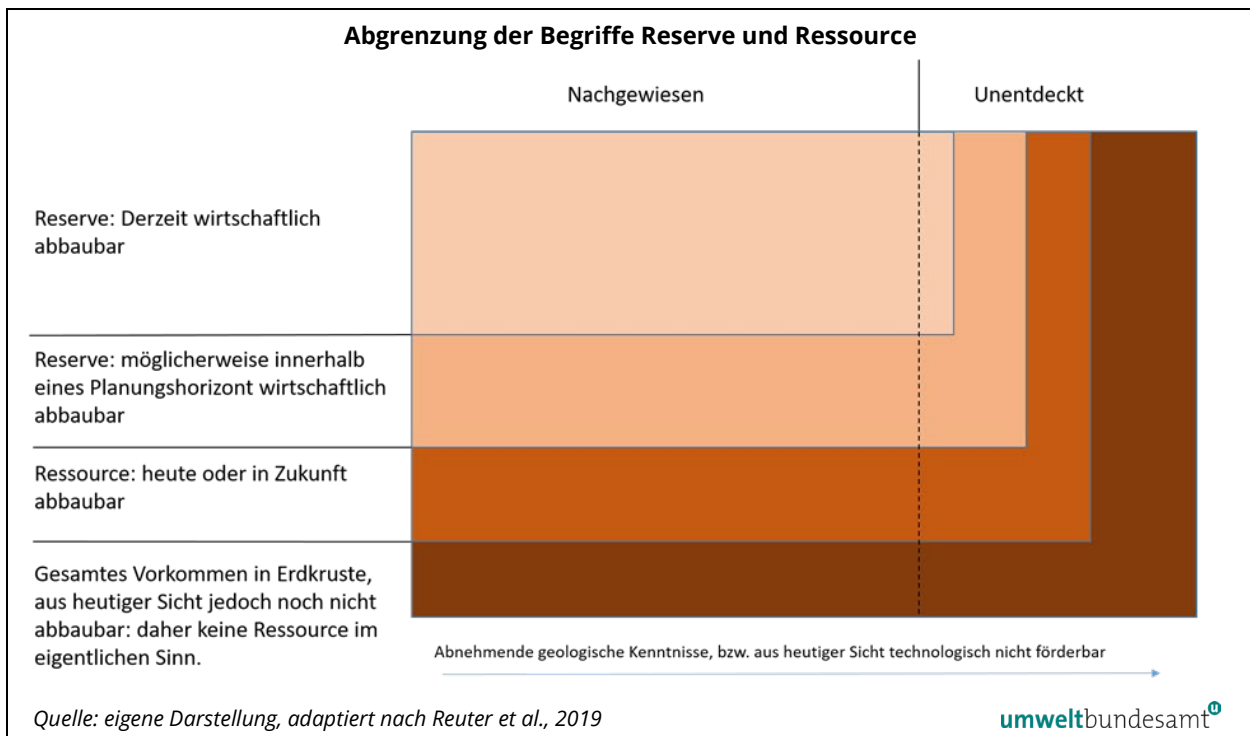
Für diese Entwicklung ist entscheidend, ob die steigende Nachfrage befriedigt werden kann oder ob es zu Versorgungsengpässen kommt. Zu unterscheiden ist hierbei prinzipiell, ob es sich beim Versorgungsengpass um die derzeitige Abbau- bzw. Extraktionskapazität eines Rohstoffes handelt oder ob die Herstellung bzw. Aufbereitung z. B. der Erze zum gewünschten Rohstoff ein Versorgungsrisiko darstellt. Anders gesagt: An welcher Stelle der Herstellungskette liegt das Risiko? Wird z. B. die Versorgung von Lithium-Ionen-Akkus durch den fehlenden Nachschub an einem oder mehreren kritischen Rohstoffen gebremst oder können diese Rohstoffe nicht in der ausreichenden Geschwindigkeit industriell gesintert, gehüttet etc. werden – Faktoren wie diese werden für die Kritikalitätsbewertung unterschiedlich berücksichtigt und bedingen unterschiedliche Maßnahmen. Insbesondere spielt auch die zukünftige Verfügbarkeit eine Rolle in der Kritikalitätsbewertung.

Definition Ressourcen und Reserven

Wesentlich bei der Bewertung der zukünftigen Verfügbarkeit von Rohstoffen ist die Definition von Ressourcen und Reserven.

- **Reserven:** derzeit technisch und zu heutigen Marktpreisen wirtschaftlich abbaubar
- **Ressourcen:** alle nachgewiesenen sowie die vermuteten, aber noch nicht nachgewiesenen Rohstoffe, die derzeit noch nicht wirtschaftlich förderbar sind

Abbildung 3: Abgrenzung der Begriffe Reserve und Ressource



Bei ausreichend hoher Nachfrage, unter Umständen auch durch neue Fördermöglichkeiten, vergrößert sich der Anteil der Reserven.

Im Allgemeinen genügt die Unterteilung zwischen Abbau- und Herstellungskapazität. Insbesondere bei der Elektromobilität kann unter Umständen der Versorgungseingpass auch bei der Kapazität der Fabriken zur Herstellung der Lithium-Ionen-Akkus liegen.

Generell sind die hier verwendeten Kritikalitätsbewertungen in erster Linie auf die Betrachtung der Elektromobilität fokussiert. Kritische Rohstoffe werden jedoch nicht nur im Bereich der Elektromobilität eingesetzt, sondern sind auch für eine Vielzahl an (zukünftigen) Anwendungen nötig. Marktverändernde stark wachsende Einsatzgebiete eines Rohstoffes, unabhängig vom Einsatzbereich, können einen starken Einfluss auf die Kritikalitätsbewertung haben. Das bedeutet, dass die Bewertung immer nur eine Momentaufnahme darstellt und auf dem derzeitig verfügbaren Wissenstand aufbaut.

4.1.1 Einfluss von Recycling auf die Verfügbarkeit

Für Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan rechnet die EU-Kommission mit guten Abbauchancen in Europa. Für andere Rohstoffe ist ein Abbau in Europa eher unwahrscheinlich, jedoch besteht die Möglichkeit, Abhängigkeiten durch Recycling zu reduzieren.

**Status und Potenzial
von Recycling**

Der aktuelle Beitrag des Recyclings zum Verbrauch kritischer Rohstoffe reicht von 0 % bei Lithium über 19 % bei Titan und 22 % bei Kobalt bis zu 42 % bei Wolfram (COM(2020) 474 final). Es wird erwartet, dass diese Werte beim Ausbau der Recyclingkapazitäten deutlich erhöht werden. Im Prinzip können bei Lithium-Ionen-Akkus mindestens 70 % der gesamten Materialien (VDE und DKE, 2015) recycelt werden, wobei die Metalle Kobalt, Nickel und Kupfer zu 99 % wiedergewonnen werden können (Agora Verkehrswende, 2019).

**Bedeutung der
Ressourcen-schonung**

Der globale Bedarf an Ressourcen (Energie, Nahrungsmittel und Rohstoffe) ist für rund die Hälfte aller Treibhausgas-Emissionen und mehr als 90 % des Arten-schwunds und der Wasserknappheit verantwortlich (COM(2020) 474 final). Auch aus diesem Grund kommt der Wiederverwendung endlicher Ressourcen eine zentrale Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund befindet sich die EU-Batterieverordnung derzeit in Überarbeitung. Nach derzeitigem Stand wird die Verordnung unter anderem deutlich erhöhte Sammelquoten für Gerätealtbatterien enthalten, ebenso wie verpflichtende Recyclingquoten für ausgesuchte Rohstoffe, darunter Lithium, Kobalt und Nickel. Dadurch sollen die Kreislaufwirtschaft gefördert, Rohstoffe effizienter genutzt und letztlich die Europäische Union in der Rohstoffbeschaffung unabhängiger werden (COM(2020) 798 final).

4.2 Versorgungsrisiko und Nachfrageintensitäten verschiedener Rohstoffe für die wesentlichen Bauteile der Elektromobilität entlang der Herstellungskette

4.2.1 Lithium-Ionen-Akku

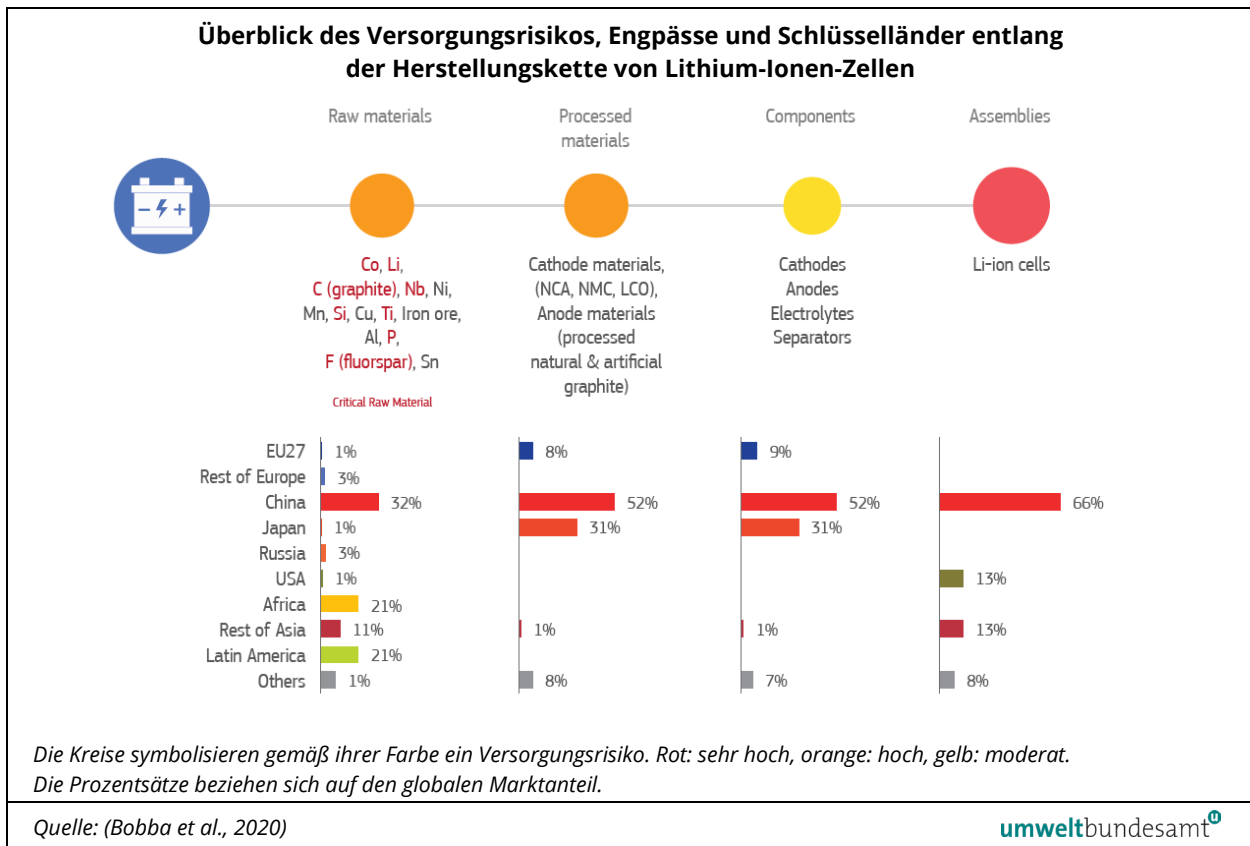
**Aufbau der
Herstellungskette**

Die Herstellungskette umfasst die Primärrohstoffe (Ausgangsstoffe, wie z. B. Lithiumkarbonat), die hergestellten Materialien (Lithium), die daraus gefertigten Bestandteile (für den Akku beispielsweise die Kathoden) und das Zusammenbauen der Zelle.

**Engpässe in der
Herstellungskette**

Die kritischen Rohstoffe umfassen dabei Kobalt, Lithium, (natürliches) Grafit, Niob, Silizium, Titan und Fluorspat. Für einige der Materialien wird erst in Zukunft erwartet, dass sie wesentliche Bestandteile eines Lithium-Ionen-Akkus sein werden. Klar ersichtlich ist aus Abbildung 4 die große Abhängigkeit von China entlang des gesamten Herstellungsprozesses. Insbesondere bei den Primärrohstoffen kann die Europäische Union 1 % des Bedarfs selbst decken, d. h. von Vorkommen und Abbaugebieten innerhalb der Europäischen Union profitieren. Das liegt insbesondere daran, dass es innerhalb Europas nur sehr geringe Rohstoffvorkommen gibt. Bei den verarbeiteten Materialien sowie bei den Bestandteilen der Akkus zeigt sich außerdem eine starke Abhängigkeit von Japan.

Abbildung 4: Überblick des Versorgungsrisikos, Engpässe und Schlüsselländer entlang der Herstellungskette von Lithium-Ionen-Zellen

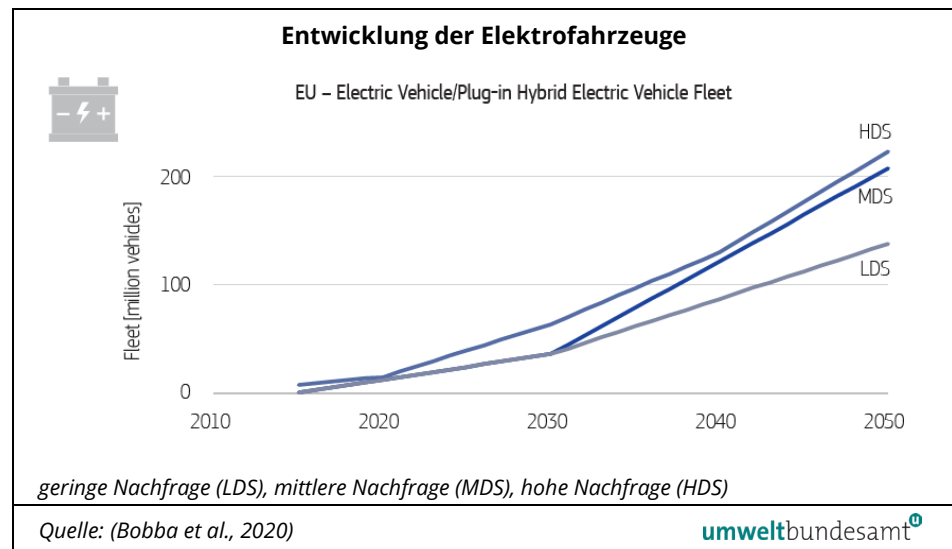


Das größte Versorgungsrisiko liegt in der Zellenproduktion, wo es bis vor wenigen Jahren noch keine nennenswerte Zellenproduktion in der Europäischen Union gab. Um das zu ändern und die Abhängigkeiten entlang der gesamten Herstellungskette zumindest zu reduzieren, wurde im Oktober 2017 von der Europäischen Kommission, den EU-Mitgliedsstaaten, der Industrie und der Wissenschaft die Europäische Batterieallianz (engl.: European Batterie Alliance, kurz: EBA) gegründet (EBA, 2019). Übergeordneter Auftrag der EBA ist die Entwicklung von Maßnahmen von der Rohstoff-Sicherung bis zur Batterieproduktion in Europa, die zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 beitragen sollen. Auch aufgrund der Aktivitäten der EBA sind in der Zwischenzeit die ersten Zellproduktionen in Europa in Betrieb gegangen. Beispielhaft genannt werden können das Werk Northvolt Eins in Schweden (mit einer jährlichen Produktionskapazität von bis zu 60 GWh), das deutsche Werk des chinesischen Herstellers CATL in Arnstadt (bis zu 80 GWh) oder die Tesla Gigafactory im deutschen Brandenburg (bis zu 125 GWh) (EBA, 2021).

Eine Abschätzung der Flottenentwicklung bis 2030 bzw. bis 2050 findet sich beispielsweise im Report *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors* der Europäischen Kommission (Bobba et al., 2020). Diese Abschätzung erfolgt anhand von verschiedenen Szenarien: schwache Nachfrage nach Elektromobilität, mittlere Nachfrage und starke Nachfrage. (low, medium, high demand scenario).

Ausgehend von einem sehr niedrigen Niveau wird sich die Anzahl der batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge bis 2030 auf rund 40 bis 60 Millionen belaufen, 2040 zwischen 90 und 130 Millionen und 2050 zwischen 140 und 220 Millionen Fahrzeugen. Diese unterschiedlichen Bestände beeinflussen die Nachfrage.

Abbildung 5:
Entwicklung der Elektrofahrzeuge für drei unterschiedliche Nachfrageszenarien für die Europäische Union



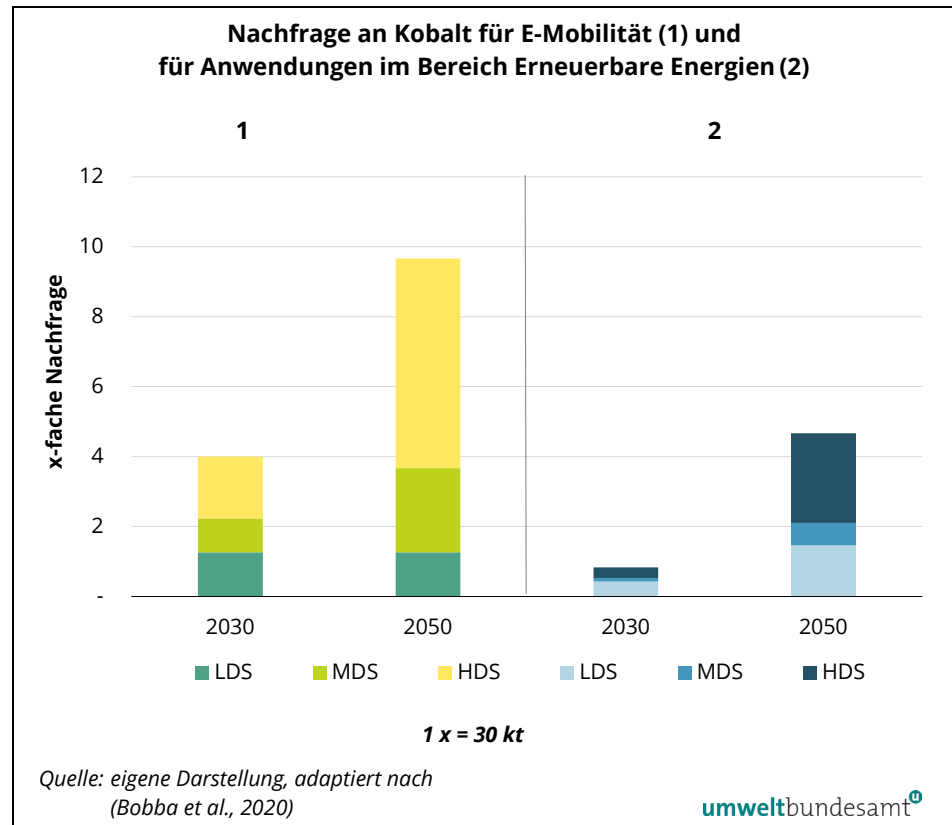
Lithium-Ionen-Akkus werden nicht nur in der Mobilität eingesetzt, sondern kommen auch als Speicher für erneuerbare Stromerzeugung in Frage und sind für die Umsetzung des European Green Deal unumgänglich. Das bedeutet wiederum, dass der Druck auf die Rohstoffe durch diese zusätzliche Nachfrage noch einmal deutlich erhöht wird. Die Nachfrage nach Speicherkapazitäten wird ebenfalls mit drei verschiedenen Szenarien abgebildet.

Dabei wird die Nachfrage beim Blick in die Zukunft auf bestimmte als kritisch bewertete Ressourcen beschränkt: Kobalt, Lithium, Grafit, Nickel und Mangan.

4.2.1.1 Kobalt

Die Nachfrage nach Kobalt in der Europäischen Union beläuft sich für das Jahr 2020 auf rund 30 Kilotonnen. Im Szenario mit großer Nachfrage erhöht sich der Bedarf bis 2030 um den Faktor vier und bis 2050 um den Faktor zehn – d. h., dass dann rund 300 Kilotonnen an Kobalt benötigt werden würden und zwar konkret für Anwendungen in der Elektromobilität. Die Abbildung 6 zeigt neben dem zusätzlichen Bedarf an Kobalt für E-Mobilität auch den zusätzlichen Bedarf an Kobalt für Lithium-Ionen-Akkus im Bereich der stationären Speicher im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage.

Abbildung 6:
Bedarf an Kobalt für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Kobalt im Bereich (1) der Elektromobilität und in (2) anderen Anwendungen (z. B. stationäre Speicher), jeweils im Szenario von geringer (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS).



Die zusätzliche Nachfrage nach Kobalt wird hauptsächlich durch die Zunahme an elektrisch betriebenen Fahrzeugen bestimmt. Je nachdem in welche Richtung die technologische Entwicklung der Lithium-Ionen-Akkus geht (siehe Abbildung 2), kann auch der Fall eintreten, dass der Bedarf an Kobalt nahezu unverändert bleibt; zumindest durch die Nachfrage aus der E-Mobilität.

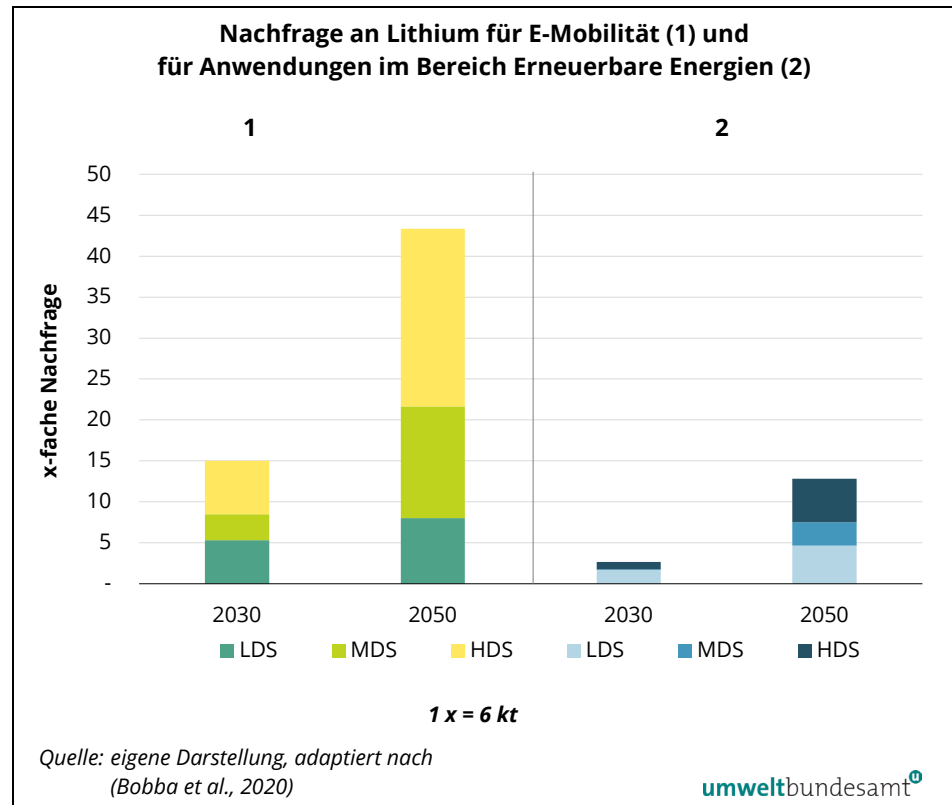
4.2.1.2 Lithium

Die derzeitige Nachfrage nach Lithium in der EU beläuft sich bei Berücksichtigung sämtlicher Anwendungsmöglichkeiten von Lithium auf rund 6 000 Tonnen pro Jahr.

Hauptnachfrage durch E-Mobilität

Die Nachfrage nach Lithium innerhalb der Europäischen Union ist maßgeblich von der Elektromobilität geprägt. Stationäre Speicher im Bereich der Erneuerbaren Energien bedingen eine deutlich geringere Nachfrage. Bis 2030 kann sich die Nachfrage nach Lithium alleine durch die Elektromobilität um mehr als den Faktor zehn erhöhen. Je nach Entwicklung der Elektromobilität und bei gemeinsamer Betrachtung mit dem Bedarf z. B. für stationäre Speicher kann durch diese beiden Anwendungen der derzeitige Bedarf an Lithium bis 2050 um den Faktor 29 bis 56 steigen (Bobba et al., 2020). Eine ähnlich gelagerte Studie der Katholischen Universität Löwen weist einen Anstieg des Bedarfs um den Faktor 37 aus (KU Leuven, 2022).

Abbildung 7:
Bedarf an Lithium für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Lithium im Bereich (1) der Elektromobilität und in (2) anderen Anwendungen (z. B. stationäre Speicher) jeweils im Szenario für geringe (LDS), mittlere (MDS) und hohe Nachfrage (HDS).



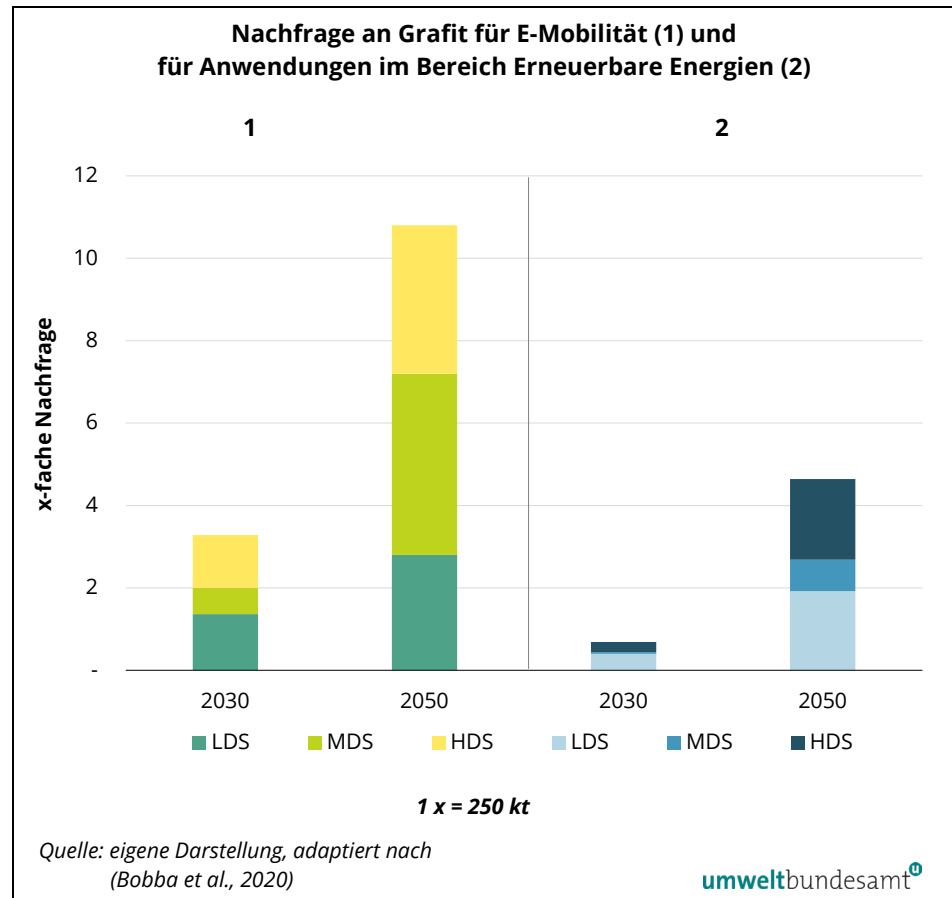
**erwartete
Verbrauchs-
entwicklung**

Erwartet wird, dass sich der Lithiumverbrauch der Europäischen Union bis 2030 stark erhöhen wird (auf das 18-Fache des derzeitigen Verbrauchs). Obwohl Lithium in der Europäischen Union gefördert wird, wird es derzeit ausschließlich außerhalb der Europäischen Union verarbeitet und die (Zwischen-)Produkte importiert. Bei Lithium könnte die Europäischen Union bis 2025 einen Eigenversorgungsgrad von 80 % erreichen (COM(2020) 474 final).

4.2.1.3 (Natürliches) Grafit

Derzeit werden in der Europäischen Union rund 250 000 Tonnen Grafit pro Jahr benötigt. Grafit wird zu einem großen Teil bei der Elektromobilität insbesondere als Anodenmaterial eingesetzt, jedoch ebenfalls bei vielen anderen Anwendungen, wie beispielsweise bei der Elektro Stahlherstellung, benötigt. Die folgende Abbildung zeigt wieder den zusätzlichen Bedarf an Grafit, ausgelöst durch die Elektromobilität und durch andere Speicheranwendungen im Bereich der erneuerbaren Energien im Verhältnis zu derzeitigen Nachfrage.

Abbildung 8: Bedarf an Grafit für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Grafit im Bereich (1) der Elektromobilität und in (2) anderen Anwendungen (z. B. stationäre Speicher) jeweils im Szenario mit geringer (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS).



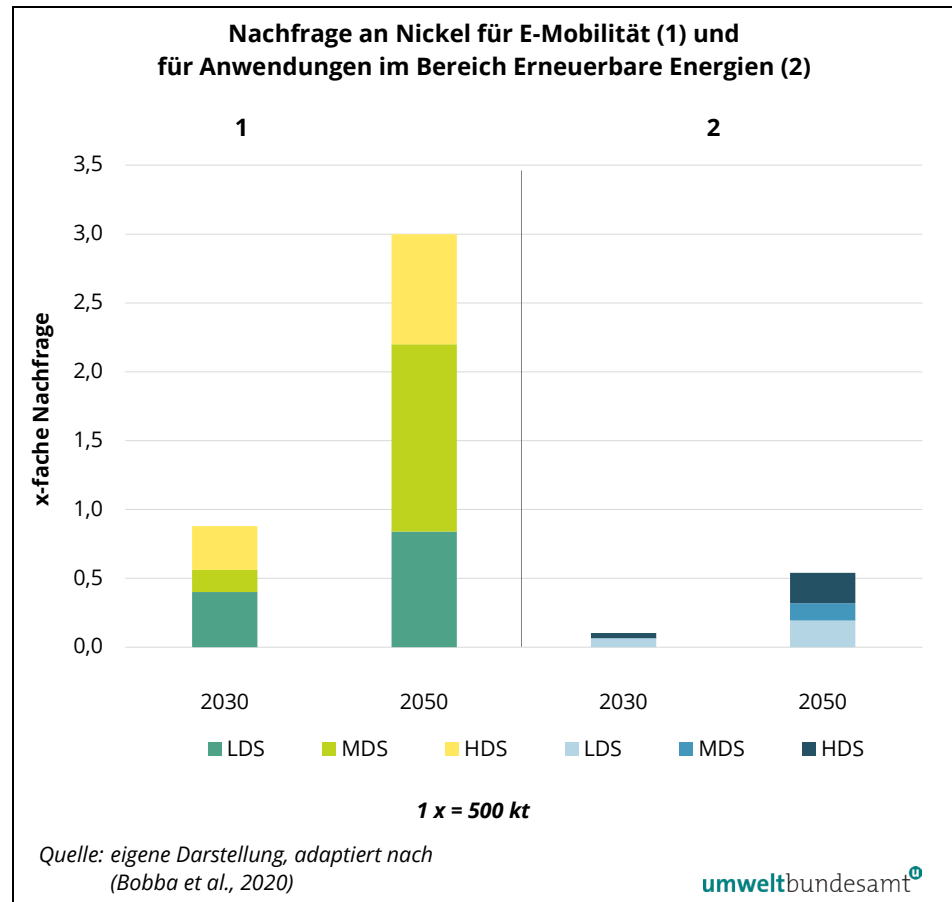
Der Hochlauf der Elektromobilität kann bis 2050 zu einer Verzehnfachung des Bedarfs an Grafit führen. Zusätzlich wird für andere Anwendungen nochmals mehr als das Vierfache des derzeitigen Verbrauchs an Grafit benötigt. Es zeigt sich wieder, dass der Bedarf in erster Linie durch die benötigten Lithium-Ionen-Akkus geprägt ist.

Der Anteil des Grafits, der in Akkus und Batterien verbaut wird, betrug 2018 knapp 14 %. Von diesem Anteil entfielen 90 % auf Lithium-Ionen-Akkus (DERA, 2020, S. 14).

4.2.1.4 Nickel

Die derzeit in der Europäischen Union eingesetzte Menge an Nickel liegt bei rund 500 000 Tonnen pro Jahr. Dabei wird nur ein geringer Teil in Lithium-Ionen-Akkus in der Elektromobilität und ein noch viel geringerer Teil in Lithium-Ionen-Akkus als stationärer Speicher eingesetzt, wie die folgende Abbildung zeigt.

Abbildung 9: Bedarf an Nickel für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Nickel im Bereich (1) der Elektromobilität und in (2) anderen Anwendungen (z. B. stationäre Speicher) jeweils im Szenario mit geringer (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS).



Durch den vermehrten Einsatz in Akkus in der Elektromobilität wird sich die Nachfrage nach Nickel 2030 nur maximal verdoppeln. Der überwiegende Teil von Nickel wird demnach in völlig anderen Anwendungen eingesetzt. Nichtsdestotrotz kann ein verstärkter Bedarf an Nickel im Szenario mit hoher Nachfrage zu rund einer Verdreifachung des aktuellen Bedarfs führen.

4.2.1.5 Mangan

unbedeutender Anstieg

Von den derzeit rund vier Millionen Tonnen an eingesetztem Mangan kommt nur ein Bruchteil in Lithium-Ionen-Akkus zum Einsatz. Selbst im Szenario mit hoher Nachfrage nur knapp über den Faktor 0,06 mehr Mangan nachgefragt als ohne starken Anstieg der Elektromobilität.

4.2.2 Brennstoffzelle

Bedeutung der Platingruppen-metalle

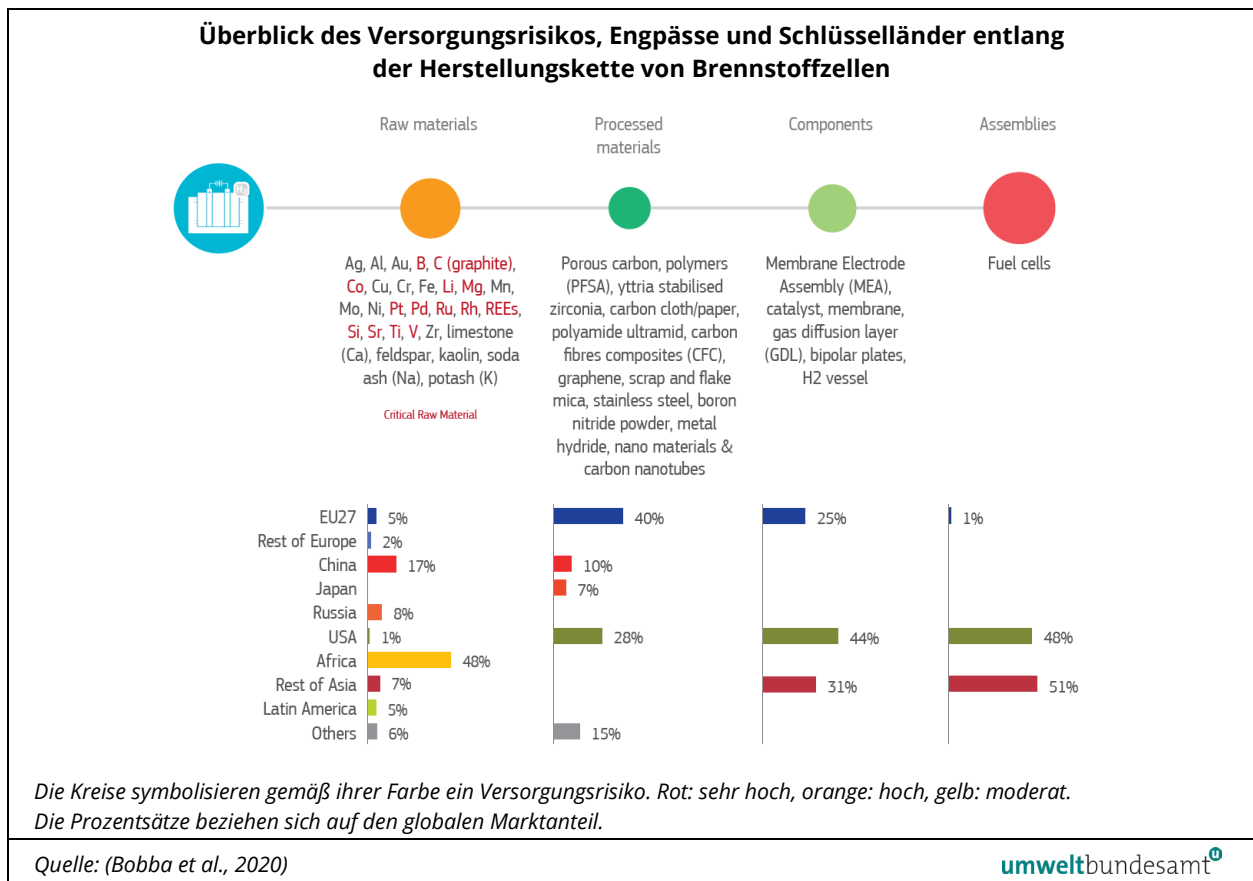
Ein weiterer wesentlicher Bauteil der Elektromobilität ist die Brennstoffzelle. In Brennstoffzellen werden Rohstoffe der Platingruppenmetalle (engl.: Platin Group Metals, kurz: PGM) als Katalysatoren eingesetzt, wobei in der Forschung und technischen Entwicklung das Ziel verfolgt wird, den Anteil dieser teuren Rohstoffe zu reduzieren. PGM werden auch bei ICEV in der Abgasnachbehand-

lung eingesetzt. Zukünftige Brennstoffzellen in der Elektromobilität werden ungefähr die gleiche Menge an PGM benötigen, die derzeit in der Abgasnachbehandlung bei Diesel- oder Benzinfahrzeugen eingesetzt wird – das sind rund drei bis sieben Gramm. Die heutigen Brennstoffzellen benötigen noch eine rund zehnmal größere Menge an PGM. Diese Metalle machen auch rund 50 % der Kosten einer Brennstoffzelle aus.

Die kritischen Rohstoffe, die bei Brennstoffzellen eingesetzt werden, umfassen PGM, Titan, Strontium, Kobalt und Graphit.

Das Versorgungsrisiko entlang der gesamten Herstellungskette ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 10: Überblick des Versorgungsrisikos, Engpässe und Schlüsselländer entlang der Herstellungskette von Brennstoffzellen



Engpässe in Lieferkette

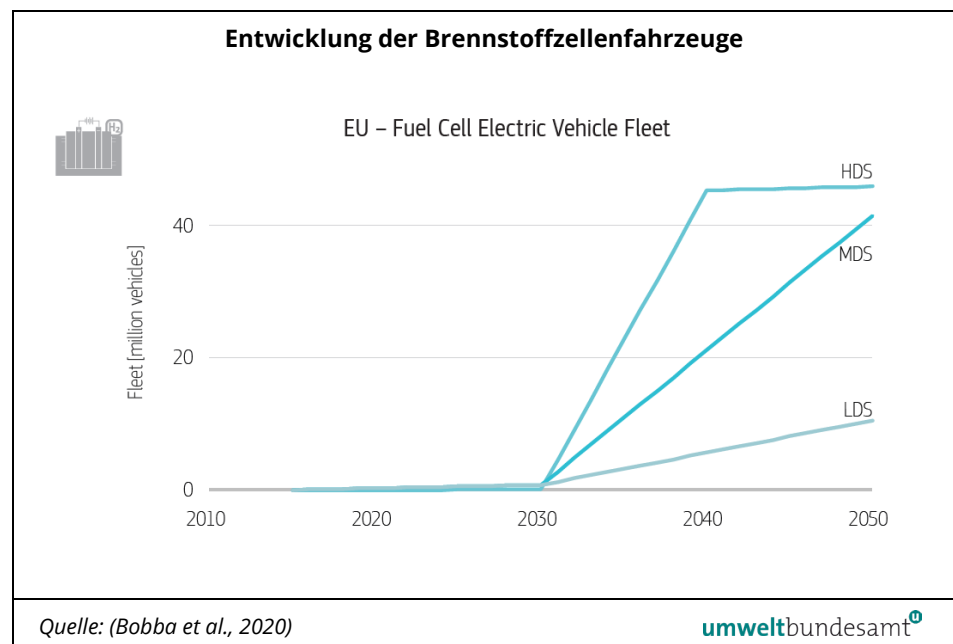
Im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus zeigt sich eine deutlich reduzierte Abhängigkeit von China. Für die Europäische Union ergibt sich bei der Rohstoffbereitstellung eine höhere Eigenversorgung, welche mit 5 % aber immer noch sehr gering ist. Südafrika ist das Hauptabbaugebiet für PGM. Bei den verarbeiteten Materialien zeigt sich eine Eigenversorgung von 40 % und bei der Herstellung der Bestandteile von 25 % für die Europäische Union. Lediglich bei der Brennstoffzellenproduktion liegt die Eigenversorgung bei nur 1 %, hier gibt es eine

hohe Abhängigkeit von den USA und Asien (ohne China oder Japan). Diese beiden Regionen sind auch die Hauptquellen für die Bestandteile der Brennstoffzellen, wobei die USA zusätzlich auch eine sehr relevante Quelle für die verarbeiteten Materialien darstellt.

Hauptinsatzgebiete Brennstoffzellen werden in Zukunft in Energieversorgung und Elektromobilität verstärkt zum Einsatz kommen, wobei der Einsatz bei der Energieversorgung den Bedarf an Zellen prägt, insbesondere durch große industrielle Anlagen.

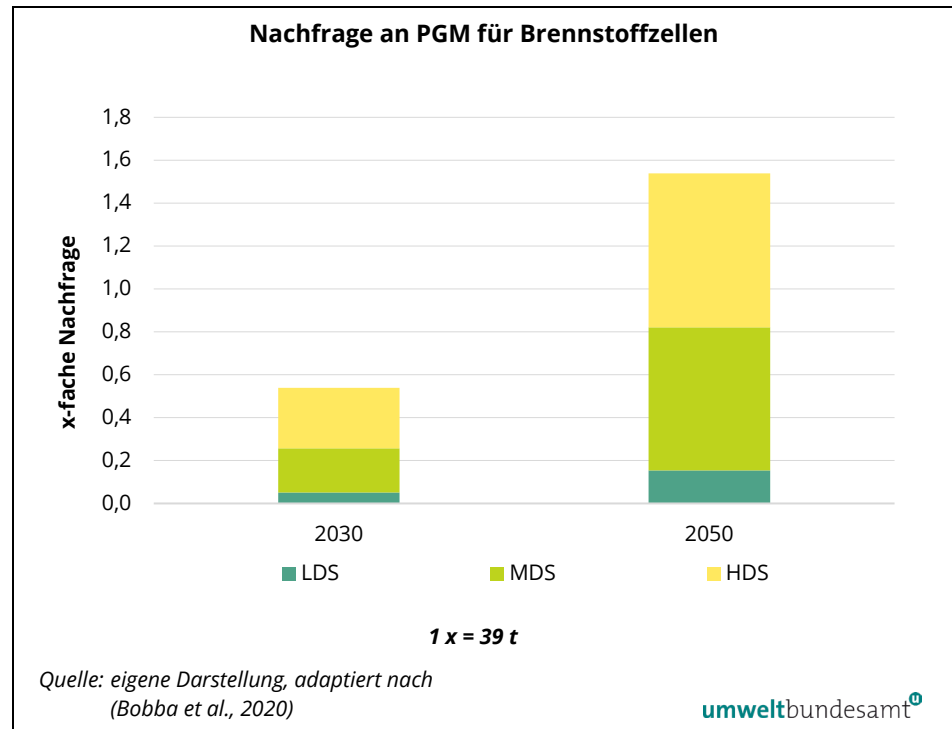
Flottenentwicklung Die Zahl der Brennstoffzellenfahrzeuge wird bis 2050 in der Europäischen Union stark steigen, jedoch deutlich unter den Zahlen für BEV liegen. Die Entwicklung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 11:
Entwicklung der Brennstoffzellenfahrzeuge für drei unterschiedliche Nachfrageszenarien mit jeweils niedriger (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS) für die Europäische Union



PGM wurde als kritisch eingestuft. Das Verhältnis der derzeitigen Nachfrage zur erhöhten Nachfrage für die drei unterschiedlichen Szenarien ist in der folgenden Abbildung 12 dargestellt.

Abbildung 12:
Bedarf an PGM für Elektromobilität und andere Anwendungen im Bereich erneuerbarer Energien für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum jeweils im Szenario mit niedriger (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS).



Nachfrageentwicklung PGM

Derzeit werden pro Jahr rund 39 000 Tonnen PGM in der Europäischen Union eingesetzt. Bis 2050 kann sich die Nachfrage nach PGM für Elektromobilität und andere Anwendungen im Bereich erneuerbarer Energien im Vergleich zur derzeitigen Nachfrage um den Faktor 1,5 erhöhen.

4.2.3 Elektromotor

Elektromotoren werden in sehr vielen Anwendungen eingesetzt und rund 50 % des gesamten in der Europäischen Union eingesetzten Stromes wird für den Betrieb von Elektromotoren verwendet.

eingesetzte Rohstoffe

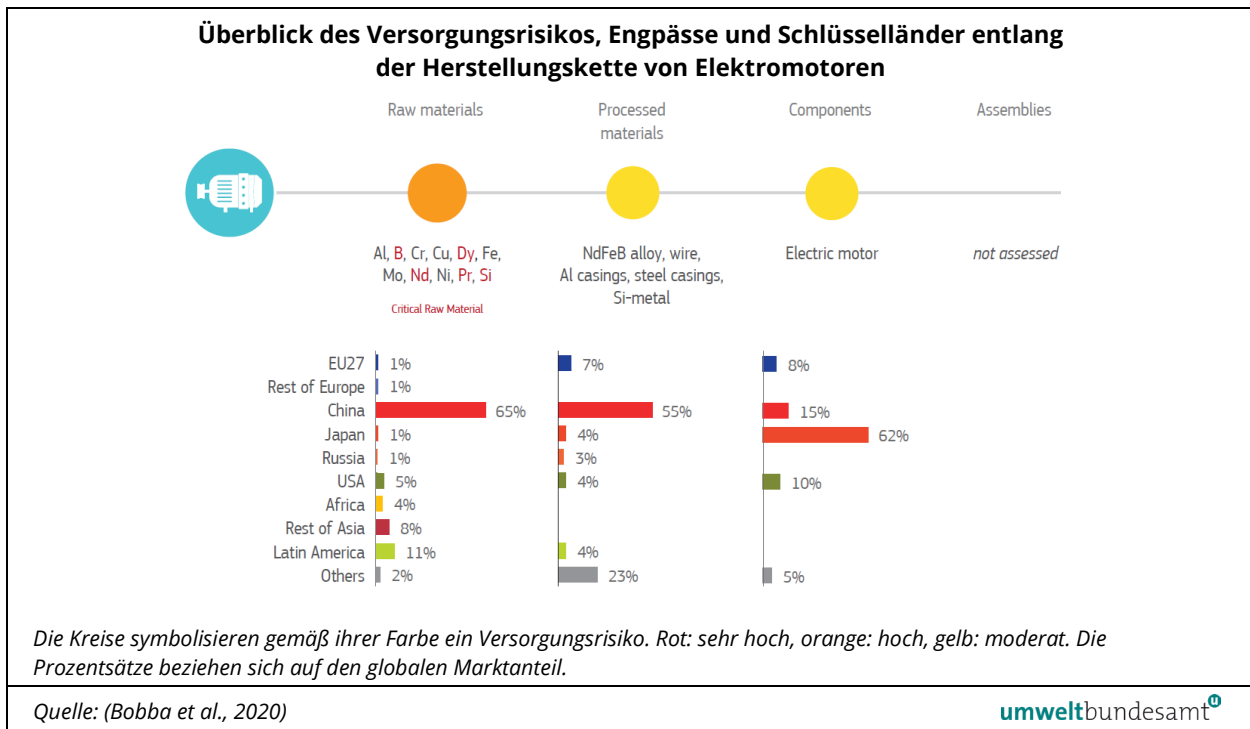
Beim Elektromotor für die Elektromobilität ist insbesondere der Permanentmagnet der Synchronmotoren ein kritischer Bauteil. In den meisten Anwendungen wird ein Permanentmagnet aus Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) verwendet und in einem Synchronmotor eingesetzt. Bei diesen NdFeB-Magneten kommen auch andere Seltene Erden wie Dysprosium oder Praseodym zum Einsatz. Bei einigen Herstellern wird anstelle eines Synchronmotors ein Induktionsmotor (Asynchronmotor) eingesetzt, welcher große Mengen an Kupfer benötigt, da in diesen Kupferspulen Strom induziert wird, der den Motor betreibt. Bei allen Arten an Motoren werden außerdem größere Mengen an Stahl und Aluminium benötigt.

Neben der Anwendung in der Elektromobilität kommen Permanentmagneten auch in einer relevanten Menge bei Windkraftanlagen vor.

Die als kritisch eingestuft Rohstoffe für Elektromotoren umfassen Bor, Neodym, Dysprosium und Praseodym.

Das Versorgungsrisiko entlang der gesamten Herstellungskette ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 13: Überblick des Versorgungsrisikos, Engpässe und Schlüsselländer entlang der Herstellungskette von Elektromotoren



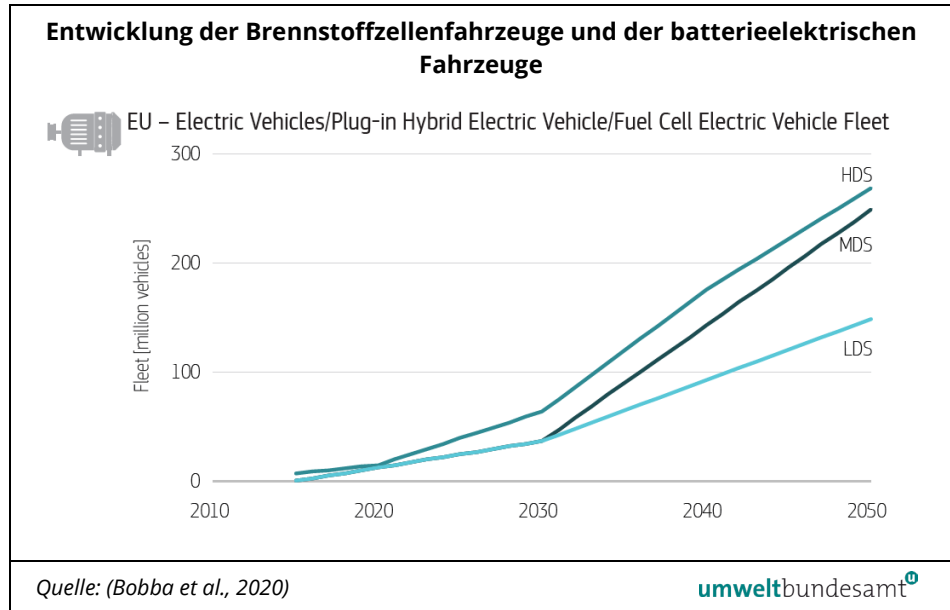
Engpässe in Lieferkette

Bei den Rohstoffen zeigt sich eine große Abhängigkeit von China, wobei China auch die wesentliche Quelle für die benötigten verarbeiteten Materialien ist. Die einzelnen Bauteile stammen vorwiegend aus Japan. Die Eigenversorgung an Rohstoffen in der Europäischen Union liegt bei lediglich 1 %. Für die benötigten Seltenen Erdmetalle herrscht eine 100 %ige Importabhängigkeit.

Flottenentwicklung

Elektromotoren werden sowohl bei BEV als auch bei FCEV eingesetzt, daher müssen beide Fahrzeugtypen für die Abschätzung der Entwicklung der Fahrzeugflotte herangezogen werden. Diese Entwicklung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 14: Entwicklung der Brennstoffzellenfahrzeuge und der batterieelektrischen Fahrzeuge für drei unterschiedliche Szenarien mit niedriger (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS) für die Europäische Union

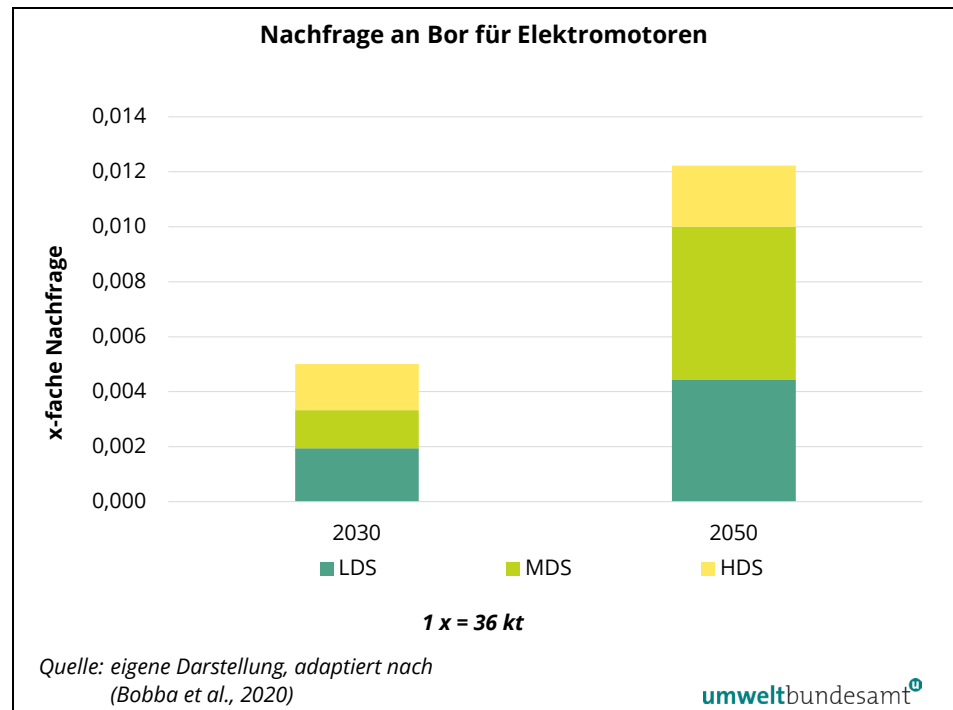


4.2.3.1 Bor

geringe Relevanz für E-Mobilität

Die derzeit in der Europäischen Union eingesetzte Menge an Bor beträgt rund 36 000 Tonnen pro Jahr. Nur ein sehr geringer Teil wird für die Elektromobilität aufgewendet.

Abbildung 15: Bedarf an Bor für Elektromobilität für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum jeweils im Szenario für niedrige (LDS), mittlere (MDS) und hohe Nachfrage (HDS).

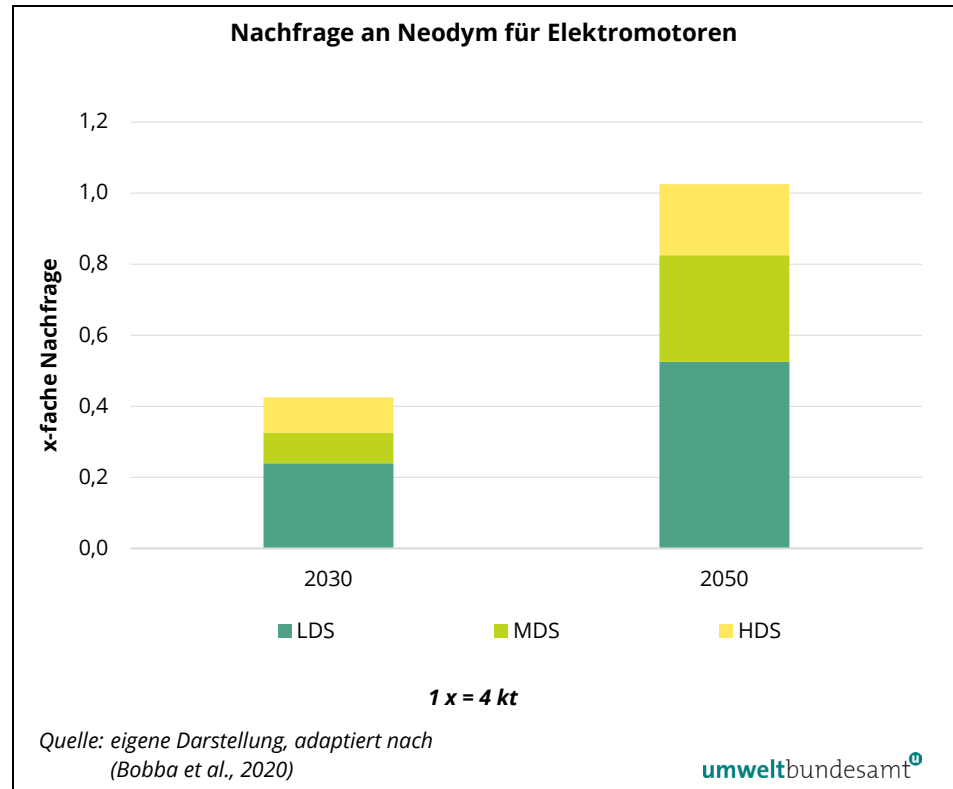


Selbst beim Szenario der starken Nachfrage ist der Bedarf an Bor nicht signifikant erhöht.

4.2.3.2 Neodym

In der Europäischen Union werden derzeit rund vier Kilotonnen an Neodym im Jahr eingesetzt. Ein starker Zuwachs an Elektrofahrzeugen kann die Nachfrage nach Neodym bis 2050 verdoppeln.

Abbildung 16: Bedarf an Neodym für Elektromobilität für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum, jeweils im Szenario mit niedriger (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS).

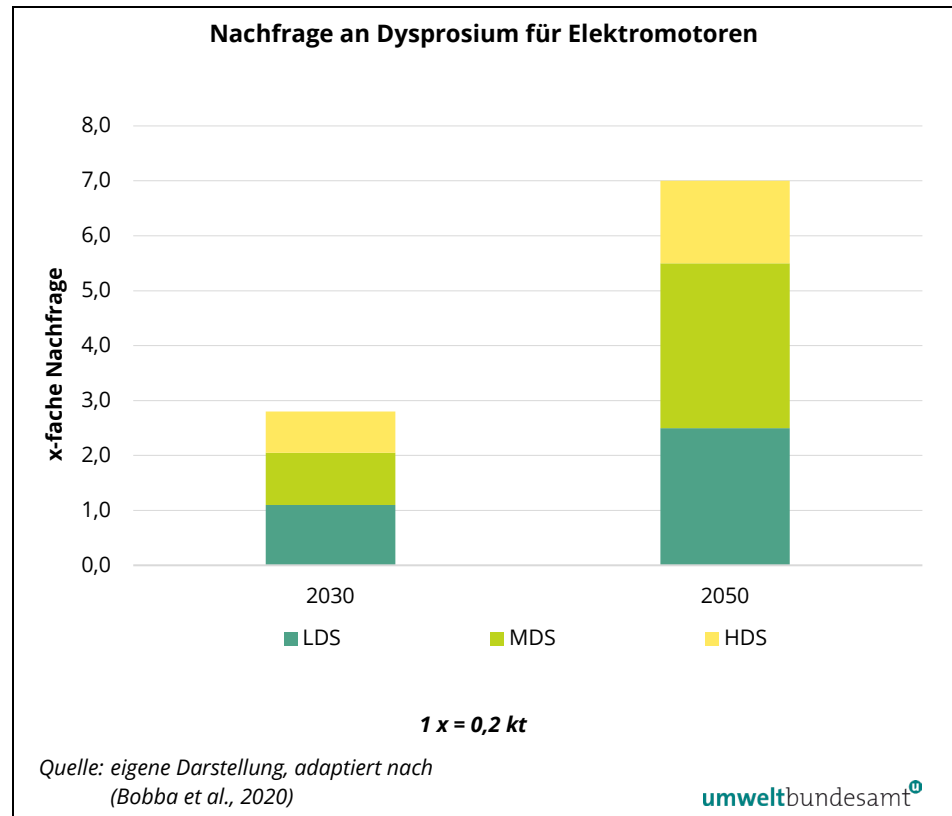


Bei starker Durchsetzung der Elektromobilität würde die derzeit eingesetzte Menge an Neodym im Jahr 2050 zur Gänze für die Elektromobilität aufgehen.

4.2.3.3 Dysprosium

In der Europäischen Union werden derzeit nur rund 200 Tonnen an Dysprosium eingesetzt. Diese Menge kann durch einen starken Hochlauf der Elektromobilität deutlich zunehmen.

Abbildung 17: Bedarf an Dysprosium für Elektromobilität für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum (Bobba et al., 2020), jeweils im Szenario mit niedriger (LDS), mittlerer (MDS) und hoher Nachfrage (HDS).



Nachfrageausweitung möglich

Die derzeitige Nachfrage kann sich im Szenario mit großer Nachfrage bis um den Faktor sieben erhöhen, das heißt allein im Bereich der Elektromobilität werden dann 1 400 Tonnen Dysprosium benötigt.

5 AUSGEWÄHLTE KRITISCHE ROHSTOFFE DER ELEKTROMOBILITÄT

Im folgenden Kapitel werden einige als kritisch eingestufte Rohstoffe näher beleuchtet und Vorkommen, Herstellung und Aufbereitung, Verteilung der Anwendungen und etwaige soziale und ökologische Probleme aufgezeigt.

geologische Begriffe

Begriffsdefinitionen aus dem Bereich der Geowissenschaften:

- **Magmatisch:** Erstarrungsgestein, d. h. abkühlungsbedingtes Erstarren einer Gesteinsschmelze (Magma)
- **Lateritisch:** Laterite sind ein häufiges, oberflächennahes, supergen gebildetes Produkt in tropischen Klimazonen, welches durch intensive, langanhaltende allitische (chemische) Verwitterung von Gesteinen entsteht.
- **Ultramafischen:** ein magmatisches Gestein, dass zu 90 Volumenprozent aus mafischen Mineralien (in hohem Maße magnesium- und eisenhaltig) besteht
- **Synsedimentär:** Strukturen, die sich zeitgleich mit der Ablagerung eines Sediments bilden

5.1 Lithium

einzigartige Eigenschaften

Für die Elektromobilität ist Lithium unerlässlich. Die einzigartigen Eigenschaften (Elektronennegativität, Dichte etc.) bedeuten aus heutiger Sicht und anders als für viele Kathodenmaterialien, dass es zumindest kurzfristig noch keine Alternative zu diesem Rohstoff gibt.

5.1.1 Vorkommen und Herstellung

Häufigkeit

Lithium ist Bestandteil der Erdkruste und dort in einer Häufigkeit von 0,006 % vorhanden. Wirtschaftlich wichtige Lithiumquellen sind einerseits Festgesteins- (z. B. Australien, Kanada und Simbabwe) und andererseits Solevorkommen (Salzseen, z. B. in Chile und Argentinien). Die Bedeutung der Gewinnung von Lithium aus südamerikanischen Salzseen ist im Abnehmen und liegt derzeit bei rund 33 % (Öko-Institut e.V., 2020).

Lithiumhaltige Materialien befinden sich weiters in Grundwässern von Öllagerstätten, Tiefseegewässern oder in Tonen. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Arten des Vorkommens kann aber als eher gering eingestuft werden.

wichtigste Länder

Tabelle 4 gibt Auskunft darüber, wie die globale Lithiumproduktion auf die wichtigsten Länder verteilt ist. Die Reserven an Lithium erhöhten sich innerhalb von nur zwei Jahren um fünf Millionen Tonnen.

Tabelle 4: *Minenproduktion von Lithium nach den wichtigsten Ländern 2021 (U.S. Geological Survey, 2020; U.S. Geological Survey, 2022).*

	Minenproduktion in Tonnen				Reserven in Tonnen	
	2018	2019	2020	2021	2020	2022
Argentinien	6 400	6 400	5 900	6 200	1 700 000	2 200 000
Australien	58 800	42 000	39 700	55 000	2 800 000	5 700 000
Brasilien	300	300	1 420	1 500	95 000	95 000
Chile	17 000	18 000	21 500	26 000	8 600 000	9 200 000
China	7 100	7 500	13 300	14 000	1 000 000	1 500 000
Kanada	2 400	200	n.a.	n.a.	370 000	n.a.
Portugal	800	1 200	348	900	60 000	60 000
USA	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	630 000	750 000
Zimbabwe	1 600	1 600	417	1200	230 000	220 000
andere	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1 100 000	2 700 000
Welt (gerundet)	95 000	77 000	82 500	100 000	17 000 000	22 000 000

Lithiumhaltige Festgesteinsarten werden durch mechanische Verarbeitungsschritte (Sortieren, Brechen, Mahlen, Dichtentrennung, Abscheidemechanismen, Flotation, Waschen, Filtrieren etc.) aufbereitet. Im Zuge des Produktionsprozesses wird das Produkt veredelt.

**Verarbeitung
Solevorkommen**

Bei der Lithiumgewinnung aus flüssiger Sole wird diese durch Bohrlöcher an die Oberfläche gepumpt, anschließend wird die Flüssigkeit durch Evaporation (Verdunsten) in nacheinander geschalteten Becken aufkonzentriert. Nun muss weniger Volumen weiterverarbeitet werden, was Kosten spart.

Der weitere chemische Prozess unterscheidet sich nach der Art des Gesteinsvorkommens sowie des gewünschten Zwischenproduktes (z. B. Lithiumkarbonat, Lithiumhydroxid oder Lithiumchlorid). Ziel ist wieder eine weitere Reduktion der Störstoffe sowie eine Aufkonzentrierung des Lithiums.

Reinheitsgrade

Es wird unterschieden zwischen „technical grade“- sowie „chemical grade“-Lithium, für die Akkuproduktion wird das reinere „chemical grade“-Produkt verwendet.

**Weiterverarbeitungs-
tungsländer**

Die wichtigsten Länder der Weiterverarbeitung und Produktion von wirtschaftlich nutzbaren Lithiumchemikalien (Lithiumkarbonat und Lithiumhydroxid) sind Chile mit rund 44 % der globalen Produktion, gefolgt von China mit knapp 40 %.

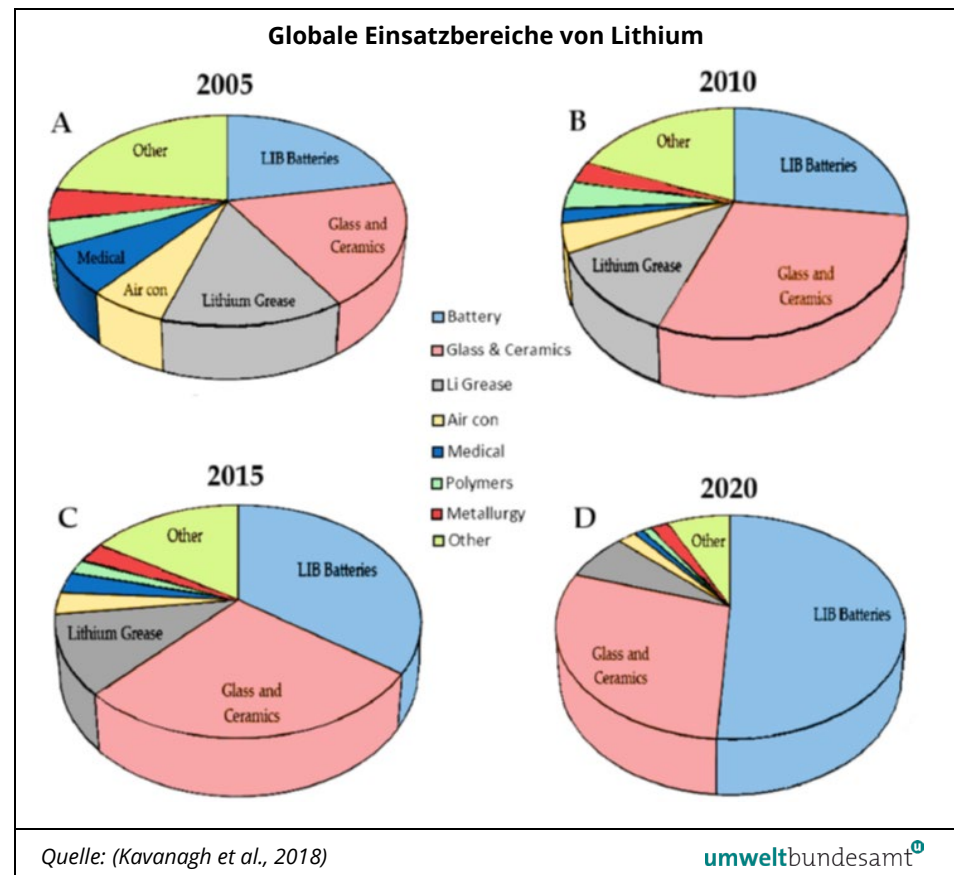
5.1.2 Anwendungsbereiche

**Mengen-
verschiebungen**

Die global eingesetzte Menge an Lithium betrug für 2020 rund 14 000 Tonnen (Kavanagh et al., 2018), wobei davon rund 6 000 Tonnen in der EU eingesetzt werden. 2005 wurden weltweit rund 3 000 Tonnen an Lithium eingesetzt, insbesondere in der Glas- und Keramikherstellung sowie für Lithiumseife (Li Grase).

Seit kurzem liegt das Haupteinsatzgebiet von Lithium jedoch in den Batterien und der Anteil wird zukünftig noch stark steigen.

Abbildung 18:
Globale Einsatzbereiche
von Lithium 2005, 2010,
2015 und 2020



5.1.3 Soziale und ökologische Herausforderungen

negative Auswirkungen auf Wasserkreislauf

Ein großes Problem bei der Lithiumproduktion aus Salzseen aus dem Lithiumdreieck zwischen Chile, Bolivien und Argentinien liegt einerseits darin, dass dieser Vorgang mittels Verdunsten von Salzwasser in riesigen Becken erfolgt und andererseits, dass dies in Regionen geschieht, die eine sehr geringe Niederschlagsmenge aufweisen. Da das Verdunstungswasser nicht aufgefangen und wieder in den regionalen natürlichen Kreislauf zurückgeführt wird, sinkt der Grundwasserpegel in dieser Region und Flussläufe sowie Feuchtgebiete trocknen aus. Die Auswirkungen auf das empfindliche Ökosystem sind drastisch, aber auch die indigene Bevölkerung, die traditionell in der Landwirtschaft beschäftigt ist, leidet mittlerweile unter Wassermangel.

Giftschlamm

Beim Abbau des lithiumhaltigen Minerals Spodumen in Australien bleiben, wie bei vielen metallischen Herstellungsverfahren, Reststoffe zurück. Bei der Aluminiumverhüttung fallen beispielsweise große Mengen an Rotschlamm an, welcher mit Schwermetallen und anderen hochgiftigen Ablagerungen angereichert wird und in großen Absetzbecken gesammelt werden. Dambrüche wie 2019 in einer brasilianischen Eisenerzmine oder der Kolontár-Dambruch am 4. Oktober 2010 in Westungarn zeigen, wie risikobehaftet diese Art der Lagerung sein

kann. Diese Problematik ist generell bei der Herstellung von (metallischen) Rohstoffen und so auch bei der Lithiumproduktion zu beachten.

5.2 Kobalt

abnehmende Bedeutung Obwohl Kobalt ist derzeit einer der wesentlichen Rohstoffe der Elektromobilität. Zukünftig ist jedoch zu erwarten, dass seine Bedeutung in der Elektromobilität abnehmen wird. Dies liegt u. a. daran, dass in der Forschung zu Lithium-Ionen-Akkus verstärkt auf kobaltfreie Alternativen fokussiert wird (vgl. Kapitel 2.1).

5.2.1 Vorkommen

Kobalt kommt in der Erdkruste mit einer Häufigkeit von 0,003 % vor und ist in der Regel in Erzen oder Mineralien mit Nickel, Eisen, Kupfer, Silber oder Uran vergesellschaftet. Die Ressourcen an Kobalt liegen hauptsächlich im Kongo, relevante Vorkommen gibt es auch in Australien und auf Kuba. Der Abbau beschränkt sich aus wirtschaftlichen Gründen auf wenige Länder.

geschätzte Reserven Die geschätzten Reserven an Land belaufen sich auf rund sieben Millionen Tonnen. Im Vergleich zu den Ressourcen auf dem Meeresgrund mit 120 Millionen Tonnen Kobalt sind diese aber verschwindend gering. Auf dem Tiefseemeeresgrund (rund 5 000 Meter Tiefe) befinden sich sogenannte Eisen-Mangankrusten oder -knollen, in denen sich wertvolle Metalle über Jahrtausende zu festen Kernen ansammeln konnten. Diese Knollen sind von der Größe ähnlich einem Kartoffelkopf und beinhalten viele wertvolle Metalle wie Kupfer, Nickel oder eben Kobalt (Die ZEIT, 1. Juni 2019). Der Masseanteil beträgt dabei rund 3 %. Es wird intensiv an der Förderung geforscht und Pilotprojekte auch schon umgesetzt. Eines der ersten Projekte wurde schon in den 1970er Jahren durchgeführt.

ökologische Auswirkungen Neben der Wirtschaftlichkeit sind insbesondere die ökologischen Auswirkungen sehr problematisch. Der Meeresgrund ist eigentlich noch nicht erforscht, lediglich 0,1 % des Tiefseebodens wurde wissenschaftlich analysiert (UBA, 2021). Die Auswirkungen einer industriellen Förderung von Manganknollen sind daher nicht abschätzbar. Es zeigt sich jedoch schon in den wenigen Pilotprojekten, dass sich der Meeresgrund nach einem Eingriff nur extrem langsam erholen kann. Auch 40 Jahre nach Förderung der Knollen sind die Spuren des Eingriffes an einer Pilotstelle noch deutlich sichtbar. Andere negative ökologische Auswirkungen durch das Aufwirbeln von Sedimenten und die Entstehung von Trübungswolken können auch weit entfernt vom tatsächlichen Förderort auftreten. Das Umweltbundesamt Deutschland stuft die Umweltauswirkung als erheblich ein (UBA, 2021).

5.2.2 Herstellung und Aufbereitung

syndimentär Die wichtigste Gesteinsart für den Kobaltabbau sind gegenwärtig schichtgebundene syndimentäre kobaltführende Kupferlagerstätten. Diese befinden sich hauptsächlich in der demokratischen Republik Kongo sowie in Sambia (im sogenannten „African copperbelt“).

basisch (Ultra-)basische Gesteine, welche durch magmatische Differentiation entstanden sind, enthalten ebenfalls Kobalt, wobei diese meist mit anderen Metallen (z. B. Nickel oder Chrom) gleichzeitig vorhanden sind. Wichtige Lagerstätten befinden sich in Botswana, Simbabwe, Finnland, Russland und Kanada.

lateritisch Eine weitere Anreicherung von Kobalt kann bei lateritischer Verwitterung von ultramafischen speziellen Gesteinen geschehen (sogenannte Nickellaterit-Lagerstätten). Solche Lagerstätten sind in Papua-Neuguinea, Neukaledonien, Indonesien, Philippinen, Kuba und Australien vorhanden.

Bedeutung Kongo Tabelle 5 zeigt die Gesamtförderung von Kobalt für 2017 bis 2021 nach Ländern. Es ist zu erkennen, dass der Großteil des weltweit geförderten Kobalts aus der Demokratischen Republik Kongo stammt (71 %). In diesem Land sind auch die meisten der globalen Reserven an Land zu finden (rund 46 %).

Tabelle 5: Globale Minenproduktion und Reserven von Kobalt (U.S. Geological Survey, 2020; U.S. Geological Survey, 2022).

	Minenproduktion in Tonnen				Reserven in Tonnen	
	2018	2019	2020	2021	2020	2022
Australien	4 880	5 100	5 630	5 600	1 200 000	1 400 000
China	2 000	2 000	2 200	2 200	80 000	80 000
Indonesien	n a	n a	1 100	2 100	n a	600 000
Kanada	3 520	3 000	3 690	4 300	230 000	220 000
Kongo	104 000	100 000	98 000	120 000	3 600 000	3 500 000
Kuba	3 500	3 500	3 800	3 900	500 000	500 000
Madagaskar	3 300	3 300	850	2 500	120 000	100 000
Marokko	2 100	2 100	2 300	2 300	18 000	13 000
Papua-Neuguinea	3 280	3 100	2 940	3 000	56 000	47 000
Philippinen	4 600	4 600	4 500	4 500	260 000	260 000
Russland	6 100	6 100	9 000	7 600	250 000	250 000
USA	490	500	600	700	55 000	69 000
andere	7 840	8 100	7 640	6 600	620 000	610 000
Welt (gerundet)	148 000	140 000	142 000	170 000	7 000 000	7 600 000

Kobalt wird der Weltwirtschaft als Primär- (Abbau) sowie als Sekundärrohstoff (Recycling) zugeführt. Die Primärversorgung setzt sich zu 84 % aus industriellem und 16 % aus kleinbergbaulichem (artisanalem) Abbau zusammen.

Die Aufbereitung von Kobalterzen bzw. anderer Verbindungen zu wirtschaftlich nutzbarem Kobalt erfolgt hauptsächlich (rund 60 %) in China (DERA, 2018). Andere wichtige Länder der Raffinadeproduktion sind Finnland, Belgien und Kanada.

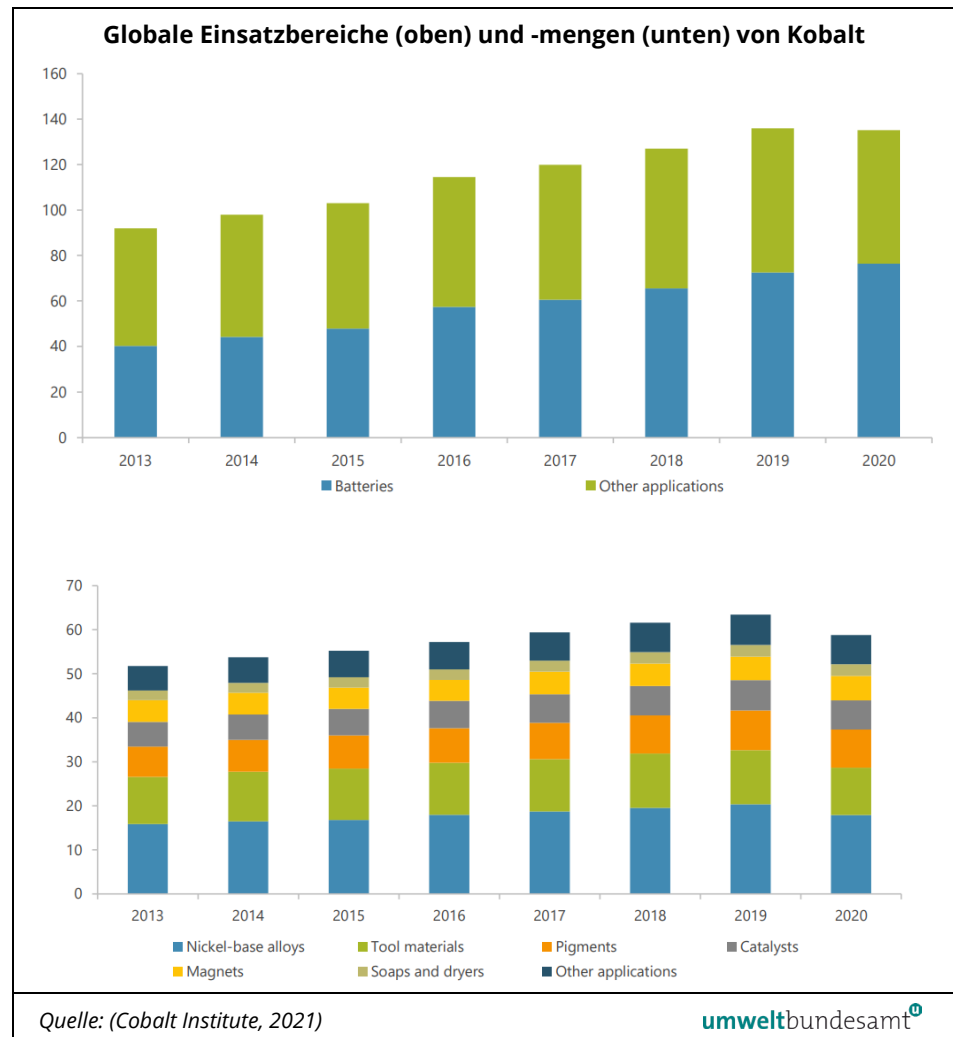
Innerhalb nur weniger Jahre hat sich die Menge an Reserven um knapp 10 % erhöht.

5.2.1 Anwendungsbereiche

Nachfrage-entwicklung

Zwischen 2001 und 2017 ist die gesamte globale Nachfrage nach Kobalt jährlich um durchschnittlich 6,6 % gewachsen. Ab 2018 verlangsamte sich die Nachfrage und liegt 2020 bei rund 120 Kilotonnen pro Jahr. Dies ist innerhalb des Zeitraumes von 2001 bis 2021 fast eine Verdreifachung der eingesetzten Menge (vgl. Abbildung 19). Die Einsatzmenge in der Europäischen Union beläuft sich auf rund 30 Kilotonnen (vergleiche Kapitel 4.2.1.1).

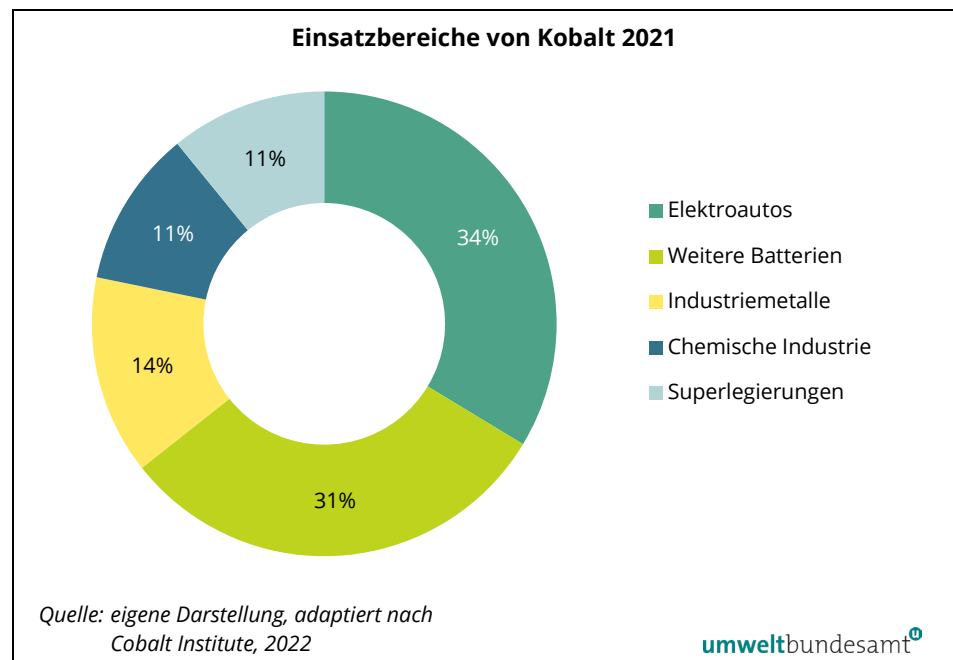
Abbildung 19:
Globale Einsatzbereiche
(oben) und -mengen (un-
ten) von Kobalt



Die Nachfrage nach Kobalt ist seit wenigen Jahren in erster Linie durch Anwendungen in Lithium-Ionen-Akkus geprägt (siehe *Abbildung 19*), wobei hier die Elektromobilität bis 2017 noch eine sehr untergeordnete Rolle spielte. Bis 2017 handelt es sich bei den Akkus vorwiegend um Anwendungen bei mobilen Endgeräten, wie Laptops, Mobiltelefonen etc. Andere wichtige Anwendungsbereiche sind Keramik und Farbstoffe (Pigmente), wobei Kobalt hier die klassische blaue Farbe hervorruft. Weitere technische Einsatzbereiche stellen die Superlegierungen und die Stahlbeimischung (Nickel-base alloys) dar. In geringen Mengen wird Kobalt als Katalysator bei der Treibstoffherstellung in der Raffinerie benötigt. Weiters wird es im Automobilbau, beispielsweise in Kurbel- und Nockenwellen, in Pleuelstangen, Ventil Sitzringen sowie in Reifen eingesetzt.

Im Jahr 2021 ist der Einsatz von Kobalt in Elektrofahrzeugen schon das größte Anwendungsgebiet.

Abbildung 20:
Einsatzbereiche von
Kobalt 2021



5.2.2 Soziale und ökologische Herausforderungen

Arbeitsbedingungen

Die globale Kobaltförderung wird seit geraumer Zeit von Menschenrechts- und Umweltorganisationen kritisiert. Der Abbau von Kobalt wird oft mit menschenunwürdigen Arbeitsbedingungen und Umweltzerstörung in Verbindung gebracht (Welt.de, 2019). Das Magazin „Die Furche“ berichtet, dass „ein Fünftel des Vorkommens im Kongo von Minenarbeitern unter widrigsten Bedingungen mit bloßen Händen gefördert wird“. Die Arbeiter:innen würden über keine Schutzkleidung bzw. -helme verfügen, auch von Kinder- sowie Zwangsarbeit wird berichtet (Die Furche, 24. Mai 2018).

Kinderarbeit

Die Deutsche Rohstoffagentur hat dem Thema eine eigene Publikation gewidmet (BGR, 2019). Im Zuge des Projektes wurden 58 Kobaltminen in der Demo-

kratischen Republik Kongo (Provinzen Haut-Katanga und Lualaba) vor Ort besucht. 80 % bis 90 % des abgebauten Kobalts stamme aus industriellem, 10 % bis 20 % aus kleinbäuerlichem (artisanalem) Bergbau. Der industrielle Bergbau laufe über globale Konzerne und diese hielten sich in der Regel „an weltweit geltende Vorschriften“. Beim artisanalen Abbau jedoch komme es teilweise zu massiven Problemen. Unsichere Arbeitsbedingungen, illegaler Abbau (auch teilweise auf Gebieten industrieller Minen) und sehr geringer Lohn sind Punkte, die bestätigt werden können. Es müsse sich außerdem genau angesehen werden, aus welchen Gründen Kinder in Minen präsent sind (nur weil Kinder anwesend sind heißt das nicht, dass es sich automatisch um Kinderarbeit handelt). Weiters wird unterschieden zwischen der Arbeit an der „Abbaufont“ sowie leichteren Arbeiten (oberirdisches Auflesen oder Sortieren von Erzstücken) – eine Erkenntnis des Projektes ist, dass Kinderarbeit nicht gleich Kinderarbeit ist. Auf zwei der insgesamt 58 besuchten Kobaltminen konnte schwerste Kinderarbeit beobachtet werden, auf den restlichen 56 waren insgesamt ca. 2 500 Kinder anwesend oder verrichteten leichtere Tätigkeiten. Eine weitere interessante Erkenntnis der Studie ist, dass in knapp 60 % der Minen Vertreter staatlicher Behörden getroffen wurden, deren Aufenthalt prinzipiell auf keiner Rechtsgrundlage fußt. Was daraus geschlossen werden kann, sei dem:der Leser:in überlassen (Der Spiegel, 17. Oktober 2019).

Initiative zur Verbesserung

Im September 2019 startete eine Initiative von BMW, BASF und Samsung in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), die einen nachhaltigen Kobaltabbau in der DR Kongo zum Ziel hat. Das Projekt untersucht nur eine Pilotmine. Innerhalb des Projektzeitraumes von drei Jahren soll untersucht werden, wie sich die Arbeits- sowie Lebensbedingungen im artisanalen Bergbau kongolesischer Arbeiter:innen verbessern lassen können (BASF, 2019).

5.3 PGM

Unter der Platinmetallgruppe (PGM) werden die Edelmetalle Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium und Platin zusammengefasst. Alle Metalle dieser Gruppe weisen ähnliche Dichte und Eigenschaften auf. Platin ist der bekannteste Vertreter dieser Gruppe und ist häufig auch mit anderen Platinmetallen vergesellschaftet, d.h. sie kommen gemeinsam vor.

5.3.1 Vorkommen und Herstellung

Rolle Südafrikas

Die mit Abstand größten Vorkommen liegen in Südafrika im sogenannten Bushveld Komplex. Südafrika ist auch der größte Produzent (Abbau und Herstellung) von PGM, wobei aber die Bedeutung seit einigen Jahren kontinuierlich abnimmt. In Südafrika liegen rund 90 % der derzeit bekannten an PGM-Reserven von knapp 70 Millionen Kilogramm. Die Ressourcen an PGM werden auf rund 100 Millionen Kilogramm geschätzt.

Tabelle 6: Fördervolumen und Reserven für Platin und Palladium (U.S. Geological Survey, 2020; U.S. Geological Survey, 2022).

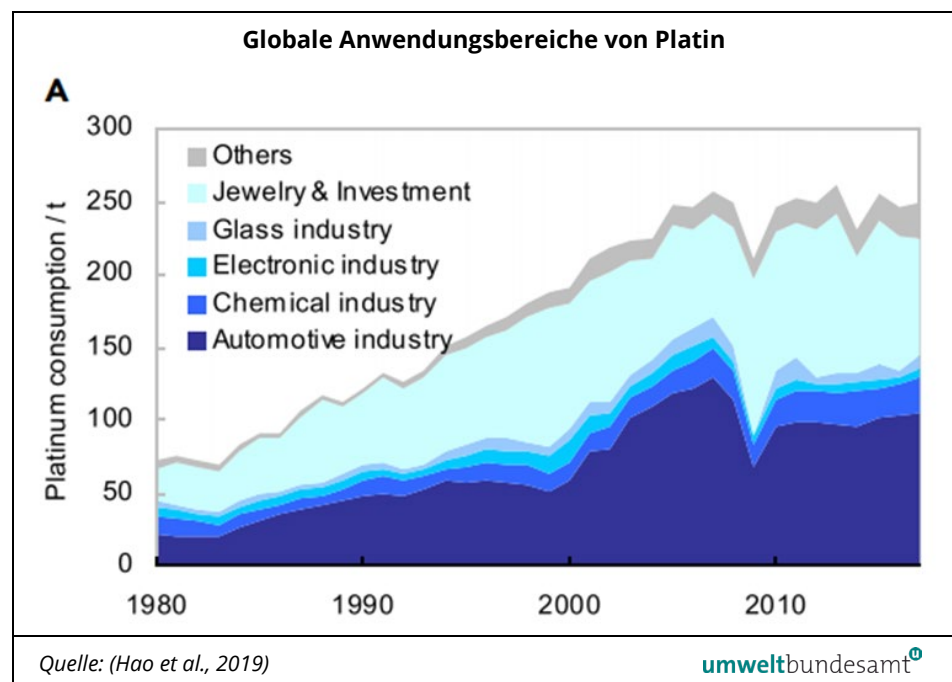
	Palladium, Minenproduktion in kg				Platin, Minenproduktion in kg				Reserven (PGM) in kg	
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2020	2022
Kanada	20 000	20 000	20 000	17 000	7 400	7 400	7 000	6 000	310 000	310 000
Russland	90 000	86 000	93 000	74 000	22 000	22 000	23 000	19 000	3 900 000	4 500 000
Südafrika	80 600	80 000	73 500	80 000	137 000	130 000	112 000	130 000	63 000 000	63 000 000
USA	14 300	12 000	14 600	14 000	4 160	3 600	4 200	4 200	900 000	900 000
Zimbabwe	12 000	12 000	12 900	13 000	15 000	15 000	15 000	15 000	1 200 000	1 200 000
andere	2 920	3 000	2 670	2 800	4 470	4 300	4 320	4 300	n a	n a
Welt (gerundet)	220 000	210 000	217 000	200 000	190 000	180 000	166 000	180 000	69 000 000	70 000 000

Rolle Russlands Neben Südafrika ist Russland von zentraler Bedeutung für die globale Bereitstellung von PGM, insbesondere für die Edelmetalle abseits von Platin. Platin ist oft auch in Verbindung von Nickel anzutreffen bzw. fällt als Nebenprodukt bei der Nickelerzeugung an (Norilsk Bergbauebiet).

5.3.2 Anwendungsbereiche

Die anteilmäßige Verwendung nach Einsatzgebieten von Platin, als bekanntesten Vertreter von PGM, ist in der nachstehenden Abbildung ersichtlich. Die häufigsten Einsatzbereiche umfassen den Automobilsektor (Katalysatoren und Brennstoffzellen) sowie den Bereich der Schmuckindustrie (Hao et al., 2019).

Abbildung 21:
Globale Anwendungsbereiche von Platin



5.3.3 Soziale und ökologische Herausforderungen

hoher Strombedarf Ein ökologisches Problem beim Abbau von PGM ist der erforderliche Stromverbrauch. Südafrikanische Minen liegen teilweise bis zu 1 500 Meter unter Tage und benötigen aufgrund der dortigen hohen Temperaturen von bis zu 45 °C ausgeprägte Kühlsysteme. Der Strommix in Südafrika ist jedoch stark von Kohle abhängig. Weiters beträgt die Konzentration von PGM in Gestein nur wenige Gramm pro Tonne, was einen hohen Gesteinsumsatz notwendig macht, um auf relevante Mengen von PGM zu kommen (Reuter et al., 2019).

5.4 (Natürlicher) Grafit

Grafit als Rohstoff kommt natürlich vor bzw. kann aus kohlenstoffhaltigen Materialien durch Umwandlung von amorphem Kohlenstoff in die kristalline Form gewonnen werden. Der natürlich vorkommende Grafit ist in der Herstellung günstiger und wird demnach weltwirtschaftlich bevorzugt. Die weiteren Ausführungen beschränken sich auf den natürlichen Grafit.

5.4.1 Vorkommen und Herstellung

drei Hauptgesteinsarten Natürliche Grafitvorkommen sind global aufzufinden. Wirtschaftlich nutzbar sind vor allem Gesteinsarten, welche durch metamorphe Prozesse aufgeschlossen werden können. Es gibt drei bedeutende Gesteinsarten für den Grafitabbau, dies sind mikrokristalline (amorph) und kristalline Arten (Flake oder Schuppengrafit). Die beiden letzteren gelten als wirtschaftlich am bedeutendsten.

Chinas Rolle Global werden 320 Millionen Tonnen Grafitvorkommen als abbaubar eingeschätzt und 800 Millionen Tonnen werden vermutet. Als weltweit größter Produzent von natürlichem Grafit gilt China, mit einem Aufkommen von 75 % des Weltmarktanteiles (DERA, 2020; U.S. Geological Survey, 2020, S. 72). China ist mit rund 0,8 Millionen Tonnen nicht nur der größte Produzent von natürlichem Grafit, sondern konsumiert mit rund einer Million Tonnen einen Großteil davon in der eigenen Industrie, unter anderem in der Herstellungskette der unterschiedlichen Bauteile der Elektromobilität. In Europa gibt es die größten Vorkommen in Skandinavien (hauptsächlich in Schweden und Finnland).

In Österreich wird natürliches Grafit im Bergwerk Kaisersberg in der Steiermark angebaut.

Reserven Größere Reserven befinden sich in der Türkei, in Brasilien sowie in Ostafrika. In Tabelle 7 sind Produktionsmengen und die Reserven für unterschiedliche Länder dargestellt.

Tabelle 7: Globale Produktionsmengen und Reserven von (natürlichem) Grafit (U.S. Geological Survey, 2020; U.S. Geological Survey, 2022).

	Minenproduktion in Tonnen				Reserven in Tonnen	
	2018	2019	2020	2021	2020	2022
Brasilien	95 000	96 000	63 600	68 000	72 000 000	70 000 000
China	693 000	700 000	762 000	820 000	73 000 000	73 000 000
Deutschland	800	800	300	300	in Welt inkl.	in Welt inkl.
Indien	35 000	35 000	6 000	6 500	8 000 000	8 000 000
Kanada	40 000	40 000	8 000	8 600	in Welt inkl.	in Welt inkl.
Madagaskar	46 900	47 000	20 900	22 000	1 600 000	26 000 000
Mexiko	9 000	9 000	3 300	3 500	3 100 000	3 100 000
Mozambique	104 000	100 000	28 000	30 000	25 000 000	25 000 000
Namibia	3 460	3 500	n a	n a	in Welt inkl.	n a
Nordkorea	6 000	6 000	8 100	8 700	2 000 000	2 000 000
Norwegen	16 000	16 000	12 000	13 000	600 000	600 000
Österreich	1 000	1 000	500	500	in Welt inkl.	in Welt inkl.
Pakistan	14 000	14 000	n a	n a	in Welt inkl.	n a
Russland	25 200	25 000	25 000	27 000	in Welt inkl.	in Welt inkl.
Sri Lanka	4 000	4 000	4 000	4 300	in Welt inkl.	1 500 000
Tansania	150	150	-	150	18 000 000	18 000 000
Türkei	2 000	2 000	2 500	2 700	90 000 000	90 000 000
Ukraine	20 000	20 000	16 000	17 000	in Welt inkl.	in Welt inkl.
Vietnam	5 000	5 000	5 000	5 400	in Welt inkl.	in Welt inkl.
Welt (gerundet)			966 000	1 000 000	300 000 000	320 000 000

5.4.2 Anwendungsbereiche

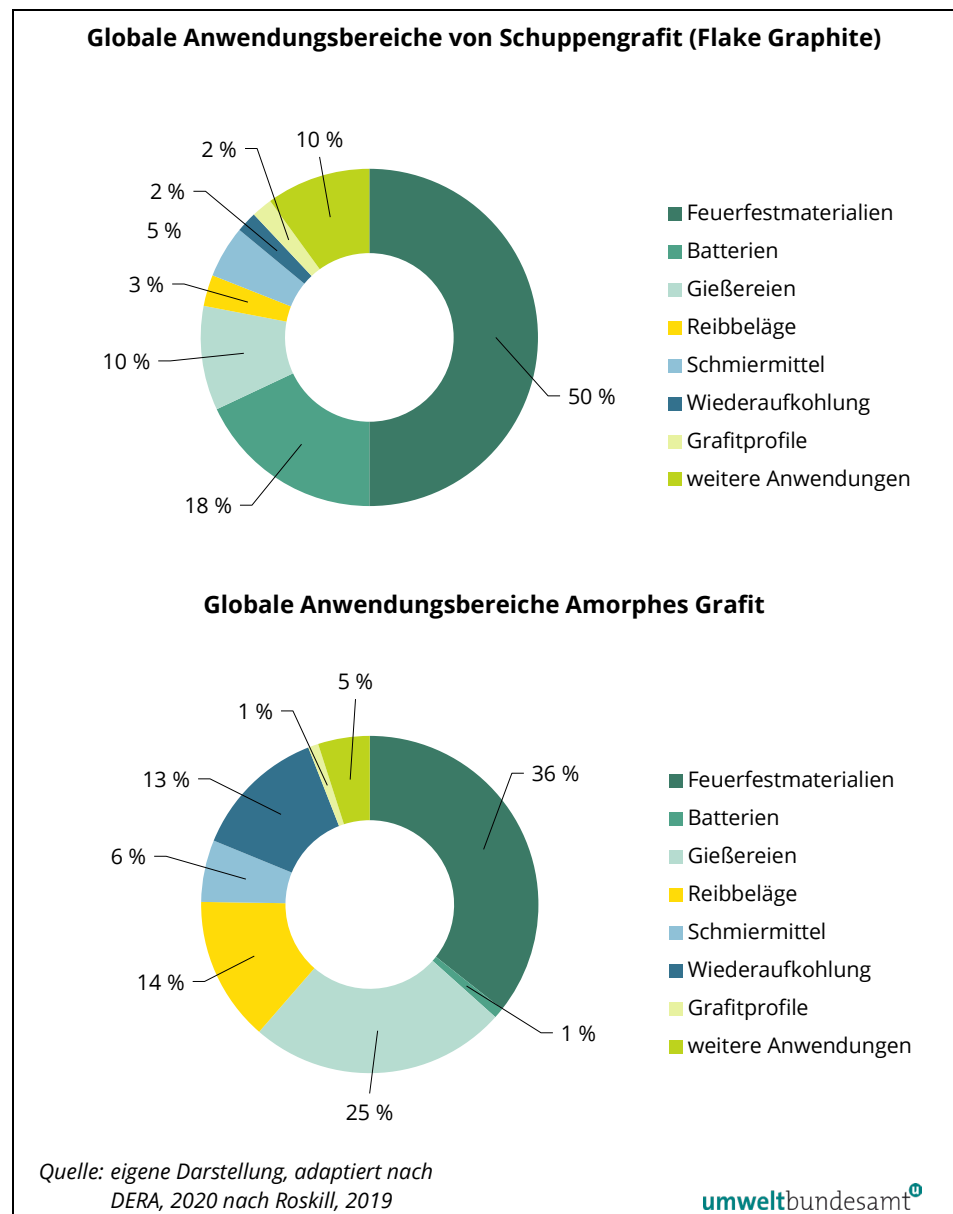
vielfältige nützliche Eigenschaften

Durch die Eigenschaften von Grafit (leicht, weich, gute mechanische und chemische Eigenschaften, einziges Nichtmetall, das Strom leiten kann) ergibt sich ein breites Spektrum an Anwendungsgebieten. Durch die gute Hitzebeständigkeit wird es beispielsweise in Reaktoren oder industriellen Öfen eingesetzt. Der größte Abnehmer ist die Stahlindustrie, auch in Gießwerken wird Grafit im großen Maßstab verwendet.

Weitere Anwendungsfälle sind Akkus, Batterien, Öl- und Schmiermittel sowie geformte Grafitbauteile für den Luftfahrt- und Automobilektor. Ein weiterer bekannter Anwendungsfall ist in Bleistiften, hier ist die Mine meist aus Grafit.

In Abbildung 22 sind die wesentlichen Anwendungsgebiete für kristallines und amorphes Grafit dargestellt (DERA, 2020).

Abbildung 22:
Globale Anwendungsbereiche von Grafit



5.4.3 Soziale und ökologische Herausforderungen

Tagebau Grafit ist inert und stellt damit keine direkte Gefahr für die Umwelt dar. Beim Abbau liegt Grafit zumeist in Kombinationen mit anderen Mineralien (Eisensulfide, Uran, Nickel, Quecksilber etc.) vor. Hier können bei nicht sachgerechter Lagerung des Abraumes Umweltprobleme auftreten. Natürlicher Grafit wird meist im Tagebau abgebaut, da dies kostengünstiger ist. Tagebau, d. h. Abbau an der Oberfläche, führt zu zerstörten Landschaften.

Einsatz von Säuren Ein weiteres Problem ist die Reinigung von Grafit mit anorganischen Säuren. Alle Säuren als Teil eines chemischen Reinigungsprozesses können bei Freisetzung erhebliche Umweltschäden verursachen. Exemplarisch kann hier die Flusssäure angeführt werden, die entstehen kann und extrem giftig und gefährlich ist. Eine sachgerechte und mit strengen Umweltvorschriften vorgegebene Behandlung kann die Gefahr reduzieren. (Dolega, Buchert und Betz, 2020)

5.5 Seltene Erden

Begriffsklärung Seltene Erden sind keine Erden, sondern Mineralien, die in Form von Oxiden vorkommen. Eine Reihe von Bezeichnungen, wie z. B. Seltenerdoxide (SEO) oder Seltenerdmetalle, sind gebräuchlich.

Der Begriff ist irreführend, da diese SEO mit 0,1 % der Erdkruste faktisch nicht selten sind. Sie sind jedoch nur an wenigen Orten in einer Konzentration verfügbar, die den wirtschaftlichen Abbau ermöglicht.

Leichte und schwere SEO Die 17 Elemente der SEO werden in leichte (LSE) und schwere (SEE) Elemente eingeteilt. Für die leichten in großen Mengen vorkommenden SEO zeigt sich ein geringes Versorgungsrisiko. Schwere Seltene Erden hingegen sind in vielen Hightech-Anwendungen, nicht nur in der E-Mobilität, unersetzlich und von hoher strategischer Bedeutung.

*Tabelle 8:
Übersicht der leichten
und schweren Seltener-
doxide. Rot markiert
sind die derzeit wirt-
schaftlich relevanten.*

Leichte Seltene Erden	Schwere Seltene Erden
Scandium Sc	Gadolinium Ga
Lanthan La	Holmium Ho
Cer Ce	Erbium Er
Praesodym Pr	Thulium Tm
Neodym Nd	Ytterbium Yb
Promethium Pm	Lutetium Lu
Samarium Sm	Yttrium Y
Europium Eu	Terbium Tb
	Dysprosium Dy

5.5.1 Vorkommen und Herstellung

Die globale Minenproduktion von Seltenerdoxiden belief sich im Jahr 2021 (U.S. Geological Survey, 2022) in Summe auf 280.000 t pro Jahr. Die globalen Reserven werden auf rund 120 Mio. Tonnen geschätzt. China weist mit rund 170.000 Tonnen an Minenproduktion rund 61% Marktanteil auf. Bei der Raffinadeproduktion liegt der Anteil von China am globalem Markt bei über 95 %.

Tabelle 9: Globale Produktionsmengen und Reserven von Seltenen Erden (U.S. Geological Survey, 2020; U.S. Geological Survey, 2022).

	Minenproduktion in Tonnen				Reserven in Tonnen	
	2018	2019	2020	2021	2020	2022
Australien	21 000	21 000	21 000	22 000	3 300 000	4 000 000
Brasilien	1 100	1 000	600	500	22 000 000	21 000 000
Burma	19 000	22 000	31 000	26 000	n.a.	n.a.
Burundi	630	600	300	100	n.a.	n.a.
China	120 000	132 000	140 000	168 000	44 000 000	44 000 000
Grönland	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1 500 000	1 500 000
Indien	2 900	3 000	2 900	2 900	6 900 000	6 900 000
Kanada	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	830 000	830 000
Madagaskar	2 000	2 000	2 800	3 200	n.a.	n.a.
Russland	2 700	2 700	2 700	2 700	12 000 000	21 000 000
Südafrika	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	790 000	790 000
Tansania	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	890 000	890 000
Thailand	1 000	1 800	3 600	8 000	n.a.	n.a.
USA	18 000	26 000	39 000	43 000	1 400 000	1 800 000
Vietnam	920	900	700	400	22 000 000	22 000 000
andere	60	n.a.	100	300	310 000	280 000
Welt (gerundet)	190 000	210 000	240 000	280 000	120 000 000	120 000 000

Reserven Eine Aussage über die Reserven ist schwierig – einerseits, weil Daten dazu meist über alle SEO aggregiert angegeben werden und keine Informationen zu den einzelnen SEO vorliegen, andererseits aufgrund der monopolistischen Marktstellung der Volksrepublik China.

Unabhängig davon hat das schwedische Bergbauunternehmen *Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag* (kurz: LKAB) im Jänner 2023 die Entdeckung des größten in Europa bekannten Vorkommens im nordschwedischen Kiruna im Ausmaß von mehr als einer Million Tonnen Seltenerdoxide bekanntgegeben. Mit einer Förderung dieser Rohstoffe wird aber erst in zehn bis 15 Jahren gerechnet (LKAB, 2. Januar 2023).

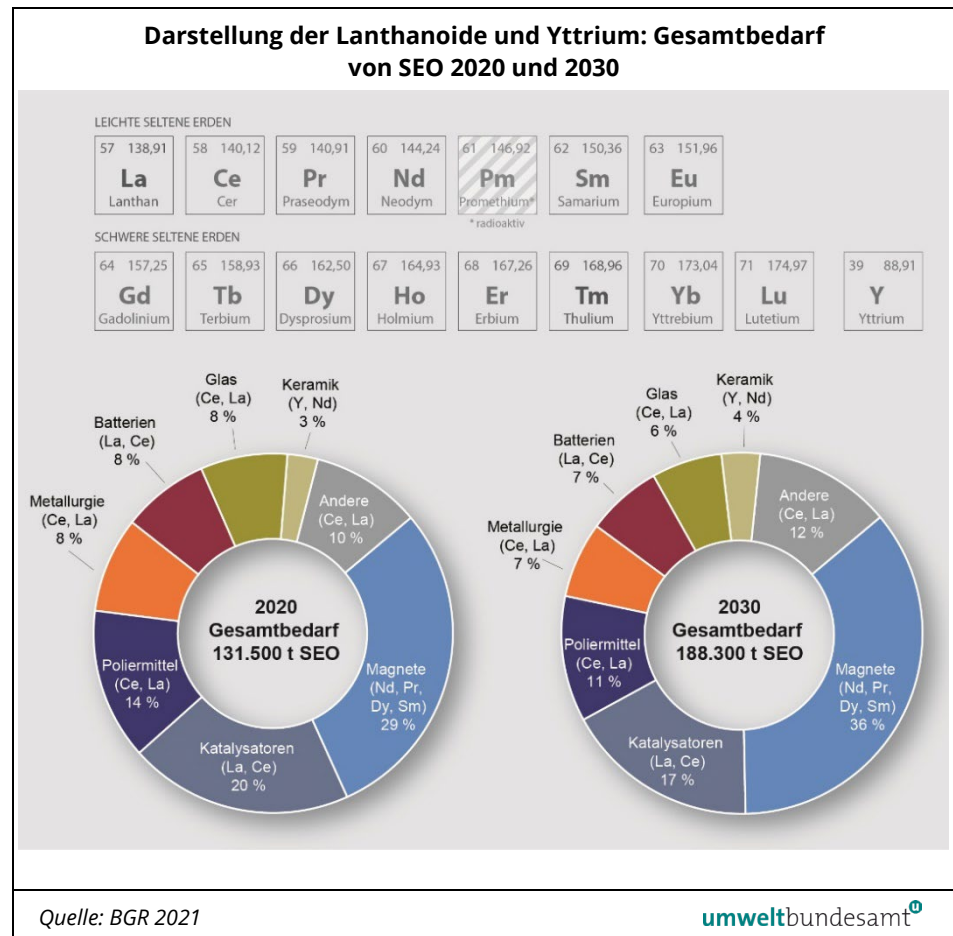
2021 wurden in Europa rund 3 % der Gesamtnachfrage nach LSE bzw. 8 % nach SEE aus Recycling abgedeckt (BGR, 2021).

5.5.2 Anwendungsbereiche

in Magneten für E-Motoren

Einer der wesentlichen Einsatzbereiche von SEO liegt in elektrischen Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten. Die SEO machen rund 30 Gewichtsprozent des Magnetmaterials aus. Andere Anwendungsbereiche betreffen die Metalllegierungen, z. B. in Superlegierungen. Zum Einsatz kommen SEO auch in Konsumelektronik, beispielsweise in Mobiltelefonen, LED-Beleuchtung, Flachbildschirmen, fluoreszierenden Lampen oder der Glasfasertechnik. In der chemischen Industrie werden sie als Katalysator bei der Erdölraffinierung oder als Zusatz im Dieseltreibstoff eingesetzt, darüber hinaus auch bei der Wasseraufbereitung. Ein weiteres Anwendungsfeld liegt in der Keramik bzw. Glasindustrie, z. B. für UV-abschirmendes Glas oder Thermo-Glas. SEO können auch in Brennstoffzellen sowie Supraleiter eingesetzt werden. Weiters werden sie in der Düngemittelproduktion, in der Nukleartechnik, sowie in der Medizin eingesetzt (BGR, 2021).

Abbildung 23:
Darstellung der Lanthanoide und Yttrium: Gesamtbedarf von SEO 2020 und 2030, dargestellt nach Verwendung in %.



5.5.3 Soziale und ökologische Herausforderungen

Folgen kontaminierten Grundwassers

Der Abbau von Seltenen Erden erfolgt über Säuren, mit denen die Metalle aus den Bohrlöchern gewaschen werden. Der dabei vergiftete Schlamm bleibt zurück. Es fallen große Mengen an Rückständen an, die giftige und radioaktive Abfälle beinhalten (Uran, Schwermetalle, verschiedene Säuren und Fluoride). Diese schlammartigen Rückstände werden in riesigen künstlich angelegten Teichen gelagert, die nicht oder nur unzureichend abgesichert sind und daher das Grundwasser kontaminieren. Weitere Umweltaspekte, insbesondere um den Bereich der größten SEO-Mine in China in Baotou (Bayan-Obo-Mine), sind:

- Desertifizierung der mongolischen Steppe
- fehlende Vegetation in Abbaugebieten
- verendendes Vieh und erodierende Felder

hoher Flächenbedarf

SEO liegen nur in geringen Konzentrationen vor, wodurch der relative Flächenbedarf – bezogen auf die Jahresproduktion – im Vergleich zum Abbau von Eisenerz oder Kupfer hoch ist. Die Abraumhalden der Bayan-Obo-Mine belaufen sich auf 11 km² (wobei dies nicht ausschließlich am Abbau von SEO liegt – in dieser Mine werden ebenfalls bedeutende Mengen an Eisenerz abgebaut) (BGR, 2021). Durch den Tagebau (Bohren, Sprengen, Verladen und Transportieren) besteht ein großes Staubpotenzial, wobei dieser Staub erhöhte Belastungen von Quecksilber, Arsen, Blei, Fluoriden, Uran, Thorium und Asbestmineralien aufweist.

radioaktive Rückstände

Durch Vergesellschaftung mit Radionukliden (Uran und Thorium) sind die bergbaulichen Rückstände – abhängig vom Lagerstättentyp – radioaktiv belastet.

Der Energiebedarf bei der Herstellung von SEO fällt vor allem bei der Aufbereitung zum Konzentrat an, nur 10 % des Gesamtenergieeinsatzes entfallen auf den Bergbau.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Elektromobilität ist ein zentraler Baustein für die integrierte Energie- und Mobilitätswende und unverzichtbar für das Erreichen der nationalen und internationalen Klimaziele. Dabei sind Elektrofahrzeuge genauso abhängig von endlichen Rohstoffen wie konventionell angetriebene Fahrzeuge; der Unterschied liegt in der Art und Menge der eingesetzten Rohstoffe.

Ein Elektroauto braucht, insbesondere aufgrund des Wegfalls des fossilen Kraftstoffs, schätzungsweise achtmal weniger endliche Rohstoffe als ein konventionell angetriebenes Fahrzeug (Klima- und Energiefonds, 2022). In Elektrofahrzeugen sind aber Komponenten verbaut, die neue Rohstoffe oder größere Mengen von diesen benötigen. Die wichtigsten dieser Rohstoffe sind Lithium, Kobalt, Grafit, Mangan und Nickel für die Batterie, Platingruppenmetalle für die Brennstoffzelle und unterschiedliche Seltenerdoxide für den Elektromotor.

alle Rohstoffe für E-mobilität kritisch

Jeder dieser Rohstoffe ist hinsichtlich seiner Verfügbarkeit, seiner gegenwärtigen Fördermenge, des prognostizierten Bedarfs oder der sozialen oder ökologischen Implikationen in Verbindung mit der Rohstoffgewinnung als kritisch einzustufen. Deshalb erfordert der Einsatz dieser Rohstoffe spezielle Strategien und Aktivitäten entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wie etwa:

nachfrageseitige Strategien

Dämpfung der Nachfrage nach Primärstoffen

- Einsatz von weniger Fahrzeugen als Folge eines geänderten Mobilitätsverhaltens (nachhaltige Mobilitätsformen ersetzen des motorisierten Individualverkehr, ein erhöhter Besetzungsgrad und geteilte Fahrzeugnutzung steigern die Rohstoffeffizienz)
- Einsatz kleinerer Fahrzeuge mit kleineren Akkumulatoren („Down sizing“) als Folge eines geänderten Konsumverhaltens
- Maximierung des Recyclings (in Europa) durch Anhebung freiwilliger und verpflichtender Recyclingquoten für kritische Rohstoffe, auch in Zusammenhang mit der Elektromobilität
- Intensivierung der globalen Forschung mit dem Ziel der weitgehenden Substitution kritischer Rohstoffe

Umwelt- und Sozialverträglichkeitsstrategien

Verbesserung von Umwelt- und Sozialbedingungen der Förderung

- Ausschöpfung des innereuropäischen Bergbaupotenzials (Bergbau in Europa ist mit vergleichsweise hohen Umwelt- und Sozialstandards verbunden)
- Etablierung globaler Industriallianzen mit dem Ziel einer nachhaltigen, umwelt- und sozialverträglichen Rohstoffförderung auch außerhalb Europas
- Einführung verbindlicher unternehmerischer Sorgfaltspflichten entlang der Handelsketten ausgesuchter kritischer Rohstoffe, deren Förderung sich auch in Zukunft auf wenige Länder konzentrieren wird

übergeordnetes Ziel Das übergeordnete Ziel dieser Aktivitäten muss sein, den Einsatz von Rohstoffen, auch in Zusammenhang mit der Elektromobilität, generell zu reduzieren und die Elektromobilität als maßgebliche Antriebstechnologie der Zukunft auf Basis hoher Umwelt- und Sozialstandards in der globalen Rohstoffförderung zu etablieren.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BEV	Battery Electric Vehicle, dt.: batterieelektrisches Fahrzeug
BMS	Batteriemanagementsystem
CAGR	Compound Annual Growth Rate, dt.: jährliche Wachstumsrate
EBA	European Battery Alliance
ERMA.....	European Raw Materials Alliance
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, dt.: Brennstoffzellenfahrzeug
GWh	Gigawattstunde
H ₂	Wasserstoff
HDS	High Demand Scenario, dt.: Szenario mit hoher Nachfrage
HHI	Herfindahl-Hirschmann-Index
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle, dt.: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
kWh	Kilowattstunde
LCO.....	Lithium-Kobaltoxid
LKW	Lastkraftwagen
LMO.....	Lithium-Manganoxid
LDS	Low Demand Scenario, dt.: Szenario mit niedriger Nachfrage
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LT-PEMFC.....	Low Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, dt.: Niedertemperatur-Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen
NCA	Lithium- Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid
MDS.....	Medium Demand Scenario, dt.: Szenario mit mittlerer Nachfrage
NACE	Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne
NGO	Non-governmental organization, dt.: Nichtregierungsorganisation
OECD.....	Organisation for Economic Co-operation and Development

PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PGM.....	Platin Group Metals
PKW	Personenkraftwagen
REE	Rare Earth Elements (Seltene Erdelemente)
SEE.....	Seltene Erdelemente
SEM	Seltenerdmetalle
SEO	Seltenerdoxid
THG	Treibhausgas
VDI.....	Verein Deutscher Ingenieure

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Globaler Pkw-Bestand und Prognose bis 2050.....	10
Abbildung 2:	Nachfrage nach Lithium-Ionen-Akkus in Abhängigkeit des Einsatzes von Kobalt.....	16
Abbildung 3:	Abgrenzung der Begriffe Reserve und Ressource.....	24
Abbildung 4:	Überblick des Versorgungsrisikos, Engpässe und Schlüsselländer entlang der Herstellungskette von Lithium-Ionen-Zellen.....	26
Abbildung 5:	Entwicklung der Elektrofahrzeuge für drei unterschiedliche Nachfrageszenarien für die Europäische Union.....	27
Abbildung 6:	Bedarf an Kobalt für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Kobalt.....	28
Abbildung 7:	Bedarf an Lithium für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Lithium.....	29
Abbildung 8:	Bedarf an Grafit für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Grafit.....	30
Abbildung 9:	Bedarf an Nickel für unterschiedliche Nachfrageintensitäten im Verhältnis zur derzeitigen Nachfrage für das gesamte Anwendungsspektrum von Nickel.....	31
Abbildung 10:	Überblick des Versorgungsrisikos, Engpässe und Schlüsselländer entlang der Herstellungskette von Brennstoffzellen.....	32
Abbildung 11:	Entwicklung der Brennstoffzellenfahrzeuge für drei unterschiedliche Nachfrageszenarien.....	33
Abbildung 12:	Bedarf an PGM für Elektromobilität und andere Anwendungen im Bereich erneuerbarer Energien für unterschiedliche Nachfrageintensitäten.....	34
Abbildung 13:	Überblick des Versorgungsrisikos, Engpässe und Schlüsselländer entlang der Herstellungskette von Elektromotoren.....	35
Abbildung 14:	Entwicklung der Brennstoffzellenfahrzeuge und der batterieelektrischen Fahrzeuge.....	36
Abbildung 15:	Bedarf an Bor für Elektromobilität für unterschiedliche Nachfrageintensitäten.....	36
Abbildung 16:	Bedarf an Neodym für Elektromobilität für unterschiedliche Nachfrageintensitäten.....	37

Abbildung 17: Bedarf an Dysprosium für Elektromobilität für unterschiedliche Nachfrageintensitäten	38
Abbildung 18: Globale Einsatzbereiche von Lithium 2005, 2010, 2015 und 2020	41
Abbildung 19: Globale Einsatzbereiche und -mengen von Kobalt	44
Abbildung 20: Einsatzbereiche von Kobalt 2021	45
Abbildung 21: Globale Anwendungsbereiche von Platin.....	48
Abbildung 22: Globale Anwendungsbereiche von Grafit.....	51
Abbildung 23: Darstellung der Lanthanoide und Yttrium: Gesamtbedarf von SEO 2020 und 2030.	54

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Einsatz abiotischer Rohstoffe für einen durchschnittlichen Elektro-Pkw	12
Tabelle 2:	Derzeitige Kathodenmaterialien in Lithium- Ionen- Akkumulatoren im Automobilbereich	14
Tabelle 3:	Kritische Rohstoffe, definiert von der Europäischen Kommission, 2020	21
Tabelle 4:	Minenproduktion von Lithium nach den wichtigsten Ländern 2021	40
Tabelle 5:	Globale Minenproduktion und Reserven von Kobalt	43
Tabelle 6:	Fördervolumen und Reserven für Platin und Palladium	47
Tabelle 7:	Globale Produktionsmengen und Reserven von (natürlichem) Grafit.....	50
Tabelle 8:	Übersicht der leichten und schweren Seltenerdoxide.....	52
Tabelle 9:	Globale Produktionsmengen und Reserven von Seltenen Erden	53

LITERATUR

- Agora Verkehrswende, 2019. *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial* [online]. Berlin. Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf
- BACH, S.M., 2015. *Neue Charakterisierungsmethoden für die Gasdiffusionslage in PEM-Brennstoffzellen vor dem Hintergrund produktionsprozessbedingter Materialschwankungen* [online]. Jülich. ISSN 1866-1793. Verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/540920/files/540920.pdf>
- BASF, 2019. *Gemeinsames Projekt für nachhaltigen Kobalt-Abbau* [online]. Das Projekt „Cobalt for Development“ zielt darauf ab, die Arbeitsbedingungen im Kleinstbergbau sowie die Lebensbedingungen für die umliegenden Gemeinden im Kongo nachhaltig zu verbessern. [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.basf.com/at/de/who-we-are/sustainability/we-source-responsibly/cobalt-initiative.html>
- BGR, Hg., 2019. *Analyse des artisanalen Kupfer-Kobalt-Sektors in den Provinzen Haut-Katanga und Lualaba in der Demokratischen Republik Kongo* [online]. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_BGR_kupfer_kobalt_kongo_2019.html.
- BGR, Hg., 2021. *Seltene Erden. Informationen zur Nachhaltigkeit* [online]. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/seltene_erden.pdf
- BOBBA, S., S. CARRARA, J. HUISMAN, F. MATHIEUX und PAVEL, 2020. *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study* [online]. European Commission, Joint Research Centre. ISBN 978-92-76-15336-8; ET-04-20-034-EN-N. Verfügbar unter: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf
- Cobalt Institute, 2021. *State of the Cobalt market report 2020* [online] [Zugriff am: 21. Februar 2023]. Verfügbar unter: https://www.cobaltinstitute.org/resource/state-of-the-cobalt-market-report-2020/https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2021/09/Cobalt-Institute-State-of-the-Cobalt-Market-Report_2020.pdf
- DER SPIEGEL, 17. Oktober 2019. *Kobaltförderung im Kongo* [online]. Hier sterben Menschen für unsere Akkus. *Der Spiegel*, 2019 [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/kobalt-aus-dem-kongo-hier-sterben-menschen-fuer-unsere-e-autos-a-1291533.html>

- DERA, Hg., 2018. *Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. DERA Rohstoffinformationen 36* [online]. Deutsche Rohstoffagentur. Berlin. ISBN: 978-3-943566-49-9 (PDF). Verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-36.pdf
- DERA, Hg., 2020. *Supply and Demand of Natural Graphite. DERA Rohstoffinformationen 43* [online]. Deutsche Rohstoffagentur. Berlin. ISBN: 978-3-948532-10-9 (PDF). Verfügbar unter: <https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie%20Graphite%20eng%202020.pdf>
- DIE FURCHE, 24. Mai 2018. Die gefährliche Jagd nach dem neuen Öl [online]. Smartphone, PC oder Elektroauto – keines dieser Produkte kommt ohne den Batterierohstoff Kobalt aus. Damit die Verbraucher in den Industrienationen mit schicken elektronischen Geräten versorgt werden können, setzen Menschen im Kongo ihr Leben aufs Spiel. *Die Furche*, **2018** [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter: https://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Essays/Soziologie_und_Ethik/Kobaltabbau
- DIE ZEIT, 1. Juni 2019. Kobalt - Eldorado unter Wasser [online]. Smartphones und Elektroautos brauchen Kobalt. Wer sichert sich den Rohstoff in der Tiefsee? *die Zeit*, **2019(23)** [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/2019/23/kobalt-manganknollen-rohstoff-smartphones-elektroautos>
- DOLEGA, P., M. BUCHERT und J. BETZ, 2020. *Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie-Lieferketten: Graphit und Lithium. Kurzstudie erstellt im Rahmen des BMBF Verbundprojektes Fab4Lib - Forschung zu Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen entlang der gesamten Wertschöpfungskette* [online]. Öko-Institut e.V. Darmstadt. FKZ 03XP0142E. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Graphit-Lithium-Oeko-Soz-Herausforderungen.pdf>
- EBA, 2019. *European Battery Alliance: About EBA250* [online] [Zugriff am: 26. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.eba250.com/about-eba250/>
- EBA, 2021. *European Battery Alliance: The industrial development programme of the European Battery Alliance* [online] [Zugriff am: 26. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.eu-japan.eu/sites/default/files/imce/Battery%20Alliance%202022.6.2.pdf>
- EK, 2020. *Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. COM(2020) 474 final* [online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>

- EK, 2021. *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union*. COM(2021) 556 final.
- Element Energy Ltd, 2019. *Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond. Technical Appendix* [online]. Verfügbar unter: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2019_06_Element_Energy_Batteries_on_wheels_Public_report.pdf
- GEMIS [Software]. Version 5.0: Globales Emissions-Modell integrierter Systeme.
- GFEI, 2016. *Fuel Economy State of the World 2016. Time for global action* [online]. Global Fuel Economy Initiative. Verfügbar unter: <https://www.globalfueleconomy.org/media/203446/gfei-state-of-the-world-report-2016.pdf>
- HABIB, K., S.T. HANSDÓTTIR und H. HABIB, 2020. Critical metals for electromobility [online]. Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015-2050. *Resources, Conservation and Recycling*, **154**, 104603. ISSN 0921-3449. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.resconrec.2019.104603
- HAO, H., Y. GENG, J.E. TATE, F. LIU, X. SUN, Z. MU, D. XUN, Z. LIU und F. ZHAO, 2019. Securing Platinum-Group Metals for Transport Low-Carbon Transition [online]. *One Earth*, **1**(1), 117-125. ISSN 2590-3322. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.oneear.2019.08.012
- HELMS, H., J. JÖHRENS, C. KÄMPER, J. GIEGRICH, A. LIEBICH, R. VOGT und U. LAMBRECHT, 2016. *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*. Im Auftrag des Umweltbundesamt Deutschland. Dessau-Roßlau. TEXTE 27/2016, ISSN 1862-4804.
- IEA, 2015. *Energy Technology Perspectives 2015* [online]. IEA. Paris. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2015>
- IEA, 2022. *Global EV Outlook 2022* [online]. IEA. Verfügbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>
- IPCC, Hg., 2022. *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers* [online]. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. ISBN 978-92-9169-160-9. Verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf
- KAVANAGH, L., J. KEOHANE, G. GARCIA CABELLOS, A. LLOYD und J. CLEARY, 2018. Global Lithium Sources - Industrial Use and Future in the Electric Vehicle Industry [online]. A Review. *Resources*, **7**(3), 57. ISSN 2079-9276. Verfügbar unter: doi:10.3390/resources7030057

- KLIMA- UND ENERGIEFONDS, Hg., 2022. *Faktencheck E-Mobilität. Antworten auf die 10 wichtigsten Fragen zu E-Mobilität* [online] [Zugriff am: 26. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/Faktencheck-E-Mobilita%CC%88t-2022-Einzelseiten.pdf>
- KU LEUVEN, 2022. *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge* [online] [Zugriff am: 9. März 2023]. Verfügbar unter: <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>
- LKAB. *Europe's largest deposit of rare earth metals is located in the Kiruna area*. Press release, 2. Januar 2023 [Zugriff am: 11. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://lkab.com/en/press/europes-largest-deposit-of-rare-earth-metals-is-located-in-the-kiruna-area/>
- LUTTER, S., S. GILJUM, B. GÖZET, WIELAND, H. und C. MANSTEIN, 2018. *Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Bericht für Deutschland 2018* [online]. Im Auftrag des Umweltbundesamt Deutschland. ISSN 2363-832X. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/deuress18_de_bericht_web_f.pdf
- ÖKO-INSTITUT E.V., 2020. *Lithium & Graphit für die Batterieproduktion: Zukunft der Lieferkette* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/presse/archiv-pressemeldungen/presse-detailseite/2020/lithium-graphit-fuer-die-batterieproduktion-zukunft-der-lieferkette>
- REUTER, B., A. HENDRICH, J. HENGSTLER, S. KUPFERSCHMID und M. SCHWENK, 2019. *Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien - Herausforderungen und Lösungsansätze* [online]. thinkstep AG, e-mobil BW GmbH (Hg.). Verfügbar unter: <https://www.e-mobilbw.de/service/presse/pressemeldungen/pressemeldungen-detail/rohstoffe-fuer-innovative-fahrzeugtechnologien>
- ROSKILL, 2019. *Natural and synthetic graphite: Global Industry, Markets & Outlook*. Roskill Information Services LTD. London.
- THIELMANN, A., A. SAUER und M. WIETSCHHEL, 2015. *Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität* [online]. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Verfügbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/GRM-ESEM.pdf>
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020. *Mineral commodity summaries 2020* [online]. U.S. Department of the Interior. Verfügbar unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022. *Mineral commodity summaries 2022* [online]. U.S. Department of the Interior. Verfügbar unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>

- UBA, 2021. *Bergbau am Tiefseeboden* [online]. 18. August 2021 [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/tiefseebergbau-andere-nutzungsarten-der-tiefsee#>
- UMWELTBUNDESAMT, 2022. *Treibhausgas-Bilanz Österreichs 2020* [online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news220123>
- VDE und DKE, 2015. *Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*; [online]. im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car - Smart Grid - Smart Traffic. Verband der Elektrotechnik VDE & Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik DKE. Verfügbar unter: https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/IKT-EM/ikt2-komp-lithium-ionen.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- VDI Richtlinie 48000, *Verein deutscher Ingenieure: VDI-Handbuch Ressourceneffizienz, Blatt 2*.
- VDI und VDE, 2019. *Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge, Bedeutung für die Elektromobilität* [online]. VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. Technik und Gesellschaft, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Energietechnische Gesellschaft (EGT). Verfügbar unter:
<https://www.vde.com/resource/blob/2097438/ebf217d10a1fd89769029fc2cb54d252/brennstoffzellen-download-data.pdf>
- WELT.DE, 2019. *Kobalt-Abbau: Bundesregierung kann Kinderarbeit für Elektroautos nicht ausschließen* [online]. 13. Juli 2019 [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/article196797049/Kobalt-Abbau-Bundesregierung-kann-Kinderarbeit-fuer-Elektroautos-nicht-ausschliessen.html>

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich

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

office@umweltbundesamt.at
www.umweltbundesamt.at

Elektrofahrzeuge sind ebenso von endlichen Rohstoffen abhängig wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Ihr Betrieb beansprucht aber bis zu acht Mal weniger Rohstoffe als der von Diesel- oder Benzinfahrzeugen, da dafür keine fossilen Kraftstoffe eingesetzt werden müssen. Dafür werden in Elektrofahrzeugen andere Rohstoffe in größeren Mengen verbaut, die oft unter sozial und/oder ökologisch kritischen Bedingungen abgebaut werden. Da dazu zählen Lithium, Kobalt, Mangan, Nickel, Grafit, Platinmetalle und Seltene Erden.

In der Studie werden Quellen und global verfügbare Reserven dieser Rohstoffe analysiert und dem zu erwartenden Bedarf bis zum Jahr 2050 gegenübergestellt. Daraus werden Empfehlungen abgeleitet, die dazu beitragen, hohe Sozial- und Umweltstandards in der Förderung der für die Elektromobilität unverzichtbaren Rohstoffe zu etablieren.