

# Global Energy Perspectives

gefördert aus Kapitel 2302, Titel 687 01

BMZ-Abschlussreport / Basisdokument

Global Energy Solutions e.V.

**Teil 1: Grundelemente zur Vermeidung von Treibhausgasen und Herstellung klimaneutraler Energieträger (technischer Werkzeugkasten)**

Stand 08. August 2023

Kapitel 2-13

<b>Autorenteam:</b>	
Siddhant Bane	Joern Becker
Ulrich Begemann	Leon Berks
Christof von Branconi	Simon Göss
Prof. Dr. Estelle Herlyn	Dr. Wilfried Lyhs
Dr. Tobias Orthen	Dr. Ludolf Plass
Dr. Hans-Peter Sollinger	Dr. Jens Wagner
Dr. Hans Jürgen Wernicke	

### **Erklärung zum Urheberrecht**

**Das nachfolgende Dokument ist grundsätzlich ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Eine Weitergabe an Dritte oder die Nutzung für Dritte ist – auch auszugsweise – nicht gestattet.**

**Dem Empfänger des Dokuments wird eine einfache, nicht übertragbare, nicht unterlizenzierbare, eingeschränkte Lizenz gewährt, das Dokument für persönliche, nicht kommerzielle, private Zwecke zu nutzen.**

Ulm, im Juni 2023

Global Energy Solutions e.V.

Lise-Meitnerstr. 9

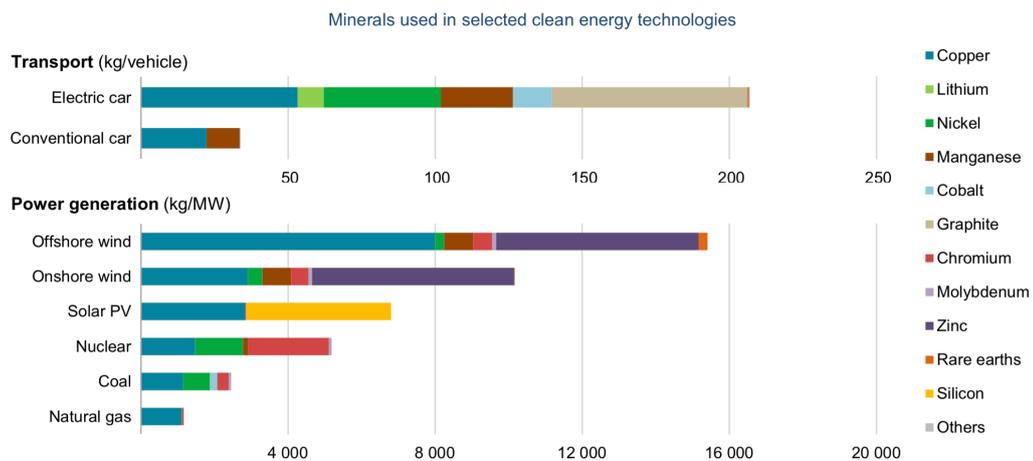
89081 Ulm

Vorsitzender: Christof v. Branconi (Christof.Branconi@Global-Energy-Solutions.org)

## 2.13 Kritische Rohstoffe

### 2.13.1 Einleitung

Die Transition hin zur Produktion von erneuerbarer Energie und zur Vermeidung von fossilen Energieträgern hat zur Folge, dass andere Materialien benötigt werden, um z.B. Anlagen zur Energieerzeugung oder zur Nutzung zu produzieren. Beispielsweise benötigt ein elektrisches Fahrzeug etwa sechsmal mehr Mineralien als ein konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und ein Windrad auf dem Land benötigt etwa neunmal mehr Mineralien als eine gasbeheizte Anlage (siehe Abbildung 236).



IEA. All rights reserved.

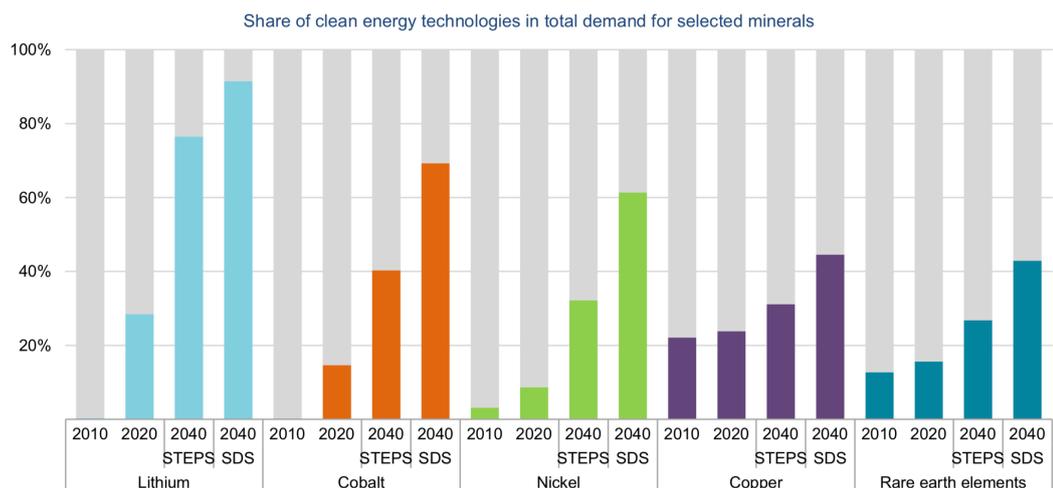
Notes: kg = kilogramme; MW = megawatt. Steel and aluminium not included. See Chapter 1 and Annex for details on the assumptions and methodologies.

Abbildung 236: Spezifischer Verbrauch von verschiedenen Mineralien in kg/Fahrzeug bzw. kg/MW für verschiedene Energieerzeuger.

Quelle: IEA, (2021).

Diese weltweit einsetzende Transition hat die Verhältnisse auf den Rohstoffmärkten der Welt verändert. Mit zunehmender Transition der Energiezeugung (eigentlich „Umwandlung von Energie“) wurde dieser Sektor zum führenden Verbraucher von mineralischen Rohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer und den Seltenen Erden. Diese Mineralien werden in den nachfolgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

Schon in der Zeit vor dem Krieg in der Ukraine und auch schon vor der Corona-Pandemie beobachten wir steigende Rohstoffpreise an den Börsen der Welt. Die Corona-Pandemie hat die Situation dadurch extrem verschärft, dass in dieser Zeit zahlreiche Minen geschlossen wurden und anschließend mit hochfahrender Produktion der Bedarf nicht gedeckt werden kann. Die durch Schließung von Häfen und die Blockade des Suezkanals verursachten Probleme in der Logistik verschärfen heute die Problematik.



IEA. All rights reserved.

Notes: Demand from other sectors was assessed using historical consumption, relevant activity drivers and the derived material intensity. Neodymium demand is used as indicative for rare earth elements. STEPS = Stated Policies Scenario, an indication of where the energy system is heading based on a sector-by-sector analysis of today's policies and policy announcements; SDS = Sustainable Development Scenario, indicating what would be required in a trajectory consistent with meeting the Paris Agreement goals.

Abbildung 237: Anteil der Mineralien, die für die Technik im Bereich der erneuerbaren, sauberen Energietechnik gebraucht werden.

Quelle: IEA, (2021).

Pressemitteilungen wie „Nickelpreis auf Rekord-Niveau“, „Preise für Aluminium so hoch wie seit Jahren nicht mehr“, „Magnesium wird knapp“ lassen die Rohstoffpreise in die Höhe schnellen.

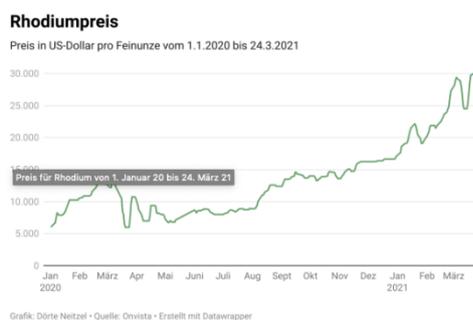


Abbildung 238: Preisentwicklung für Rhodium zwischen 2020 und 2021.

Quelle: Neitzel, (2021).

Der **Rhodiumpreis** stieg innerhalb von 1 Jahr um 375 % aktuell: 500.000 USD/kg, (Näheres hierzu in Tabelle 57.)

Der Iridiumpreis stieg innerhalb von 3 Monaten um 300 %, liegt aber mittlerweile bei 4500 USD/oz.

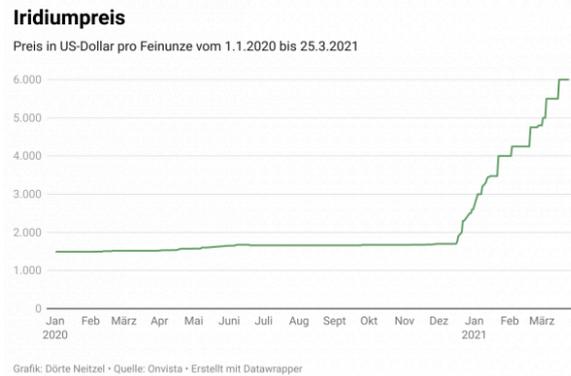


Abbildung 239: Preisentwicklung für Iridium zwischen 2020 und 2021.

Quelle: Neitzel, (2021).

Aber auch Platin (+22 %), Ruthenium<sup>44</sup> (+57 %), Palladium (+30 %), Kupfer (+44 %), Zinn (+60 %), Nickel (+12 %), Aluminium (+25 %) verzeichneten in der Zeit von 2020 bis Frühjahr 2021 rasante Verteuerungen.

Dies ist Anlass, die Bedeutung der sogenannten kritischen Rohstoffe und die möglichen Auswirkungen der Preissteigerungen in diesem Dokument zu untersuchen, zumal die Kenntnis der Verwendung einiger der zu dieser Gruppe von Elementen, Mineralien oder Rohstoffen gehörenden Produkte nicht als verbreitet vorausgesetzt werden kann.

Abbildung 240 zeigt die Mengen an einzelnen Substanzen/Elementen, die zur Herstellung aller Smartphones, die 2016 verkauft wurden, benötigt wurden. Dies verdeutlicht, dass nicht nur die funktionale Komplexität der Mobiltelefone, sondern auch die Menge der an seiner Herstellung beteiligten Materialien stark zugenommen hat.

Nun wäre es sicherlich für den Bürger akzeptabel, wegen Nichtverfügbarkeit der Rohstoffe auf den vorzeitigen Neukauf eines Mobiltelefons zu verzichten. Nichtverfügbarkeit, die den Ausbau der Erneuerbaren Energien verzögert oder gar die Energiewende verhindert, ist es allerdings nicht. Daher beschreibt dieses Dokument auch die Strategien einzelner Länder, den Nachschub für zu importierende Materialien zu sichern.

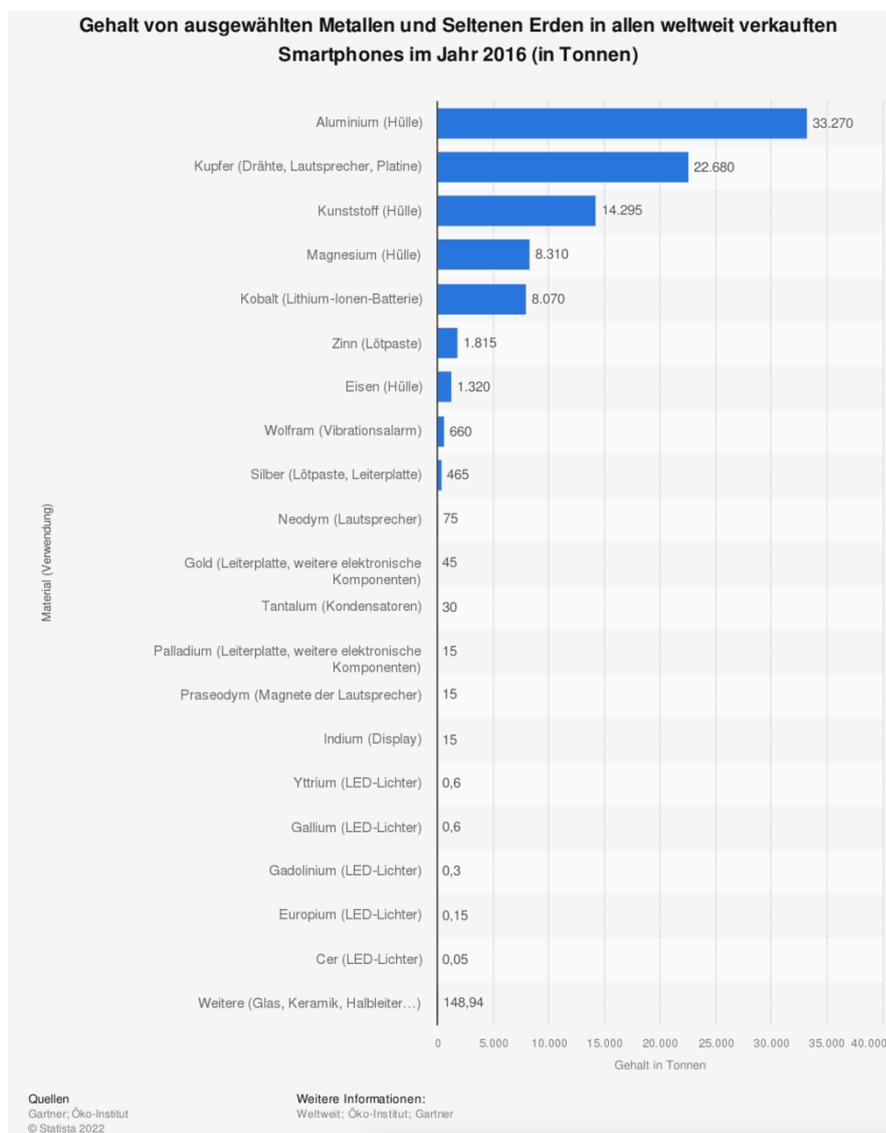


Abbildung 240: Gehalt von ausgewählten Substanzen in allen weltweit im Jahr 2016 verkauften Smartphones.  
Quelle: Statista (2016)

### 2.13.1.1 Definition von kritischen Rohstoffen

Die Europäische Kommission hat ab dem Jahr 2011 Listen mit „kritischen Rohstoffen“ (CRM) herausgegeben, die beginnend mit 14 Materialien im Jahr 2011 auf mittlerweile 30 im Jahr 2020 angewachsen ist (vgl. Anhang Tabelle 61, Seite 456). „Als kritisch werden Rohstoffe bezeichnet, bei denen das Risiko eines Versorgungsengpasses in den nächsten zehn Jahren besonders groß ist und die als besonders wichtig für die Wertschöpfungskette betrachtet werden. Das Risiko von Versorgungsengpässen steht im Zusammenhang mit der Konzentration der Produktion auf einige wenige Länder und der geringen politischen und wirtschaftlichen Stabilität mancher Lieferanten. Zu diesem Risiko kommt bei einigen Mineralien erschwerend hinzu, dass der Rohstoff nur schwer ersetzt werden kann und seine Rückgewinnungsquote

*gering ist. In vielen Fällen ist eine stabile Versorgungssituation ein wichtiges Element der Zielsetzungen der Klimapolitik und der technologischen Innovation“.*<sup>630</sup>

Die Definition dessen, was kritische Rohstoffe oder Mineralien sind, wird oft auch unter dem Aspekt der strategischen Wichtigkeit für die Landesverteidigung gesehen. Der Überblick über Rohstoffstrategien im Kapitel 2.13.6. verdeutlicht, dass diese international sehr unterschiedlich sein können.

Die EU setzt hier eine Methodik ein, bei der Größen wie „Supply Risk“ oder „Import Reliance“ aus vorliegenden Bewertungsindices numerisch ermittelt werden.<sup>631</sup> Die EU hat mit RMIS eine für jedermann zugängliche Datenbank mit Informationen rund um die kritischen Materialien und Sekundärrohstoffe geschaffen, die weiterführende Informationen zu den Rohstoffen zur Verfügung stellt.<sup>632</sup>

### 2.13.1.2 Relevanz für den Gesamtzusammenhang

Beim Übergang von der fossilen Energiewirtschaft zu einer, die sich um nachhaltige, umweltfreundliche und kostengünstige und damit wohlstandserhaltene Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie bemüht, spielt die Verfügbarkeit von bereits langjährig genutzten Rohstoffen aber auch und insbesondere von solchen, deren Anwendung erst jüngst bei neuen Technologien üblich und notwendig geworden ist, eine überaus große Rolle.

Da Rohstoffe und Mineralien als Bodenschätze nicht in allen Ländern gleich verteilt vorkommen, ihr Abbau und Aufbereitung aber teilweise hohes technisches und verfahrenstechnisches Knowhow voraussetzt, ist deren Nutzbarkeit für rohstoffarme Länder außerdem auch von den Exportstrategien der Förderländer und den teilweise explodierenden Preisen auf den Weltmärkten abhängig.

Ob und wie schnell sich der weltweite Wandel zu einer Wirtschaft ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen vollzieht, hängt auch von der Verfügbarkeit der als kritische Rohstoffe oder kritische Mineralien oder allgemeiner noch kritische Materialien bezeichneten Stoffe, die nachstehend beschrieben werden, ab. Die meisten Länder haben die für sie kritische Situation erkannt und mit der Formulierung von Rohstoffstrategien reagiert, die im Kapitel 2.13.6. beschrieben werden. Hierbei spielen nicht nur die Primärrohstoffe eine Rolle, sondern auch der Umgang mit Sekundärrohstoffen, die aus der Aufarbeitung von Abfällen und Recycling entstehen. So wie die zivilen Gesellschaften sich z.B. infolge der Klimakrise und weltpolitischen Krisen auf Einschränkungen bei der Verfügbarkeit von Ressourcen wie Strom und Wasser einstellen werden, verlangt

---

<sup>630</sup> Vgl. Europäische Kommission, 2011, S. 2.

<sup>631</sup> Vgl. European Commission, (2017).

<sup>632</sup> RMIS: Raw Material Information System, vgl. RMIS (o. J.).

auch die zunehmende Verknappung und Verteuerung von Rohstoffen ein Umdenken hin zur Produktion langlebiger und reparierbarer Wirtschaftsgüter mit hoher Recycle-Fähigkeit.

Insbesondere ist die Verknappung und die damit einhergehende Erhöhung der Rohstoffpreise für Entwicklungsländer wichtig, da sie es schwer haben werden, gegen die entwickelten Länder ihre Kaufabsichten auf dem Weltmarkt zu realisieren. Außerdem sind Industrienationen wie z.B. China dabei, in weniger entwickelten oder ärmeren Ländern Zugriff auf attraktive Rohstofflagerstätten zu erlangen. Hierdurch stürzen sich diese Länder durch langfristige Verträge in Abhängigkeit zu diesen Industrienationen und gefährden die Aussicht, ihre ökonomische Weiterentwicklung selbständig entwickeln zu können.<sup>633</sup>

### 2.13.1.3 Kernaussagen

- Eine große und ständig wachsende Anzahl von Mineralien und chemischen Elementen kann als kritische Rohstoffe eingestuft werden.
- Im Fall von Lithium, Kobalt und den Seltenen Erden kontrollieren die drei größten Produzenten der Welt, allen voran China, drei Viertel des globalen Marktes (IEA 2021).
- Die zunehmende Nachfrage nach Rohstoffen, die für die Wende in der Mobilität und der Energieerzeugung und -versorgung benötigt werden, steht Problemen bei der Bereitstellung der Rohstoffe gegenüber, die einerseits durch die Corona-Pandemie verursacht wurden und andererseits auch durch die notwendige Vorlaufzeit für Exploration und Aufbau der Produktions- und Logistikkapazitäten bedingt sind.
- Die Beschaffungskosten der Rohstoffe explodieren wegen des Missverhältnisses von Angebot und Nachfrage einerseits und durch die gestiegenen Produktionskosten von Rohstoffen mit Vorkommen in geringen Konzentrationen wie z.B. im Fall der Seltenen Erden.
- Die Abhängigkeit der Industrienationen von kritischen Rohstoffen kann bei Konflikten zu ihrer politischen Erpressung genutzt werden.
- Auch wenn die globalen Probleme nur durch die Kooperation zwischen den Produzenten und Anwendern der kritischen Rohstoffe gelöst werden können, wird die Kontrollmöglichkeit über die kritischen Rohstoffe in einigen Ländern dazu genutzt werden, die eigene Position als Produktions- und Handelsmacht zum Nachteil anderer zu stärken.
- Wenn es nicht gelingt, die Abhängigkeit von den kritischen Rohstoffen zu verringern z.B. durch die Entwicklung von Substituten oder das Verbessern des Recyclings und

---

<sup>633</sup> Vgl. Saam, (2008).

dessen Ausweitung auf „Urban Mining“, ist die Energie- und Verkehrswende ernsthaft in Gefahr.

### 2.13.2 Ausgewählte kritische Rohstoffe

#### 2.13.2.1 Übersicht kritischer Rohstoffe

Eine erste Übersicht über kritische Rohstoffe erhält man, wenn man sich durch einen Blick auf das Periodensystem die Verfügbarkeit der Elemente und ihrer Verbindungen, in denen sie vorkommen, ansieht. Abbildung 241 stellt im Periodensystem der Elemente diejenigen Elemente in Rot dar, für die in den nächsten 100 Jahren nach Einschätzung von Mike Pitts ein Mangel auftreten wird.<sup>634</sup>

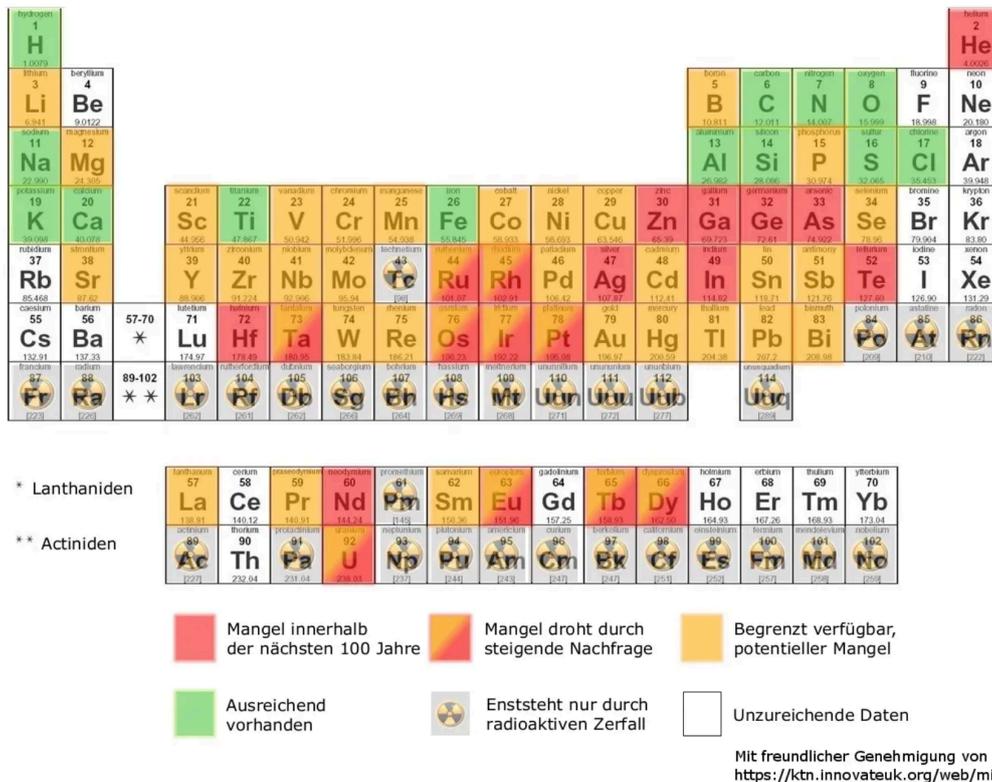


Abbildung 241: Periodensystem der bedrohten Elemente.

Quelle: Pitts, 2011.

Der allgemeine Eindruck bei Betrachtung der farblichen Kästchen ist, dass der größte Teil der Elemente entweder kurz- oder mittelfristig knapp wird.

#### Beispiele:

Selbst bei **Helium** (He<sup>2</sup>), einem der häufigsten Elemente auf unserem Planeten (0,004 ppm in Erdhülle), wird ein Mangel eintreten, da Helium zunehmend zur Kühlung

<sup>634</sup> Vgl. Pitts, (2011).

von Magneten oder Hochleistungsrechnern, Erzeugung von Supraleitung verwendet wird. Hauptquelle von Helium ist nicht, wie häufig angenommen, die Verflüssigung von Luft, sondern, da Helium beim radioaktiven alpha-Zerfall entsteht, von Substanzen, die bei der Förderung von Erdöl oder Erdgas aus dem Gestein gelöst werden und beim Zerfall Helium freisetzen.

Auch **Zink** ( $\text{Zn}^{30}$ ) gehört zu den „bedrohten Elementen“, da die Nutzung für das Verzinken von Stahl und die Nutzung in Batterien weltweit zugenommen hat. Zink ist ein in der Erdkruste relativ häufig vorkommendes Element (76 ppm).

Zink ist für alle Lebewesen essenziell, da es Bestandteil wichtiger Enzyme ist.

**Gallium** ( $\text{Ga}^{31}$ ), das in Leuchtdioden oder Solarzellen Anwendung findet, aber auch zum Dotieren von Halbleiterbauelementen auf Siliciumbasis benötigt wird, ist in der Natur selten und nur in kleinen Mengen zu finden (Anteil in der Erdkruste 14 ppm<sup>5</sup>). Die EU schätzt, dass schon 2030 viermal so viel Gallium benötigt werden wird wie heute produziert wird. Der U.S. Geological Survey schätzt den Faktor sogar auf 6. Problematisch ist weiterhin, dass China 75 % der Weltproduktion kontrolliert.<sup>635</sup>

**Germanium** ( $\text{Ge}^{32}$ ) kommt wie Gallium ebenfalls in nur geringen Konzentrationen oft in Verbindung mit Zinkerzen vor. Der Anteil an der Erdkruste beträgt 5,6 ppm.<sup>636</sup> Auch Germanium wird zur Dotierung von Silicium und zur Herstellung von optischen Bauelementen benötigt. Allein der steigende Bedarf im Bereich Glasfaseroptik wird im Jahr 2030 nach Berechnungen der EU dazu führen, dass der Bedarf doppelt so hoch wie die Förderung von Germanium sein wird.<sup>637</sup>

**Arsen** ( $\text{As}^{33}$ ) ist genauso häufig wie Germanium und ist oft Begleiter in Blei-, Kobalt- oder Kupfervorkommen. Im Galliumarsenid kommen beide Elemente gemeinsam vor. Arsen wird zur Dotierung von Halbleitern verwendet.

Die Europäische Kommission hat im Jahr 2020 eine Liste der kritischen Rohstoffe herausgegeben (siehe Tabelle 61 im Anhang S. 456), die neben den im Periodensystem farblich markierten Elementen auch weitere Verbindungen wie Borate (Verwendung in Hochleistungsglas, Düngemittel, Magnete), Flussspat (Calciumfluorid z.B. als Flussmittel bei der Aluminiumherstellung, Produktion von Linsen) oder natürlicher Grafit und Kokskohle auflistet. Die Verwendung von kritischen Materialien ist auch Tabelle 57 auf Seite 428 zu entnehmen.

Als Teil des Aktionsplans der Kommission auf die festgestellten Abhängigkeiten von für die industrielle Produktion notwendigen Rohstoffen wurde die European Raw Material Alliance (ERMA) ins Leben gerufen mit dem Ziel, die Supply Chain für die als kritisch erkannten

---

<sup>635</sup> Vgl. Fischer, 2011.

<sup>636</sup> Vgl. Wikipedia, (2023) <https://de.wikipedia.org/wiki/Germanium>

<sup>637</sup> Vgl. Fischer, 2011.

Materialien zu sichern und hierbei auch eine Diversifizierung der Lieferanten zu erreichen wie z.B. im Jahr 2021 durch einen Partnervertrag der EU mit der Ukraine für den Bezug von Materialien für die Produktion von Batterien/Akkus.<sup>638</sup>

### 2.13.2.2 Seltene Erden

#### Allgemeine Informationen

Die Bezeichnung „Seltene Erden der Metalle“ oder „Seltene Erden“ stammt aus der Zeit ihrer Entdeckung (z.B. Yttrium 1794 in der Grube Ytterby bei Stockholm). Der Name weist darauf hin, dass die Elemente in ihrer oxydischen Verbindung (früher „Erden“ genannt) gefunden wurden.

„Die Seltenen Erden (REE) sind eine Familie von 16 Elementen (siehe Abbildung 241, die Elemente Scandium und Yttrium wurden mitgezählt!), die als Gruppe ausgeprägte chemische Ähnlichkeiten aufweisen, während sie als einzelne Elemente unverwechselbare und vielfältige elektronische Eigenschaften besitzen. Diese atomistischen, elektronischen Eigenschaften sind außerordentlich nützlich und motivieren die Anwendung der Seltenen Erden in vielen Technologien und Geräten. Seit ihrer Entdeckung bis heute ist die Trennung der RE-Elemente eine große Herausforderung für die Chemiker, die sich von der mühsamen Kristallisation bis hin zu hochentwickelten Lösungsmittelextraktionsverfahren entwickelt hat. Die zunehmende Einbindung und Abhängigkeit der REE in die Technologie hat Bedenken hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit geweckt und zu neueren Studien über verbesserte Trennverfahren motiviert, um eine Kreislaufwirtschaft für EE zu erreichen“.<sup>639</sup>

Die Unterteilung in leichte (LREE: Scandium<sup>21</sup>, Lanthan<sup>57</sup> bis Europium<sup>63</sup>) und schwere (HREE: Yttrium<sup>39</sup>, Gadolinium bis Lutetium<sup>71</sup>) Elemente der Seltenen Erden ist teilweise strittig. In der Geochemie werden oft Scandium und Yttrium nicht als Seltene Erden betrachtet.

Im Gegensatz zu den Halbleitern und Metallen weisen die Seltenen Erden aufgrund der Struktur ihrer Atomhüllen im Festkörper keine Bandstruktur auf. Wegen ihrer chemischen Ähnlichkeit ist ihre verfahrenstechnische Trennung schwierig, sodass in technischen Anwendungen häufig Mischmetalle eingesetzt werden.

Seltene Erden haben einzigartige elektronische, optische, lumineszierende und magnetische Eigenschaften, die sie für ein breites Spektrum von Produkten und Anwendungen von entscheidender Bedeutung machen. So werden Seltene Erden beispielsweise als Katalysatoren, in der Fertigung, in der Medizin, in Keramiken und Gläsern verwendet. Sie sind von grundlegender Bedeutung für die Erzeugung von sauberer Energie und - allgemeiner noch - für den

<sup>638</sup> Vgl. ERMA, o. J.; IRENA, (2022).

<sup>639</sup> Übersetzung aus Cheisson & Schelter, (2019).

Übergang des Zeitalters der fossilen Brennstoffe zum Niedrig-Kohlenstoff-Zeitalter (siehe Abbildung 242).

„Obwohl es genügend bekannte Seltene Erden-Ressourcen gibt, um den gesamten Bedarf der Energiewende zu decken, besteht die größte Herausforderung darin, den Abbau und die Verarbeitung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg entsprechend des Nachfragewachstums auszuweiten.“<sup>640</sup>

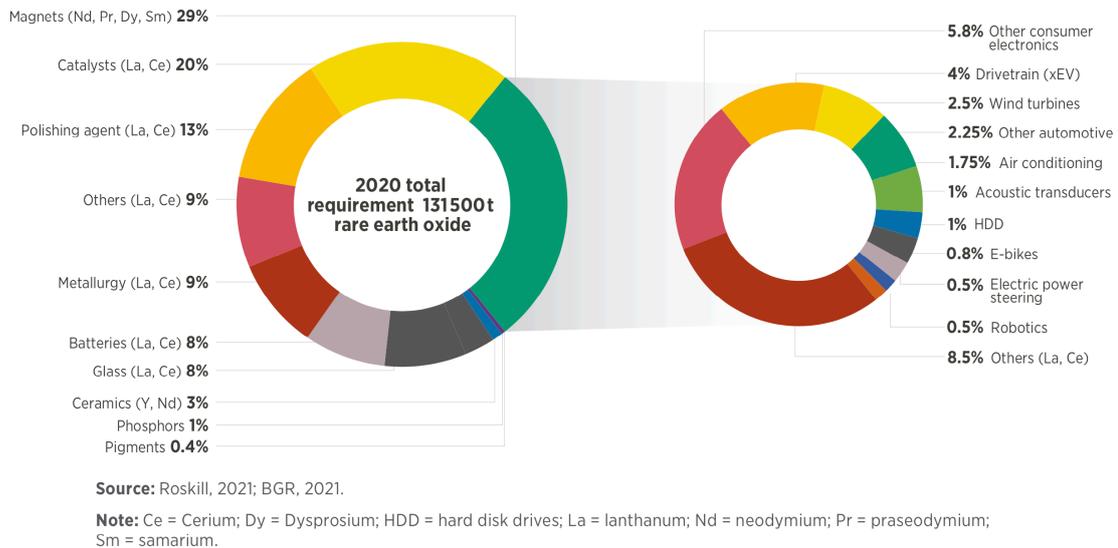


Abbildung 242: Bedarf an REE nach Endnutzungssektoren und Aufteilung des Bedarfs für Magnete nach Masse Status 2020.

Quelle: IRENA, 2022, S. 12.

## Nutzung für die Energieerzeugung

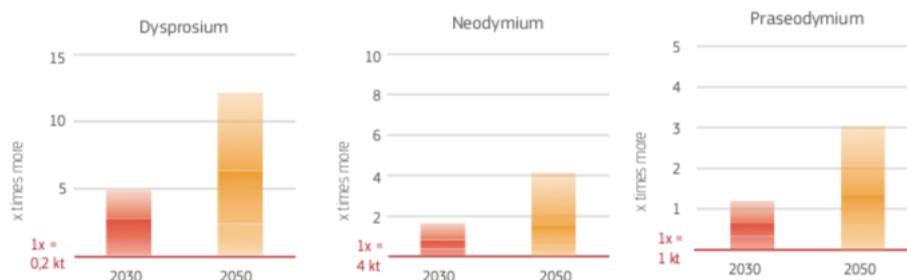


Abbildung 243: Zusätzliche Materialbedarfe für den Bau von Elektromotoren bei ausgewählten REE.

Quelle: European Commission, (2020).

Abbildung 243 verdeutlicht für ausgewählte Elemente der Seltenen Erden (Dy, Nd und Pd) den prognostizierten und überaus großen Zuwachs des Bedarfs an diesen Elementen bis zum Jahr 2050.

Das U.S. Department of Energy hat bei der Verfügbarkeit von Elementen nach Kurz- und Mittelfristigkeit unterschieden.<sup>641</sup>

<sup>640</sup> Übersetzung aus IRENA, 2022, S. 6.

<sup>641</sup> Vgl. DoE, 2011.

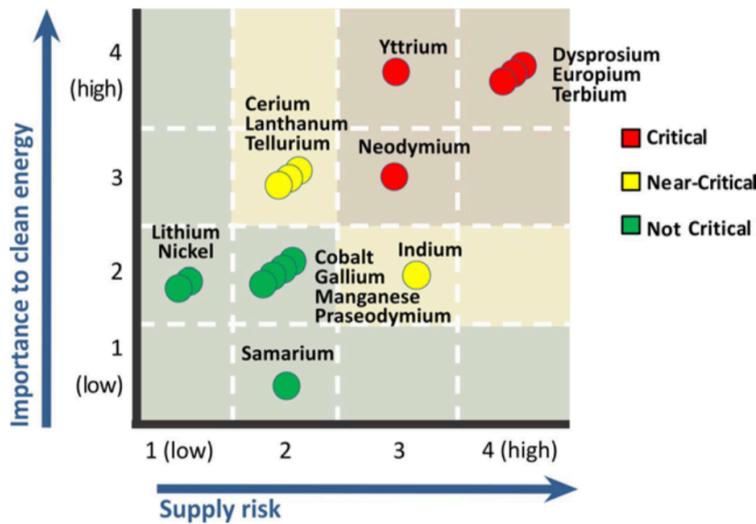


Abbildung 244: Kurzfristige Engpässe (2011 bis 2015) bei der Versorgung mit Rohstoffen.  
Quelle: DoE, 2011.

### Erwartete Engpässe

Kurzfristig, in diesem Fall bis 2015 (siehe Abbildung 244), wurden Versorgungsengpässe für die Erzeugung von Windenergie und energieeffizienter Beleuchtung vor allem für Dysprosium, Europium, Terbium, Neodym und Yttrium gesehen, die für die Magnete in Windturbinen oder im Fall von Europium und Terbium für die Produktion von CFLs und LFLs benötigt werden.

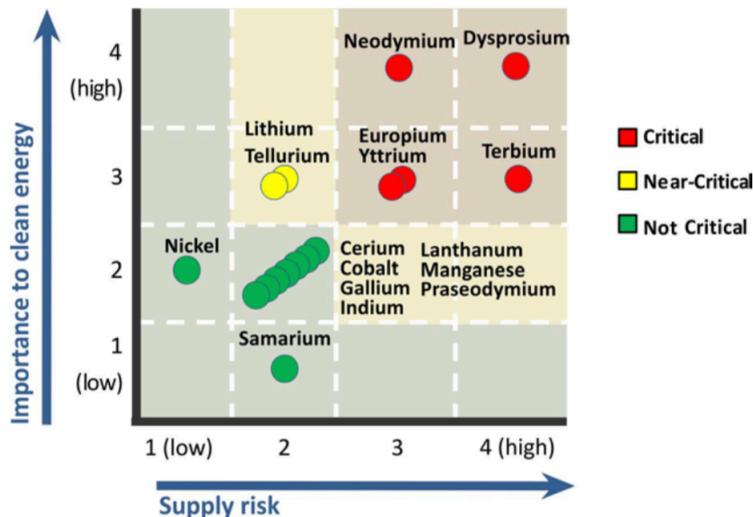


Abbildung 245: Mittelfristige (Jahre 2015–2025) Engpässe bei der Versorgung mit Rohstoffen.  
Quelle: DoE, 2011.

Abbildung 245 zeigt, dass mittelfristig, d.h. bis Mitte der 20-er Jahre weitere Rohstoffe wie Lithium, Tellur einen Engpass in der Versorgung aufweisen werden, die auch die Produktion von Smartphones, Computern und Flachbildschirmen betreffen werden (siehe auch Abbildung 240).

Eine Unabhängigkeit von der Dominanz der chinesischen Lieferanten von Seltenen Erden zu erzielen, scheint zumindest kurzfristig unmöglich. Derzeit gibt es weltweit nur sieben größere Anlagen, die Seltene Erden bearbeiten, wovon sich sechs in China und eine in Malaysia befinden. Neue Projekte wurden in verschiedenen Ländern wie Australien, Canada, Süd Afrika oder USA aufgesetzt. Diese Projekte sind jedoch aufgrund von Umweltbedenken und der langen Zeiträume für ihre Erschließung umstritten. So hat das grönländische Parlament vor kurzem die Erschließung eines der größten unerschlossenen Seltenerdorkommen der Welt verboten.

### Recyclingraten

Der US Geological Survey geht von erschlossenen Reserven der Seltenen Erden in Höhe von 137 Mt aus. Die unerschlossenen Ressourcen werden mit 308 Mt angegeben, was bei Fortschreibung der heutigen Verbrauchsdaten bei den Reserven noch 1100 Jahre reichen würde. „Neben den natürlichen Ressourcen enthalten bestimmte Rückstände wie Rotschlamm (aus der Aluminiumherstellung), Flugasche aus der Kohleverbrennung und Gips (aus der Kohleverstromung) erhebliche Mengen an Seltenen Erden, die zurückgewonnen werden können“.<sup>642</sup>

Trotz ihres seltenen Vorkommens betrug die Recyclingrate der Seltenen Erden bisher weniger als 1 %.<sup>643</sup> Das Problem des Urban Minings von SEE in z.B. ausrangierten Handys, Bildschirmen, Energiesparlampen und Autos ist, dass die SEE in diesen Produkten fein verteilt sind. Es wurden allerdings z.B. an der TU Freiberg kostengünstige chemische Verfahren wie „Sep-SelSA“ entwickelt, mit deren Hilfe SEE aus dem Schrott extrahiert werden können. Selbst die hochreine Trennung von SEE (>99,999 %) ist mit Hilfe von Ionenaustauschchromatographie möglich. Eine umweltverträgliche Recyclingstrategie ohne große Hitze und aggressiven Säuren für den Leuchtstoff Yox ( $Y_2O_3:Eu$ ) aus dem Abfall von Energiesparlampen wurde in Belgien entwickelt.<sup>644</sup>

Einige Bakterien benötigen leichte LEE (La, Ce, Pr, Nd) zum Wachsen, was sie geeignet macht, diese Elemente aus z.B. Elektroschrott herauszulösen. Haben die Bakterien die LEE einmal inkorporiert, dann können die Elemente durch Verfahren des Biominings gewonnen werden. Forscher der Harvard Universität präsentierten im Jahr 2016 ein Verfahren, bei dem Bakterien schwere SEE ( $Tm^{69}$ ,  $Yb^{70}$ ,  $Lu^{71}$ ) von anderen SEE dadurch trennen, dass sie bei einem pH-Wert von 6 alle SEE an ihrer Oberfläche binden und bei einem sauren Medium mit  $pH=2,5$  alle außer den drei genannten, die den geringsten Ionenradius besitzen, wieder freisetzen.

<sup>642</sup> Übersetzung aus IRENA, 2022, S. 7.

<sup>643</sup> Vgl. Daumann, (2018).

<sup>644</sup> Vgl. Daumann, (2018).

Am Lawrence Livermore National Lab wurde 2021 ein Verfahren entwickelt, bei dem eine Wiedergewinnung von REE durch natürliche Proteine in Aussicht gestellt wird.<sup>645</sup>

Tabelle 55: Förderung und Reserven von Seltenen-Erden.

	Förderung 2021 in REO kt <sup>646</sup>	Reserven in REO kt <sup>647</sup>	
China	168	44.000	Exportquoten bzw. Exportverbot von HREE in 2010 38 % der Weltreserven <sup>648</sup>
USA	43	1.800	1,3 % der Weltreserven
Myanmar	26		
Australien	22	3.400	3,5 % der Weltreserven
Madagaskar	3,2 <sup>(8)</sup>		
Indien	3 (2020)	6.900	6 % der Weltreserven
Russland	2,7 (2020)	18.000	10 % der Weltreserven
Brasilien	0,5	21.000	18 % der Weltreserven
Vietnam	0,4	22.000	19 % der Weltreserven
Grönland	n.a.	1.500	1,3 % der Weltreserven
Weltweit	240 <sup>8</sup>	120.000	

### 2.13.2.3 Nickel (Ni<sup>28</sup>)

#### Allgemeine Informationen

Obwohl Nickel nicht auf der Liste der kritischen Stoffe der EU und auch nicht auf der der amerikanischen Industrie steht (siehe Anhang 2.13), ist Nickel heute als kritischer Rohstoff anzusehen, da der Gesamtanteil des Imports aus Russland etwa 40 % (Stand 2019, siehe Abbildung 246) beträgt und die Kritikalität bedingt durch den russischen Überfall auf die Ukraine in den Listen noch nicht berücksichtigt worden war.

<sup>645</sup> Vgl. Dong et al., (2021).

<sup>646</sup> Werte aus Statista, 2023b.

<sup>647</sup> Reserven aus Statista (2022) mit Angabe der Oxidmengen REO Rare Earth Oxide

<sup>648</sup> Vgl. IRENA, (2022).

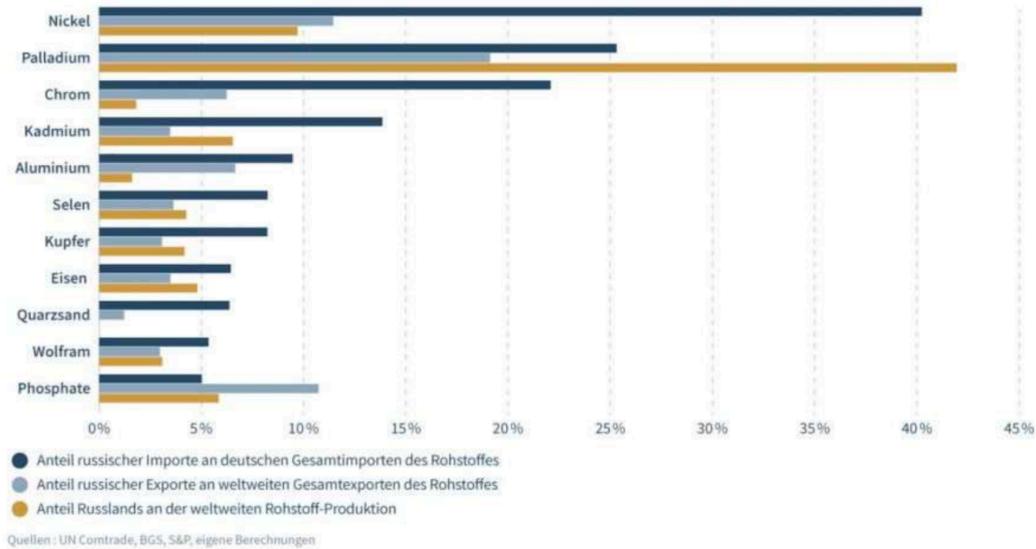


Abbildung 246: Anteil der russischen Importe an den deutschen Gesamtimporten. Quelle: Neitzel, 2022b.

Erfreulicherweise ist Russland nicht der einzige und auch nicht der größte Produzent von Nickel (siehe Tabelle 56), sodass eine sehr gute Chance besteht, Lieferengpässe zu vermeiden.

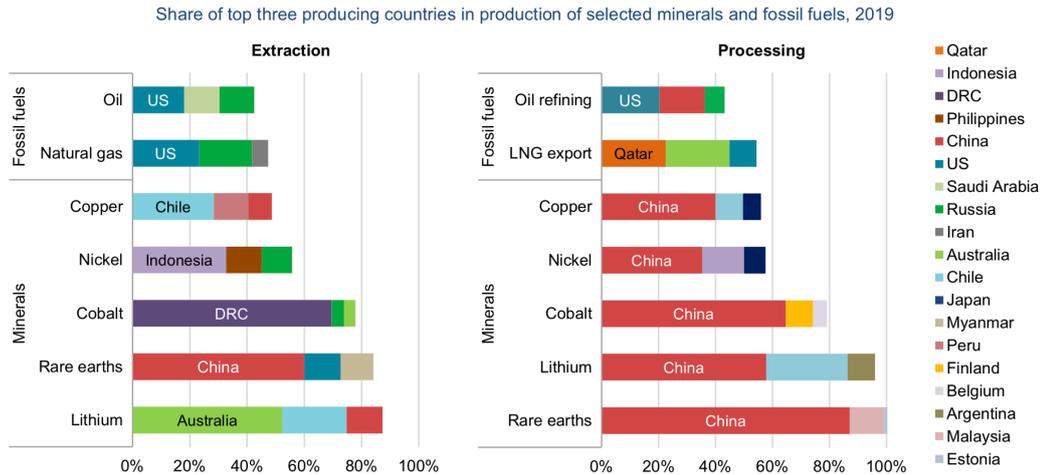
Land	Förderung (in t)
Indonesien	771.000
Philippinen	334.000
Russland	283.000
Neukaledonien (Frankreich)	200.000
Australien	169.000
Kanada	167.000
Volksrepublik China	120.000
Brasilien	77.100
Vereinigte Staaten	16.700
Andere Länder	373.000
<b>Gesamt</b>	<b>2.510.000</b>

Bei Statista werden für das Jahr 2021 auch Kanada (Ausfuhr von Nickel im Wert von 3,6 Mrd USD) und USA (2,2 Mrd USD) vor Russland (2 Mrd USD) genannt. Allerdings werden große Anteile der geförderten Nickelerze in China aufgearbeitet (siehe Abbildung 247, Seite 409), sodass wie bei den Seltenen Erden auch eine Abhängigkeit zu einem geopolitisch unsicheren Land entsteht.

Tabelle 56: Die größten Nickelproduzenten weltweit, Stand 2020. Quelle: Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/Nickel>.

Der überwiegende Teil des Nickels wird aus nickel- und kupferhaltigen Eisenerzen durch Rösten und einen nachfolgenden, recht aufwendigen Trennungsprozess vom Kupfer gewonnen. Geringe Mengen Nickel kommen auch gediegen in Neukaledonien (gehört zu Frankreich) vor. Bei der Produktion von Elektrofahrzeugen spielt neben den Seltenen Erden, Lithium und Kobalt auch Nickel eine entscheidende Rolle. Die IEA erwartet, dass der Bedarf in den nächsten Dekaden um 60 – 70 % weiter steigen wird, wie er es in den vergangenen Jahren bereits getan hat (siehe Abbildung 249 auf Seite 410).<sup>649</sup>

<sup>649</sup> Vgl. IEA, 2021, S. 5.



Notes: LNG = liquefied natural gas; US = United States. The values for copper processing are for refining operations. Sources: IEA (2020a); USGS (2021), World Bureau of Metal Statistics (2020); Adamas Intelligence (2020).

IEA. All rights reserved.

Abbildung 247: Produktion einiger Mineralien, die für die Energietransformation notwendig sind. Quelle: IEA, (2021).

### Nutzung für die Energieerzeugung

Bei den am häufigsten eingesetzten Akku-Typen (NCA: Nickel Cobalt Aluminium und NMC: Nickel Mangan Cobalt) werden 80 % bzw. 33 % Nickel eingesetzt.

Nickel wird auch in Li-Ion-Akkus verbaut, um höhere Energiedichten und höhere Speicherkapazitäten, d.h. höhere Reichweiten für elektrisch angetriebene Fahrzeuge bei geringeren Kosten zu ermöglichen.<sup>650</sup>

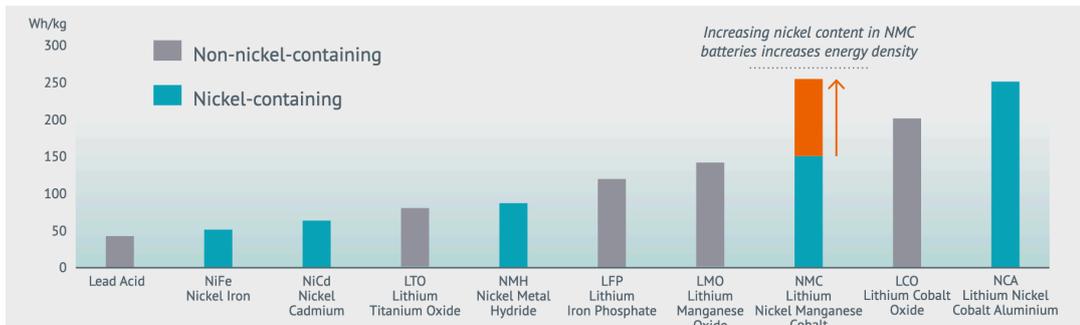


Abbildung 248: Überblick über verschiedene Typen von Batterien mit und ohne Nickel. Quelle: Nickel Institute

Die Konstruktion alkalischer Elektrolyseure benötigt „Nickel in Mengen von mehr als einer Tonne pro MW oder 1.000 Tonnen für eine 1-GW-Elektrolyseur-Anlage, was eine heute avierte Größe von Elektrolyseuren ist. Es wird erwartet, dass der Nickelbedarf für alkalische Elektrolyseure sinkt, aber es ist nicht zu erwarten, dass Nickel bei zukünftigen Konstruktionen komplett entfallen wird. Wenn jedoch der heutige Stand der Technik mit einem Verbrauch von ca. 800 kg/MW repräsentativ für den künftigen Bedarf wäre und selbst wenn alkalische

<sup>650</sup> Vgl. Nickel Institute, o. J.

Elektrolyseure den Markt dominieren, dann würde die Nickelnachfrage für Elektrolyseure viel niedriger bleiben als die für Batterien im SDS. Sollten in einem solchen Fall jedoch die Nickelpreise aufgrund von Herausforderungen in der Batterielieferkette stark ansteigen, würden sich die Kosten für Elektrolyseure ändern. Neben Nickel könnten für einen alkalischen Elektrolyseur mit einer Leistung von 1 MW heute etwa 100 kg Zirkonium, eine halbe Tonne Aluminium und mehr als 10 Tonnen Stahl sowie kleinere Mengen an Kobalt und Kupferkatalysatoren benötigt werden“ (siehe Abbildung 273, Seite 445).<sup>651</sup>

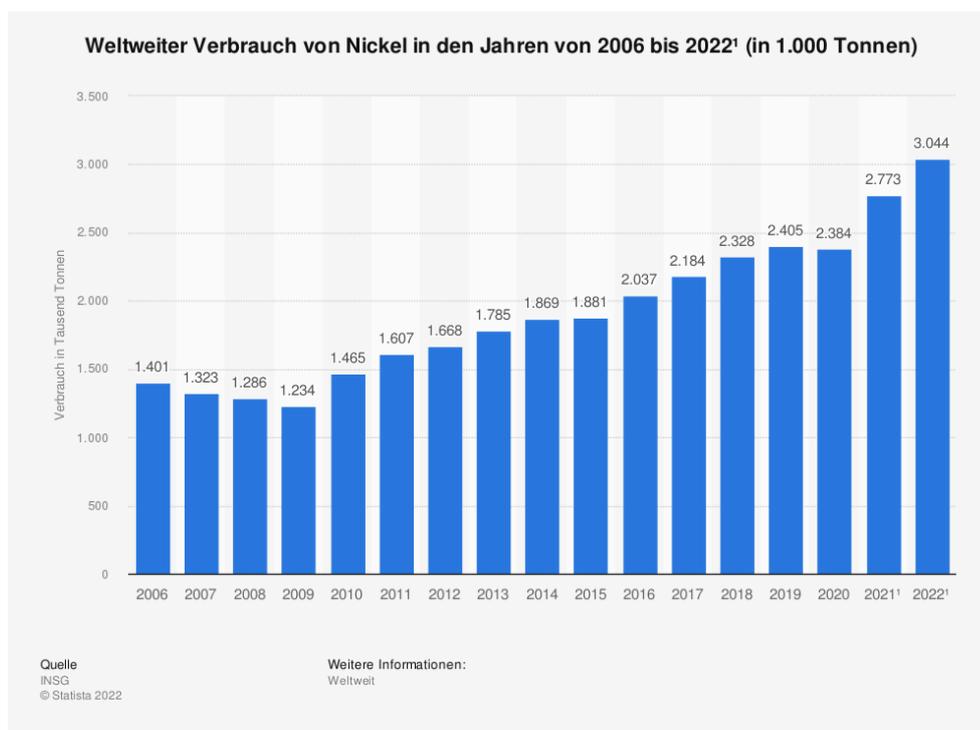


Abbildung 249: Weltweiter Verbrauch von Nickel in den Jahren 2006 bis (2022).

Quelle: Statista, 2022i.

Die geschätzten abbauwürdigen Vorkommen von Nickel betragen etwa 70 – 170 Mt.

### Erwartete Engpässe

Durch den mit der Elektrifizierung sehr stark ansteigenden Bedarf an Nickel zur Produktion von Akkumulatoren/Batterien und Elektrolyseuren, kann ein Engpass an diesem Übergangsmetall auf dem Weltmarkt entstehen. Die IEA sagt hierzu: „Weltweit gibt es keinen Mangel an Ressourcen, und es bieten sich beträchtliche Chancen für diejenigen, die Mineralien auf nachhaltige und verantwortungsvolle Weise fördern können. Da kein Land allein in der Lage sein wird, diese Probleme zu lösen, ist eine verstärkte internationale Zusammenarbeit unerlässlich“,<sup>652</sup> von der wir aber derzeit noch keine Ansätze erkennen können.

<sup>651</sup> Übersetzung aus IEA, 2021, S. 112.

<sup>652</sup> Übersetzung aus dem Vorwort zu IEA, (2021).

## Recyclingraten

Das Recycling von Nickel wird als eines der effizientesten Wiederverwendungsprozesse betrachtet.<sup>653</sup> Das Nickel Institute schätzt, dass 68 % des in Produkten enthaltenen Nickels recycelt wird (Stand 2010). Weitere 15 % werden durch den Stahlkreislauf wiederverwendet und nur 17 % landen auf der Müllkippe. Nickel kann aus Edelstählen durch Recycling gewonnen werden und mittlerweile wird auch von Verfahren berichtet, mit denen Nickel aus Nickel-Cadmium-Batterien wiederverwendet werden kann.<sup>654</sup>

Es wird erwartet, dass die Nutzung nickelhaltiger Li-Ion-Akkus in den nächsten 20 Jahren sehr stark zunehmen wird, sodass das Recycling von Akkus immer wichtiger werden wird.

Derzeit recycelt die Firma Umicore in Belgien im industriellen Maßstab diese Akkus (ca. 7000 t/a) durch einen Hydoraffinationsprozess, bei dem Nickel, Kobalt, Kupfer und Lithium getrennt werden.<sup>655</sup> Auch Glencore, der Schweizer Rohstoffhändler, ist einer der größten Recycling- und Aufbereitungsunternehmen für nickelhaltige Materialien.

Erdöl enthält einen natürlichen Anteil von Nickel, sodass in der Asche von verbranntem Schweröl Nickel mit einer Konzentration von ca. 10 % auftritt.

Auch bei Nickel sind die Zukunftsaussichten für „Urban Mining“ sehr gut, da in vielen Ländern der Abfall mehr Anteile an wertvollen Metallen enthält als lokal vorkommende Erze.

### 2.13.2.4 Kupfer (Cu<sup>29</sup>)

#### Allgemeine Informationen

Kupfer ist ein hervorragender Leiter von Wärme und Strom und ist daher generell für die Transformation in der Energiewirtschaft und die Elektrifizierung unerlässlich. Die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer ist nur wenig schlechter als die von Silber und deutlich besser als die von Gold. Da Verunreinigungen im Kupfer die Leitfähigkeit stark herabsetzen, wird Kupfer in der Regel mit höchster Reinheitsstufe von 99,9 % produziert. Obwohl Kupfer auch gediegen vorkommt, wird der überwiegende Teil der Kupferproduktion durch Verhüttung von Kupfererzen gewonnen.

Die höchsten Produktionsmengen von Kupfer werden von Chile (5.600 kt im Jahr 2021) und Peru (2.200 kt im Jahr 2021) erzielt, gefolgt von China (1.800 kt) und DRK Kongo (1.800 kt).

<sup>653</sup> Vgl. Nickel recycling, (2022).

<sup>654</sup> Vgl. Espinosa & Tenório, 2006.

<sup>655</sup> Vgl. Umicore, o. J.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verhüttung von Kupfer konnten zumindest in Deutschland in den letzten Jahren signifikant verringert werden wie Abbildung 250 aus Daten der Aurubis AG zeigt.



**Details:** Weltweit; Deutschland; 2000 bis 2020

Abbildung 250: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Tonnen je Tonne erzeugten Kupfers in den Jahren 2000 bis 2020.

Quelle: Statista, 2022d.

### Nutzung für die Energieerzeugung

Kupfer wird auch als das „Metall der Elektrifizierung“ bezeichnet, da alle Bereiche von der Energieerzeugung, über den Transport der Energie und die Transformation der Elektrizität in Fortbewegung, mechanische Arbeit oder Wärme ohne Kupfer nicht denkbar sind. Wegen seiner hervorragenden Leitfähigkeit von Strom wird der überwiegende Teil der Kupferproduktion für Kabel und Elektro eingesetzt (57 %) <sup>656</sup> wie z.B. in den Wicklungen der Generatoren und Elektromotoren. Aus Abbildung 236 ist der Anteil von Kupfer bei der Energieerzeugung zu entnehmen: 8.000 kg/MW bei Offshore und ca. 3.000 kg/MW bei Onshore Wind und PV.

Kupferkabel zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität und Bruchfestigkeit aus. Für Hochleitungen der Bahn wird zur Erhöhung der Zugfestigkeit Magnesium hinzulegiert und die hierdurch bewirkte Verschlechterung der Leitfähigkeit wird in Kauf genommen.

### Erwartete Engpässe

Laut eines S&P-Global-Berichts benötigt die Energieproduktion durch Solarkraftwerke doppelt und die Offshore-Windkraft fünfmal mehr Kupfer pro Megawatt installierter Leistung als bei

<sup>656</sup> Vgl. Statista, 2022g.

klassischer Erzeugung mit Erdgas oder Kohle.<sup>657</sup> Der Bedarf an Kupfer beträgt heute 25 Mt/a und wird bis 2035 auf 50 Mt/a steigen und bis 2050 auf 53 Mt/a weiter anwachsen.<sup>658</sup> Gemäß des „Rocky Road Szenario“ (siehe Abbildung 251), bei dem eine Verbesserung der Nutzungs- und Recyclingeffizienz angenommen wird, bedeutet dies im Jahr 2035, dass eine Menge von etwa 10 Mt/a fehlen wird, um das Net-Zero Ziel zu erreichen.

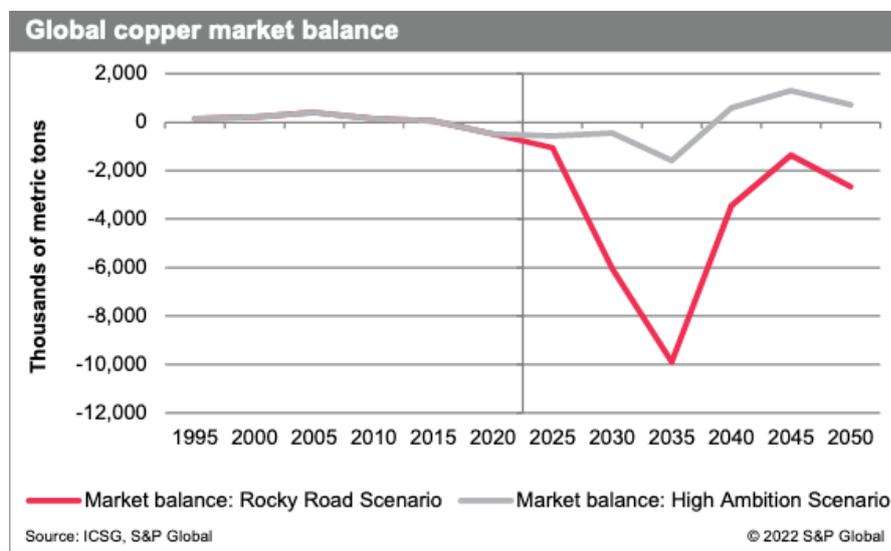


Abbildung 251: Globale Bilanz des Kupfermarktes gemäß „Rocky Road Szenario“.  
Quelle: S&P Global, (2022).

Abbildung 252 zeigt den von S&P prognostizierten Anstieg des weltweiten Kupferbedarfs bis 2050.

Der Pro-Kopf-Verbrauch steigt bis zu einem Maximum im Jahr 2036 auf etwa 5,5 t/1000 Menschen an und verbleibt bis 2050 auf einem hohen Niveau. Der Kupferpreis „Dr. Copper“ hatte sein Allzeithoch mit 10.000 USD/t zu Beginn des Jahres 2022. Der Rückgang des Preises auf etwa 7.000 USD/t wird als Indikator für die Abkühlung der Weltwirtschaft und Beginn für den Rückgang der Inflation gewertet.<sup>659</sup>

<sup>657</sup> Vgl. S&P\_Global, (2022).

<sup>658</sup> Vgl. S&P\_Global, (2022).

<sup>659</sup> Vgl. Finanzen.net, (2022).

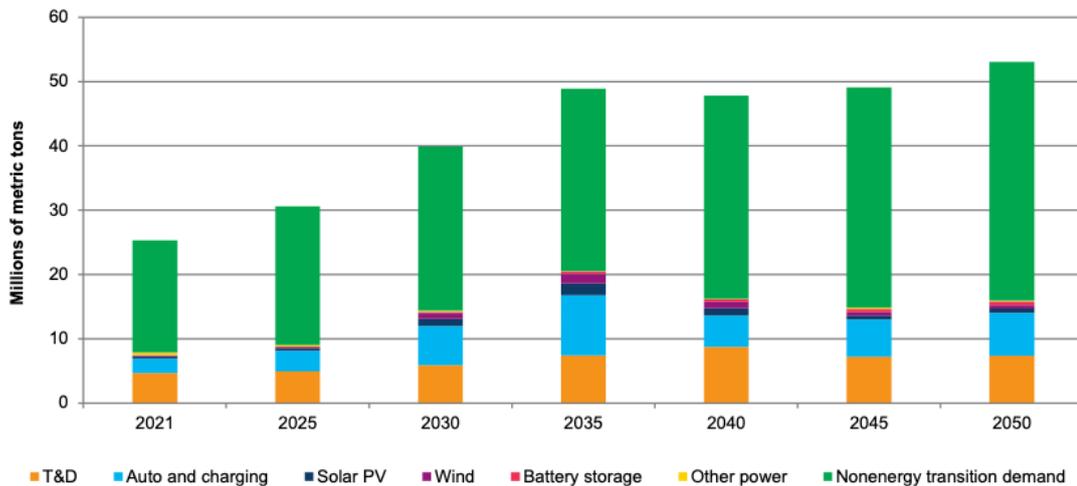


Abbildung 252: Weltweiter Bedarf an raffiniertem Kupfer.

Quelle: S&P Global, (2022).

„Im 21. Jahrhundert könnte sich die Kupferknappheit zu einer zentralen destabilisierenden Bedrohung der internationalen Sicherheit ausweiten. Die prognostizierten jährlichen Engpässe werden die Versorgungsketten in einem noch nie dagewesenen Maße belasten. Die Herausforderungen, die sich daraus ergeben, erinnern an den Kampf um Öl im 20. Jahrhundert, könnten aber durch eine noch stärkere geografische Konzentration der Kupferressourcen und der nachgelagerten Industrie, die das Kupfer zu Produkten veredelt, zunehmen.“<sup>660</sup>

## Recyclingraten

Kupfer wird Deutschland zu circa 50 % recycelt,<sup>661</sup> weltweit sind es nur circa 33 %. Mit einer durchschnittlichen Lebensdauer der Kupferprodukte von ca. 33 Jahren und den Produktionskapazitäten ergibt sich ein Anteil von wiederverwendetem Kupfer von ca. 80 %.<sup>662</sup>

### 2.13.2.5 Mangan (Mn<sup>25</sup>)

#### Allgemeine Informationen

Mangan ist ein sprödes Übergangsmetall, das in einigen Eigenschaften dem Eisen ähnelt. Mangan zählt zu den unbekannteren Micronährstoffen und wird z.B. für die Bildung von Enzymen im Körper benötigt. In der Stahlerzeugung wird Ferromangan als Legierungsbestandteil eingesetzt und entzieht dem Stahl Sauerstoff und Schwefel und verbessert hierdurch die Durchhärtung des Stahls. In Alkali-Mangan-Batterien wird Mangan als Kathode verwendet.

<sup>660</sup> Übersetzung aus S&P\_Global, 2022, S. 9.

<sup>661</sup> Vgl. Deutsches Kupferinstitut, (2019).

<sup>662</sup> Vgl. Wikipedia, o. J. b

Aber auch in Li-Ion-Batterien wird Mangan verbaut (siehe Abbildung 257, S. 418). Der Anteil von Mangan bei der Stromerzeugung ist der Abbildung 236 auf S.395 zu entnehmen.

Die Länder mit den höchsten Fördermengen von Mangan werden in Abbildung 253 dargestellt.

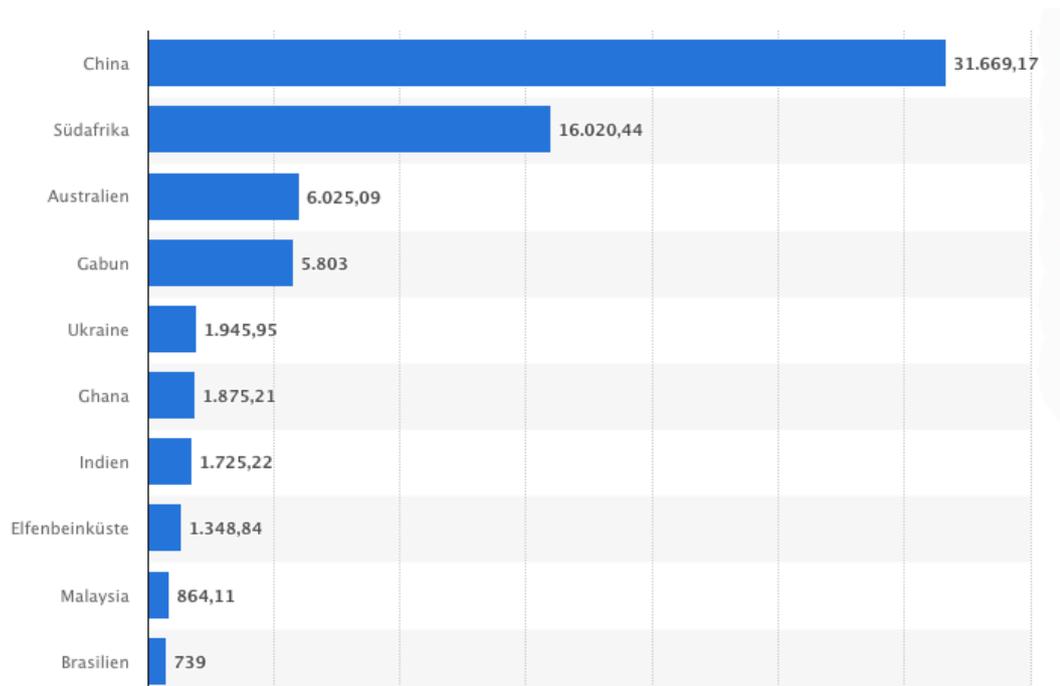


Abbildung 253: Fördermengen von Mangan in 1.000 t (kt) nach Ländern im Jahr 2020.

Quelle: Statista, 2022e.

Auch hier ist erneut China der größte Produzent von Mangan.

Etwa 60 % des Meeresbodens ist mit Manganknollen bedeckt.<sup>663</sup> Das Vorkommen wird auf 10 Gt (Mrd Tonnen) geschätzt. Je nach Lagerort variieren die Mangangehalte bis maximal 34 % (Peru-Becken). Der höchste Eisengehalt von 16 % ist in Knollen des Penrhyn-Beckens (Indischer Ozean) zu finden, in denen auch etwa 0,4 % Kobalt enthalten sind. Aber auch Kupfer und Nickel sowie Spuren von Platin und Tellur können in den kartoffelgroßen Knollen enthalten sein.<sup>664</sup> Die Dichte der Knollen auf dem Meeresboden variiert ebenfalls von 25 kg/m<sup>2</sup> (Cookinseln) bis 5 kg/m<sup>2</sup> im Penrhyn-Becken.

Da die Knollen auf dem Boden der Tiefsee in einer Tiefe von etwa 5.000 m liegen, bereitet ihr Abbau bzw. das Aufsammeln erhebliche technische und finanzielle Probleme. Obschon erstmals in den 1970er-Jahren, getrieben durch ein von den Ölkrisen entfachtene Sucheifer nach alternativen Energie- und Mineralquellen, erfolgreiche Versuche unternommen wurden, die Knollen aus großer Tiefe zu bergen, wurden die Bemühungen nicht weitergeführt, da die Auswirkungen auf das Ökosystem Meer bis heute nicht abzuschätzen sind, aber wegen der abbaubedingten Zerstörung der Meeresböden sicher erheblich sein werden. Im März 1978

<sup>663</sup> Vgl. Manganknollen, (o. J.)

<sup>664</sup> Vgl. Zeitler, (2011).

wurden etwa 800 t Manganknollen an die Oberfläche gepumpt. Da einer Abschätzung zufolge etwa 5.000 t/Tag notwendig wären, um die Kosten für die Förderung zu decken, wurden die Aktivitäten eingestellt.<sup>665</sup>

## Nutzung für die Energieerzeugung

Aus Abbildung 254 ist die besondere Bedeutung von Mangan für den Bau von NMC und LMO-Batterien zu erkennen. Gerade bei den für die Elektromobilität benötigten LMO-Akkus werden ca. 100 kg/BEV verbaut.

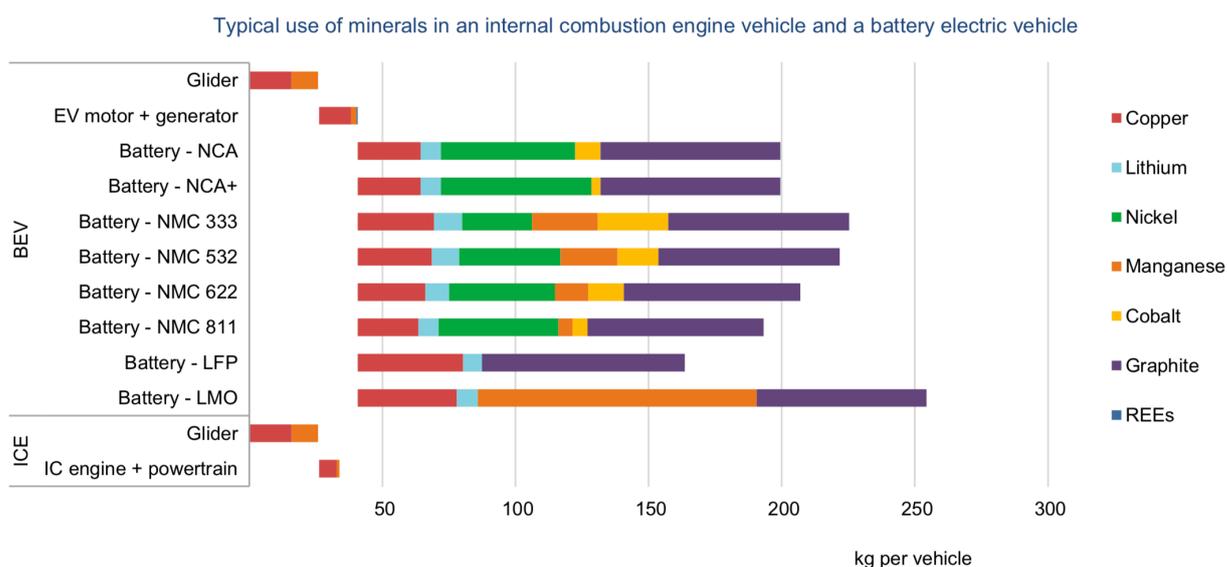


Abbildung 254: Nutzung verschiedener Mineralien für den Bau von Batterien für elektrische Fahrzeuge.

Quelle: IEA, 2021, alle Akkus mit 75 kWh und Graphitelektroden.

## Erwartete Engpässe

Im Kapitel 2.13.3.4 wird in Tabelle 58, S. 434 auf den enorm steigenden Bedarf an Mangan im Bereich der Hochleistungsspeicher verwiesen. Der Bedarf im Jahr 2018 von etwa 11.140 t Mangan wird auf prognostizierte 461.300 t – also mehr als das Vierzigfache im Jahr 2040 ansteigen.<sup>666</sup>

## Recyclingraten

Bei der Betrachtung der Abbildung 269, S.438 fällt auf, dass Mangan bei den Recyclingraten noch nicht auftaucht. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass mit dem Ausbau des Batteriercyclings auch die Recyclingraten von Mangan zunehmen werden.

<sup>665</sup> Vgl. Zeitler, (2011).

<sup>666</sup> Vgl. Statista, (2022h).

### 2.13.2.6 Lithium (Li<sup>3</sup>)

#### Allgemeine Informationen

Lithium ist ein Alkalimetall, das entweder bergmännisch abgebaut wird (Einsatz von hoher Energie und chemischen Prozessen) oder aus einer Sole mit Verunreinigungen von Magnesium und Sulfaten gewonnen wird (z.B. Atacama mit Einsatz von Sonnenenergie).

Der größte Produzent Talison Lithium in Australien baut Lithium im klassischen Bergbau ab. Die Lithiumproduktion verschiedener Länder ist aus Abbildung 255 zu entnehmen. Australien liegt zwar beim Abbau international an erster Stelle, die größten Vorkommen lagern allerdings in Chile (siehe Abbildung 256).

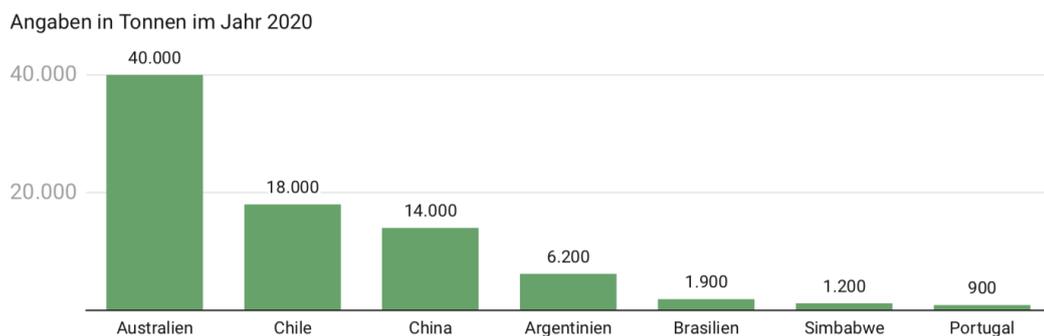


Abbildung 255: Lithiumproduktion nach Ländern.

Quelle: Neitzel, (2021).

Die Verkehrswende hin zu Elektroautos hat den Bedarf nach Materialien, zu denen insbesondere wegen der Akkus auch Lithium gehört, enorm befeuert.

Abbaugelände werden immer wieder neu gefunden und eröffnet. Selbst im Oberrheingraben kann Lithium in geringen Mengen aus dem Thermalwasser gefiltert werden.

Seit dem Jahr 2020 ist auch Lithium in der EU ein kritischer Rohstoff, da einige Kalkulationen für die Jahre 2030 / 2050 einen 18 / 60-mal höheren Lithium-Bedarf für die Herstellung von E-Autos und Energiespeichern vorhersagen als im Jahr 2020. In Abbildung 257 wird für 2025 allerdings „nur“ der doppelte Verbrauch von Lithiumcarbonatäquivalenten gegenüber dem Verbrauch im Jahr 2015 prognostiziert.

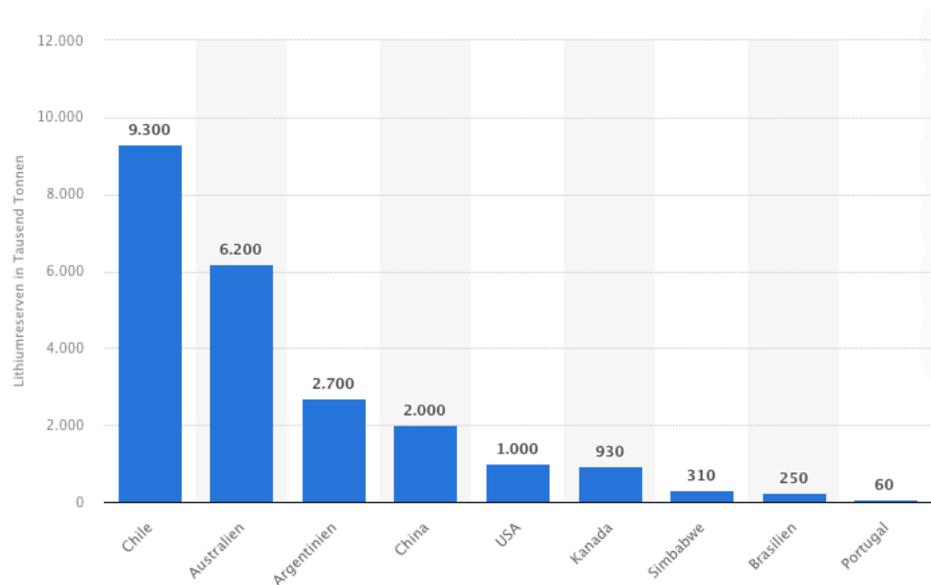


Abbildung 256: Länder mit den größten Lithiumvorkommen im Jahr 2022 in kt.  
Quelle: Statista (2022j).

### Nutzung für die Energieerzeugung

Lithium wird in Li-Ion-Akkumulatoren eingesetzt mit einem Verbrauch von etwa 120-180 g Li/kWh. Abbildung 257 zeigt, dass für alle Mineralien, die für die Produktion von Akkumulatoren wichtig sind, aber insbesondere für Lithium, ein starker Mehrverbrauch erwartet wird.

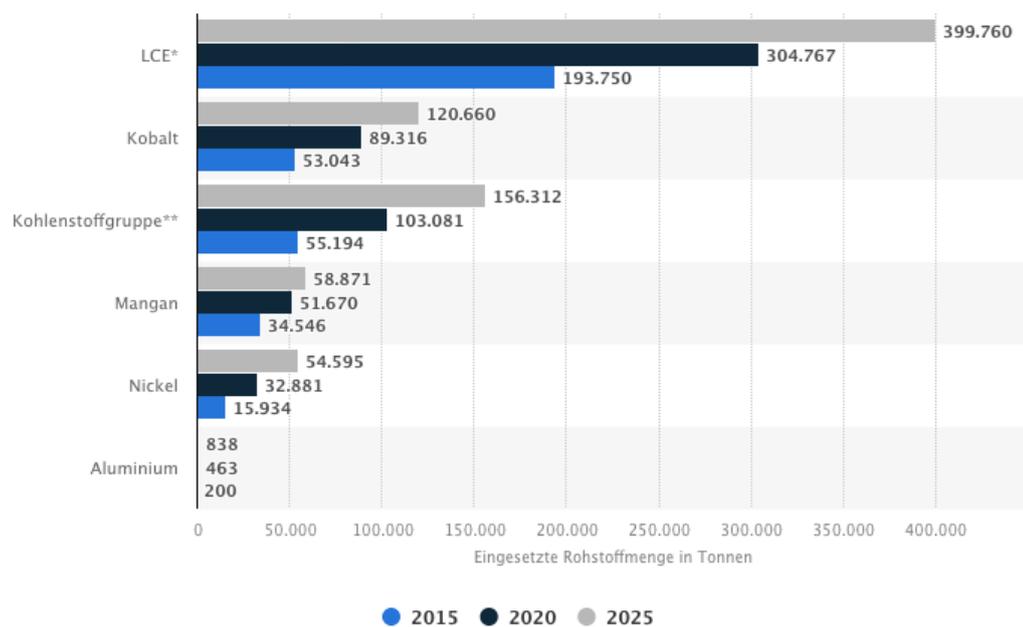


Abbildung 257: Rohstoffmengen in Li-Ion-Batterien nach Rohstoffen im Jahr 2015 und Prognosen für die Jahre 2020 und 2025.

Quelle: Statista, 2022f.

### Erwartete Engpässe

Zur Förderung von Lithium werden große Mengen Wasser benötigt. In Chile, dem Land mit einer der größten Fördermengen, herrscht seit der vollständigen Privatisierung der Wasserversorgung ein Wasser-Krieg, da mehr Wasser insbesondere von der Agrarindustrie verbraucht wird als auf natürlichem Wege nachkommt.<sup>667</sup> Die Frage ist, wann die Förderung von Lithium und Kupfer, die größten Wasserverbraucher in Chile, ihre Produktion zurückfahren müssen.

### Recyclingraten

Derzeit gibt es noch kein Recycling von Lithium (siehe Abbildung 270, S.439). Mit der Steigerung der Anmeldezahlen für elektrische Fahrzeuge steigt auch der Bedarf, die darin verwendeten Rohstoffe insbesondere Lithium, Nickel und Kobalt aus der Batterie wiederzuverwenden. So baut BWM zusammen mit dem chinesischen Partner Brilliance gerade das Recycling für die in den Fahrzeugen der Marke verbauten Akkus auf mit dem Ziel, aus 100 kWh-Akkus etwa 90 kg Ni, Li und Co zurückzugewinnen, was einem nicht näher bezifferten „hohen Prozentsatz“ entspricht.<sup>668</sup> Da der Markt für elektrische Fahrzeuge in China stärker wächst als in Europa und die Autobauer außerdem gesetzlich verpflichtet sind, die Rückholung der Akkus zu gewährleisten, wird damit gerechnet, dass bis 2025 etwa 780.000 t an ausgemusterten Batterien bei den Recyclingunternehmen anfallen werden.

#### 2.13.2.7 Kobalt (Cobalt, Co<sup>27</sup>)

##### Allgemeine Informationen

Kobalterze sind schon seit langer Zeit bekannt und wurden wegen ihrer blauen Farbe zum Färben von Keramik und Glas verwendet. Im Mittelalter wurden die Erze wegen der schlechten Gerüche beim Verarbeiten als von Kobolden verhext und als wertlos betrachtet. Wie andere Elemente auch hat Kobalt hierdurch seinen Spottnamen erhalten.

Kobalt wird überwiegend aus Kupfer- und Nickelerzen gewonnen. Da Kobalt mit nur etwa 40 ppm in der Erdkruste vorkommt, ist es immer Nebenprodukt bei der Kupfer- und Nickelgewinnung. Dennoch haben Förderung und Produktion im 21. Jahrhundert einen sprunghaften Anstieg genommen (siehe Abbildung 258).

---

<sup>667</sup> Vgl. Boddenberg, (2020).

<sup>668</sup> Neitzel, (2022a).

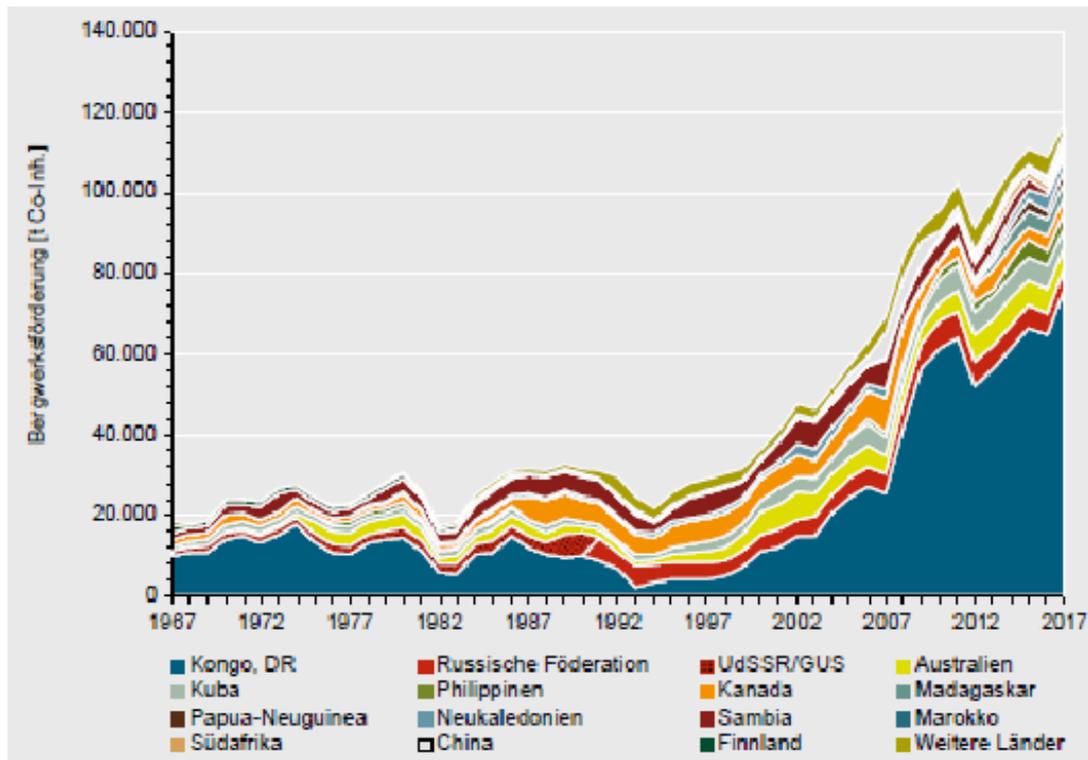


Abbildung 258: Zeitliche Entwicklung der Kobalt-Förderung und -Produktion.

Quelle: BGR, 2018; CRU, (2018).

Kobalt ist ein ferromagnetisches Übergangsmetall und ist im Periodensystem wegen seines Atomgewichts zwischen Eisen und Nickel angeordnet. Es leitet Wärme und elektrischen Strom gut.

### Nutzung für die Energieerzeugung

Kobalt ist für die Produktion von Akkus (Batterien), insbesondere von denen mit geringen Abmessungen (z.B. bei Mobiltelefonen) von überaus großer Wichtigkeit. Der größte Exporteur von Kobalt ist die Demokratische Republik Kongo (DRK) (siehe Abbildung 259).

Für die Anoden von Lithium-Akkus werden mittlerweile andere Materialien mit geringem Anteil von Kobalt verwendet (NMC Nickel, Mangan, Cobalt mit z.B. nur 2,8 % Co bei den Tesla Akkus), sodass für die Akkus von z.B. Fahrzeugen nicht mehr so viel Kobalt benötigt wird.

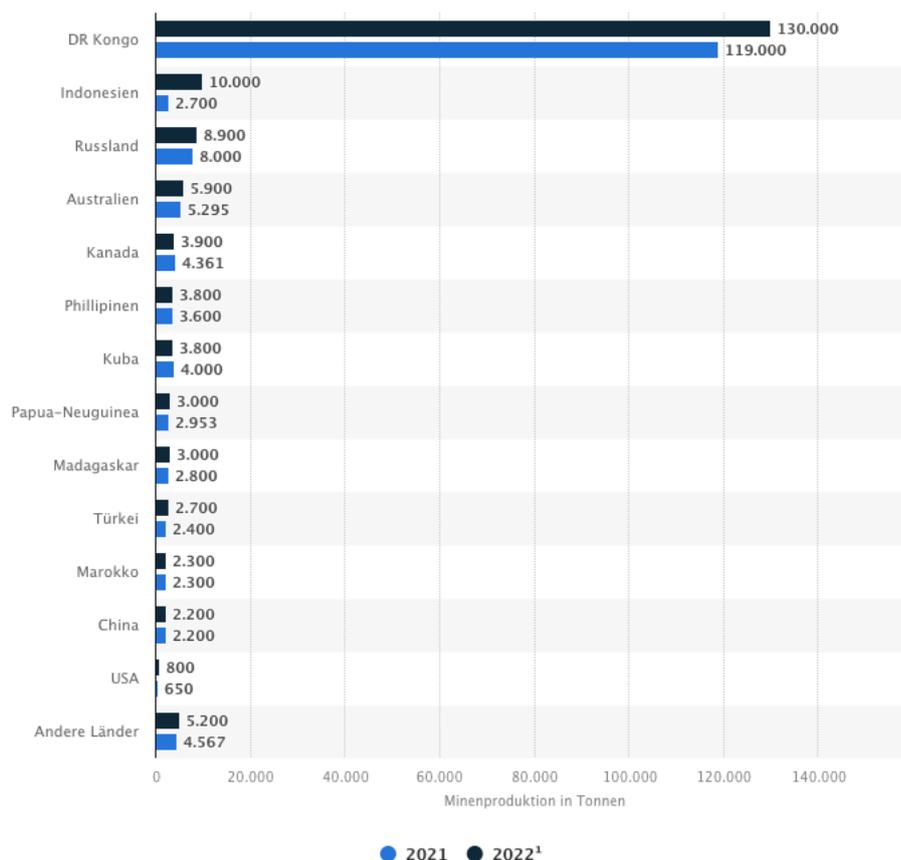


Abbildung 259: Weltweite Verfügbarkeit von Kobalt in ausgewählten Ländern 2021 und 2022) in 1.000 t.  
Quelle: Statista (2022k).

Die Freude darüber, dass ein wichtiger Rohstoff für die Entwicklung der westlichen Welt einmal nicht aus China kommt, verfliegt schnell, wenn man sich die Länder, in die Kongo exportiert, anschaut (siehe Abbildung 260). Die hohen Exportraten von Kongo ins Nachbarland Sambia deuten darauf hin, dass in Sambias Copperbelt die Erze aus dem Kongo zusammen mit der eigenen Produktion verhüttet werden. Kongo ist ein rohstoffreiches Land, das vor allem Kobalt, aber auch eine ganze Palette mit Au, Ag, Cu, Mn, Pb, Zn, Nb, Ta und Uran, aber auch Brennstoffe wie Erdöl und Kohle abbaut.

Noch 1995 kauften Europa und die USA rund 80 % der von DRK exportierten Produkte. Dieser Anteil ist bis 2012 auf unter 20 % gefallen mit einem Anstieg der Exporte nach Südostasien von 77 %.<sup>669</sup> Dass sich China um afrikanische Länder insbesondere kurz nach ihrer Selbständigkeit (Kongo wurde 1960 aus der grausamen Herrschaft Belgiens in die Selbständigkeit entlassen) besser gekümmert hat als die ehemaligen Kolonialherren und z.B. durch Kreditvergaben Kongo unterstützt hat, trägt nun Früchte, da das eigene Industriewachstum durch Verträge mit den Kreditnehmern über die Rohstoffversorgung gesichert werden konnte.<sup>670</sup>

<sup>669</sup> Vgl. Südwind, (2014).

<sup>670</sup> Vgl. Saam, (2008).

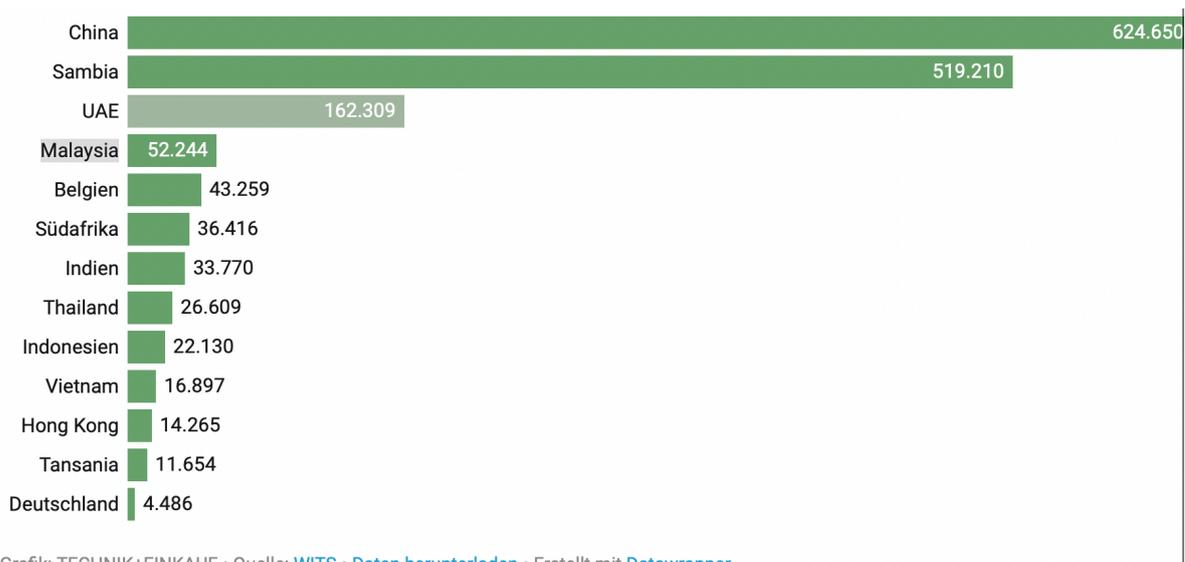


Abbildung 260: Länder und Mengen, in die DR Kongo Rohstoffe exportiert, Angaben in 1000 USD.  
Quelle: Neitzel, (2021).

### Erwartete Engpässe

Obwohl die sicheren Vorräte an Kobalt 25 Mt betragen und unter dem Meer noch einmal 120 Mt vermutet werden,<sup>671</sup> betrachtet die Wirtschaftswoche die Verfügbarkeit von Kobalt als dramatisch, da die Lagerstätten im politisch „extrem instabilen Südkongo“ liegen, die Exploration Milliarden verschlingt und zudem risikoreich ist. Die Jahresproduktion des Kongo beträgt 124 Mt Kobalt und der Jahresbedarf für 30 Mio BEV mit 90 kWh Akku (Plan der Autoindustrie für die Jahresproduktion in naher Zukunft) beträgt 400 Mt. D.h. der Bedarf ist mehr als doppelt so hoch wie das aktuelle Angebot. Wenn es nicht gelingt, Kobalt durch andere Materialien im Akku zu ersetzen, dann ist die Energiewende ernsthaft gefährdet.

Immerhin gelang es Tesla/Panasonic, den Kobaltanteil in der Kathode von 33 % auf 15 % zu senken. Dennoch geht die Schere zwischen Angebot und Nachfrage weiter auseinander, was den Preis für Kobalt in die Höhe trieb.

### Recyclingraten

Die nachstehende Abbildung zeigt, dass es um das Recycling der Ferrometalle, zu denen auch Kobalt gehört, nicht so schlecht bestellt ist, verglichen mit den Seltenen Erden in der Gruppe der Lanthaniden und der leichten Elemente Lithium und Beryllium.

<sup>671</sup> Vgl. Wirtschaftswoche, (o. J.)

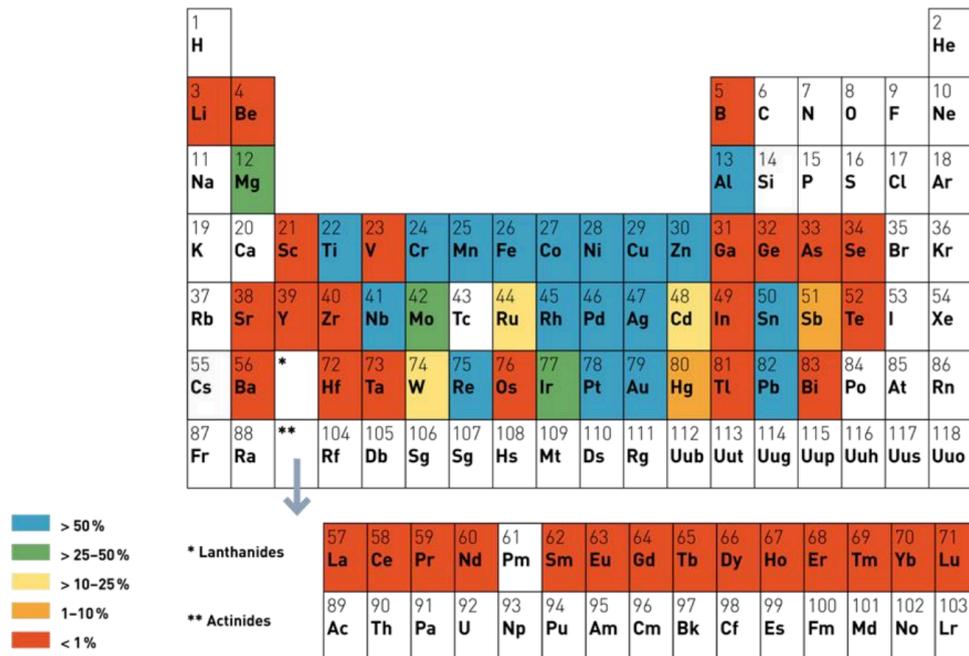


Abbildung 261: Globale End-of-Life-Recyclingraten von 60 Metallen.

Quelle: Buchert, (2018).

Das Recycling von Kobalt wird schon seit Jahren mit verbrauchten Katalysatoren, Hartmetall- und Superalloy-Schrott durchgeführt. Wie schon in Kapitel 2.2.4. erwähnt wurde, haben bereits einige Unternehmen wie Umicore in Belgien und Accurec in Krefeld mit dem Recycling von Batterien im großen Maßstab begonnen.

### 2.13.2.8 Iridium (Ir<sup>77</sup>)

#### Allgemeine Informationen

Iridium<sup>77</sup> gehört zu den Platingruppenmetallen (PGM), zu den neben Platin<sup>78</sup> auch Palladium<sup>46</sup>, Rhodium<sup>45</sup>, Ruthenium<sup>44</sup> und Osmium<sup>76</sup> gehören, die in den Gruppen 8, 9 und 10 und Perioden 5 und 6 im Periodensystem angesiedelt sind, und die sich durch hohe Dichten (Iridium und Osmium sind die dichtesten Elemente) und ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften auszeichnen. Die Elemente fallen bei der Gewinnung von Nickel und Kupfer als Nebenprodukt an.

Da Iridium als das korrosionsbeständigste Element gilt, sind das Ur-Kilogramm und das Ur-Meter aus diesem Edelmetall gefertigt. Gleichzeitig ist Iridium auf der Erde auch eines der seltensten nicht-radioaktiven Elemente mit einem Massenanteil an der Erdkruste von 1 ppb. Da Iridium im Universum recht häufig vorkommt, wird vermutet, dass der Eisenkern der Erde deutlich mehr Iridium als die Kruste enthält.

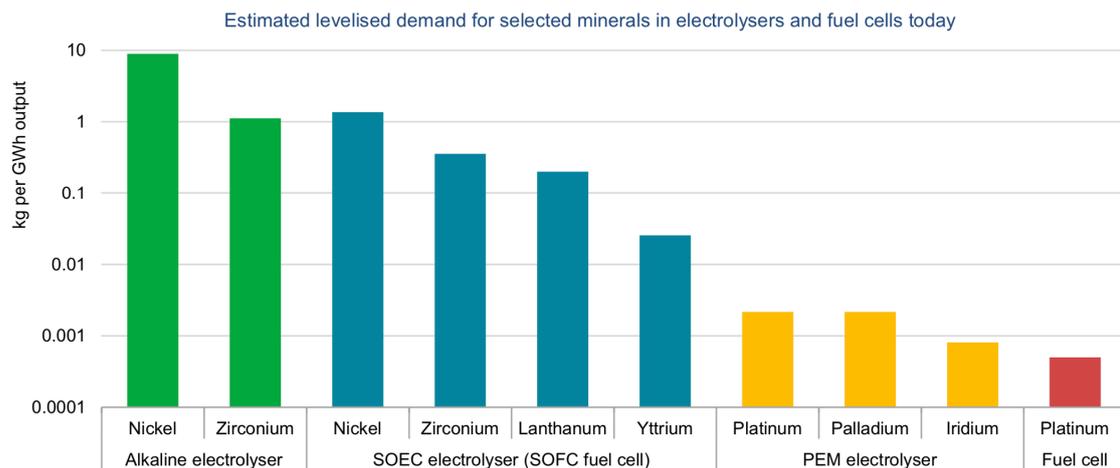
Die Vorkommen von Iridium liegen in Südafrika, im Ural, Nord- und Südamerika, in Tasmanien, Borneo und Japan.

Im Jahr 2020 wurden weltweit circa 9 t abgebaut, wobei 7 t alleine in den Platinminen Südafrikas gewonnen wurden. Die Seltenheit von Iridium drückt sich auch in seinem hohen Marktpreis von 6.100 USD/oz (zum Vergleich Gold in Juni 2022: 1.747 USD/oz) aus.

### Nutzung für die Energieerzeugung

Wegen seiner Härte wird Iridium neben Anwendungen in der Schmuckindustrie sowie der Medizin- und Dentaltechnik in der Herstellung von Zündkerzen für Flugzeugmotoren verwendet. Iridium wird bei Temperaturen unterhalb 0,11 K supraleitend, ist in diesem Zusammenhang aber nicht unersetzlich, da es Elemente gibt, die schon bei höheren Temperaturen supraleitend werden.

Iridiumoxid wird bei der PEM-Elektrolyse (siehe Abbildung 262) dazu genutzt, die Cell Reversal Tolerance zu erhöhen.



IEA. All rights reserved.

Notes: PEM = proton exchange membrane; SOEC = solid oxide electrolysis cells; SOFC = solid oxide fuel cell. Normalisation by output accounts for varying efficiencies of different electrolysis technologies. Full load hours of electrolyzers assumed to be 5 000 hours per year.

Sources: Bareiß et al. (2019); Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (2018); James et al. (2018); Kiemel et al. (2021); Koj et al. (2017); Lundberg (2019); NEDO (2008); Smolinka et al. (2018); US Department of Energy (2014; 2015).

Abbildung 262: Einsatz von Elementen bei der Konstruktion von Elektrolyseuren verschiedener Bauart und Brennstoffzellen.

Quelle: IEA, (2020b)

Anwendungen sind:

- Katalysator für die Zersetzung von Hydrazin ( $N_2H_4$ ) als Brennstoff zur Steuerung von Satelliten
- Katalysator für Brennstoffzellen

- Multifunktionaler Iridiumbasierter Katalysator<sup>672</sup>

### Erwartete Engpässe

Die statische Reichweite von Iridium beträgt 431 Jahre.<sup>673</sup> Dennoch könnte sich Iridium beim Aufbau von Elektrolyseurkapazitäten als Engpass erweisen, wenn es einerseits nicht gelingt, die Iridiumkatalysatorbeladung in PEM-Elektrolysezellen drastisch zu verringern und andererseits die Entwicklung einer Recycling-Infrastruktur für Iridiumkatalysatoren mit technischen End-of-Life-Recyclingraten von mindestens 90 % aufzubauen.<sup>674</sup>

### Recyclingraten

50 % des in der Industrie verarbeiteten Iridiums werden recycelt (Mis22). In der Literatur werden vielfältige Verfahren beschrieben z.B. für das Recycling von CCMs (catalyst coated membranes), die in PEM-Elektrolyseuren eingesetzt werden.<sup>675</sup> Nach Ansicht von Experten sollte ein Recyclinginfrastruktur für Membranen leicht aufzubauen sein.<sup>676</sup>

#### 2.13.2.9. Platin (Pt<sup>78</sup>)

### Allgemeine Informationen

Platin ist ein Edelmetall aus der Nickelgruppe, das stets gediegen vorkommt. In Südafrika wird das bei weitem meiste Platin produziert. Die Produktion beträgt fast  $\frac{3}{4}$  der Weltproduktion wie Abbildung 263 zeigt.

---

<sup>672</sup> Vgl. Frontis Energy, (2021).

<sup>673</sup> Vgl. Mischler, (2020).

<sup>674</sup> Vgl. Minke et al., (2021).

<sup>675</sup> Vgl. Carmo et al., 2019; Müller et al., 2018; Neitzel, 2022b.

<sup>676</sup> Kommunikation mit Mitarbeitern von Fa. Heraeus.

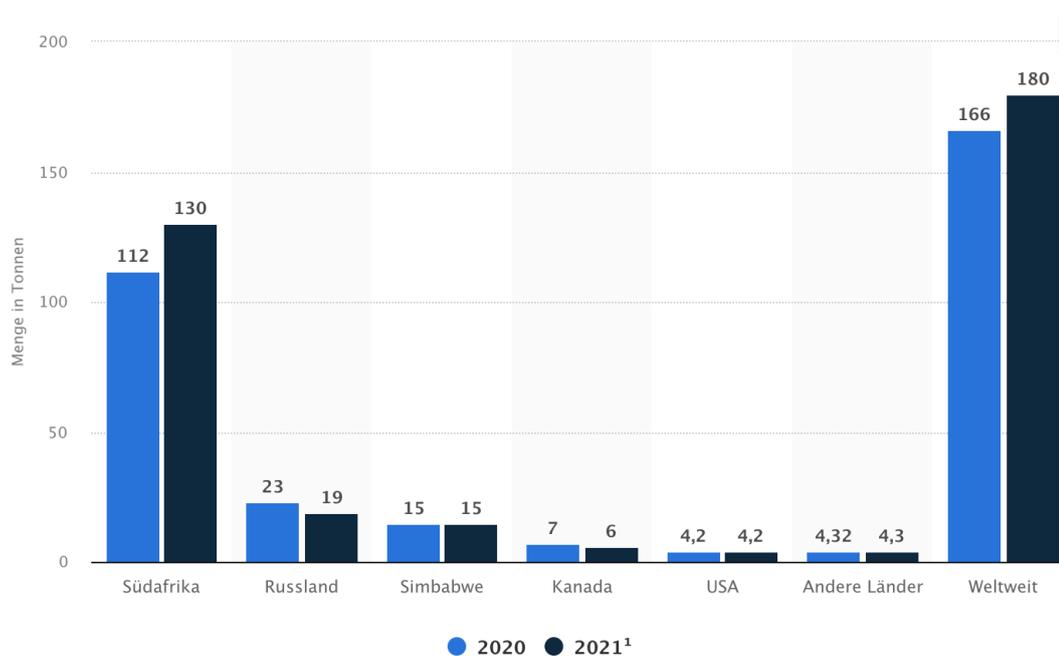


Abbildung 263: Die Minenproduktion von Platin aus fünf Ländern in den Jahren 2020 und 2021.

Quelle: Statista, 2023a.

Platin (von Platina, das kleine Silber) ist derzeit etwa fünfzigmal teurer (32.690 EUR/kg) als Silber, aber nur etwa etwas mehr als halb so teuer wie Gold (56.170 EUR/kg).

Neben der Verwendung in der Schmuckindustrie wird Platin in der Technik zur Ausführung von Thermoelementen oder Widerstandsthermometer (Pt100) eingesetzt. Auch ist der vielseitige Einsatz als Katalysator z.B. als Abgaskatalysator in den Auspuffanlagen, bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff (Döbereiner-Feuerzeug), im Kontaktverfahren zur Herstellung von Schwefelsäure oder bei der Ammoniak-Oxydation zu Salpetersäure (Ostwald-Verfahren) von großer Bedeutung.

Der Nachteil von Platinkatalysatoren ist, dass sie relativ schnell durch Verunreinigungen „vergiftet“ und damit unbrauchbar werden. Eine Regenerierung kann sie wieder einsatzfähig machen.

### Nutzung für die Energieerzeugung

Wie schon erwähnt kann Platin sowohl bei der Elektrolyse als auch beim umgekehrten Prozess der Verbrennung von Wasserstoff z.B. in der Brennstoffzelle als Katalysator eingesetzt werden. Um möglichen Engpässen vorzubeugen oder die Kosten durch Verwendung billigerer Materialien zu senken, wird am Ersatz von Platin in der Brennstoffzelle gearbeitet.<sup>677</sup>

Die bei einem Elektrolyseur und in der Brennstoffzelle verwendeten Mengen pro GW elektrischer Leistung können der Abbildung 262 auf Seite 424 entnommen werden.

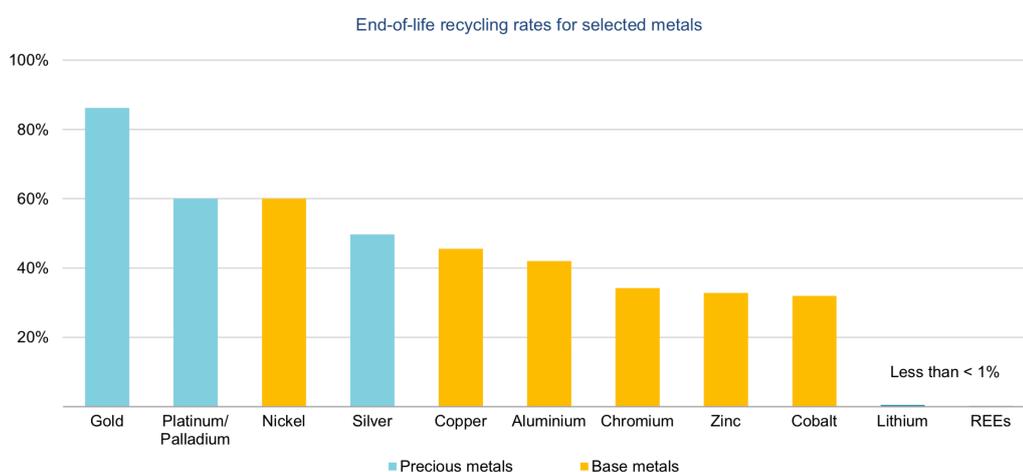
<sup>677</sup> Vgl. Solarserver, (2021).

## Erwartete Engpässe

Auf dem Markt kann derzeit ein Überangebot an Platin beobachtet werden, da die Automobilindustrie und auch die Schmuckindustrie, die zusammen 70 % der Nachfrage ausmachen, schwächeln. Die Nachfrage als Katalysatormaterial in Ö Raffinerien und in der chemischen Industrie dürfte anhalten. Heraeus sieht insgesamt aber keinen aktuellen Engpass.<sup>678</sup>

## Recyclingraten

Today's recycling rates vary by metal depending on the ease of collection, price levels and market maturity



IEA. All rights reserved.

Sources: Henckens (2021); UNEP (2011) for aluminium; Sverdrup and Ragnarsdottir (2016) for platinum and palladium; OECD (2019) for nickel and cobalt.

Abbildung 264: Derzeitige (2021) Recyclingraten.

Siehe hierzu auch Abbildung 261 auf S. 423.

In Deutschland ist Heraeus ein wichtiges Unternehmen für das Recycling von Edelmetallen wie Gold, Silber, Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium, Osmium und Rhenium.

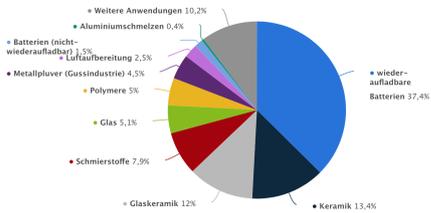
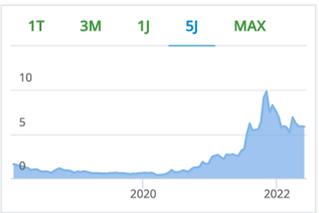
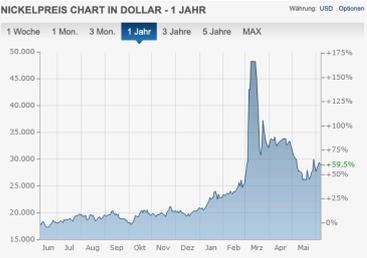
### 2.13.3 Anwendungsfelder

#### 2.13.3.1 Überblick der Rohstoffe und ihrer Anwendungsfelder

In der nachstehenden Tabelle sind für einige der als kritisch eingestuften Rohstoffe deren Anwendungsfelder kurz beschrieben und die im Mai 2022 recherchierten Marktpreise zur Information hinzugefügt.

<sup>678</sup> Vgl. Heraeus, (2020).

Tabelle 57: Verwendung von ausgewählten kritischen Elementen inklusive der Seltenen Erden, Tabelle sortiert nach Ordnungszahlen.

Element	Beschreibung	Marktpreis REO aus China <sup>679</sup>
Lithium (Li <sup>3</sup> )	<p>Lithium-Ionen Akkus, Glas- und Keramikprodukte<sup>680</sup></p> 	<p>6 EUR, nach Peak fallende Preise</p> 
Scandium (Sc <sup>21</sup> )	<p>Beleuchtung, Brennstoffzellen, Röntgentechnik, Laser, Legierungselement für Aluminium, Marktpreis von 4600 USD/kg im Jahr 2018 gefallen</p>	836 USD/kg
Mangan (Mn <sup>25</sup> )	<p>Als Legierungsbestandteil mit Al und Cu erhöht Mn die Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Verformbarkeit. In der Legierung mit Fe erhöht es die Härtebarkeit. In Konstantan verringert es die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur.</p> <p>Vorkommen in der Erdkruste: 0,085 %</p>	
Kobalt (Co <sup>27</sup> )	<p>Kobalt ist ein sehr hartes ferromagnetisches Übergangsmetall, das vor seiner Nutzung in der Elektrik und Elektronik zum Färben (Kobaltblau) von Glas und Keramik verwendet wurde. Einsatz von <sup>60</sup>Co in der Krebstherapie.</p> <p>In Akkus ermöglicht Co hohe Energiedichten und schnelles Laden.</p> <p>Anteil in der Erdkruste: 0,04 %</p>	220 - 320 EUR/kg je nach Menge <sup>681</sup>
Nickel (Ni <sup>28</sup> )	<p>Legierungsanteil in nichtrostenden Stählen, Alnico-Magnete, Elektrodenmaterial in Akkus, Saiten für E-Gitarren, Plattierung für Sanitärarmaturen.</p> <p>Weltweiter Verbrauch stark steigend siehe Abbildung 249.</p> <p>Anteil in der Erdkruste: 0,015 %<sup>682</sup></p>	<p>399 EUR/kg<sup>683</sup> 28.856 USD/t<sup>684</sup></p> 

<sup>679</sup> Werte aus Statista, 2022c; Werte aus IRENA, (2022).

<sup>680</sup> Vgl. Statista, (2022a).

<sup>681</sup> Vgl. MyMetalls, o. J.

<sup>682</sup> Zum Vergleich: der Anteil von Fe in der Erdkruste beträgt 4,7 %, der von O<sub>2</sub> 49,4 %

<sup>683</sup> Vgl. MyMetalls, o. J.

<sup>684</sup> Vgl. Börse Online, o. J.

Element	Beschreibung	Marktpreis REO aus China <sup>679</sup>
Kupfer (Cu <sup>29</sup> )	Cu ist ein hervorragender Leiter von Wärme und Strom und ist daher für die Transformation in der Energiewirtschaft unerlässlich.	
Zink (Zn <sup>30</sup> )	47 % der Produktion in 2018 wurden für das Verzinken als Rostschutz von Eisen und Stahl verwendet. Rest in Legierungen mit Cu (Messing), Al, Mg. Vorkommen in der Erdkruste: 76 ppm	 <p>ca 3500 EUR/t (juni 22)</p>
Gallium <sup>31</sup>	Ga ist in der Erdkruste ähnlich selten wie Lithium und Blei und kommt nur als Verbindung mit Al, Zn oder Ge-Erzen vor. Als Galliumarsenid wird Ga in der HF-Technik für die Herstellung von Transistoren verwendet, auch zur Herstellung von Leuchtdioden. Es wird bei Halbleitern zur Dotierung von Silicium (p-Dotierung) verwendet.	822 EUR/kg
Germanium <sup>32</sup>	Bis in die 70er Jahre führendes Element in der Elektronik für die Herstellung von Dioden und Transistoren bis es vom Silicium verdrängt wurde. Heute wird es für die Herstellung von Linsen für Nachtsichtgeräte und Wärmebildkameras verwendet.  Ge ist auch Katalysator bei der Herstellung von Polyesterfasern und -granulaten für z.B. PET-Flaschen. Die Anwendung in Nahrungsergänzungsmitteln zur Bekämpfung von Krebs und Fatigue-Syndrom ist umstritten.	2261 EUR/kg
Yttrium (Y <sup>39</sup> )	Leuchtstofflampe, LCD- und Plasmabildschirme, LEDs, Brennstoffzelle, YAG-Laser, steigert die Aktivität von Ceroxid in Katalysatoren zur Senkung der NO <sub>x</sub> -Werte, steigert die Effizienz des Elektrolyts in Brennstoffzellen → Absenken der Temperatur der BSZ	11,9 USD/kg

Element	Beschreibung	Marktpreis REO aus China <sup>679</sup>
Rhodium (Rh <sup>45</sup> )	Ähnlichkeit mit Edelmetallen: geringe Reaktivität, hohe katalytische Wirkung (à NO <sub>x</sub> -Katalysatoren in PKW)	500.000 USD/kg <sup>685</sup> Börsianer-Sprech: „Multibagger“
Indium (In <sup>49</sup> )	Wg des niedrigen Schmelzpunktes wird es Sprinkleranlagen, Thermostaten und für Sicherungen eingesetzt. Als Legierung mit Zinn wird es als transparenter Leiter für Flat- und Touchscreens verwendet. Häufigkeit in der Erdkruste ähnlich wie Silber.	160.771 USD/kg <sup>686</sup>  zum Vergleich Silber: 656 EUR/kg
Lanthan (La <sup>57</sup> )	In Legierungen Einsatz in Akkumulatoren, Einsatz als Katalysator in Fluid Catalytic Cracking (FCC)	2 USD/kg
Cer (Ce <sup>58</sup> )	Auto-Katalysatoren, Rußpartikelfilter, Halbleitertechnik, LED	1,48 – 1,5 USD/kg
Praseodym (Pr <sup>59</sup> )	Dauermagnete, Elektromotoren, Glas- und Emaillefärbung, Praseodym und Neodym kommen gemeinsam in Erzen vor und haben auch ähnliche Eigenschaften und sind daher auch schwer zu trennen.	140 USD/kg
Neodym (Nd <sup>60</sup> )	In Legierung mit Eisen und Bor werden <u>Dauermagnete</u> hergestellt, die z.B. in den Generatoren von Windenergieanlagen angesetzt werden. Neodym macht etwa 20 % der Vorkommnisse aus.	104,6 – 143 USD/kg
Promethium (Pm <sup>61</sup> )	Alle Isotope sind radioaktiv, kommen nur als Spaltprodukte von Uran und eines Europium-Isotops vor. Technische Verwendung nur als b-Strahler z.B. auch in Leuchtfarben	n. a.
Samarium (Sm <sup>62</sup> )	Dotieren von CaFl-Einkristallen für Maser und Laser, Neutronenabsorber („Neutronengift“ in Kernreaktoren) SmCo <sub>5</sub> starke Permanentmagnete für z.B. Quartzuhren, Schrittmotoren (Festplattenlaufwerke), SM-Oxid ist Katalysator für Hydrierung und Dehydrierung von Ethanol Medizin: palliative Therapie von Knochen- und Skelettmetastasen	2,45 – 4,5 USD/kg

<sup>685</sup> Vgl. Onvista, o. J.

<sup>686</sup> Vgl. Onvista, o. J.

Element	Beschreibung	Marktpreis REO aus China <sup>679</sup>
Europium (Eu <sup>63</sup> )	Erzeugung der Rotkomponente des RGB-Farbraums in Röhren- und Plasmabildschirmen, Halbleitertechnik, LED	32 USD/kg
Gadolinium (Gd <sup>64</sup> )	Halbleitertechnik, LED, Kontrastmittel in der Kernspintomographie	76,2 USD/kg 2940 EUR/kg <sup>16</sup>
Terbium (Tb <sup>65</sup> )	Zusatz bei Permanentmagneten, um die thermische Stabilität zu verbessern, Zusatz bei fluoreszierenden Leuchtmitteln CFL	1720 USD/kg
Dysprosium (Dy <sup>66</sup> )	<u>Dauermagnete, ggf Samarium und Kobalt als Substitut, um die thermische Stabilität der Magnete zu verbessern</u> der Gewichtsanteil von Dy an Magneten für elektrische Antriebe beträgt 8,7 %, für Generatoren 6,4 % <sup>687</sup>	417,8 – 452 USD/kg
Holmium (Ho <sup>67</sup> )	Starke Ferromagnetische Eigenschaften, besitzt zusammen mit Dy das höchste magnetische Moment aller natürlich vorkommenden Elemente.	n.a.
Erbium (Er <sup>68</sup> )	Erbium-dotierte Lichtwellenleiter werden für optische Verstärker eingesetzt, da eine Umwandlung in ein elektrisches Signal entfällt. Gold mit geringer Dotierung von Er werden als Sensoren für magnetische Kalorimeter verwendet. Zusammen mit Y Verwendung im YAG-Laser, Isotop <sup>169</sup> Er wird in der Nuklearmedizin eingesetzt, ErCl <sub>3</sub> ist rosafarben und wird als Färbemittel in der Töpferei und Glasbläserei verwendet.	38,7 USD/kg
Thulium (Tm <sup>69</sup> )	Abgesehen vom Promethium ist Tm das seltenste Lanthanoid, dennoch häufiger als Iod oder Silber. Aktivierung von Leuchtstoffen auf der Bildschirmfläche.  Einsatz durch Dotierung von CaSO <sub>3</sub> als Personendosimeter für niedrige Dosen, Einsatz durch Dotierung von LaOBr als Szintillator in der Röntgentechnik.	n.a.
Ytterbium	Nur geringe technische Anwendungen, z.B. als Dotierung im YAG-Laser oder bei	61 EUR/kg <sup>688</sup>

<sup>687</sup> Vgl. DOE, 2011.

<sup>688</sup> Vgl. HMW-Hanauer, o. J.

Element	Beschreibung	Marktpreis REO aus China <sup>679</sup>
(Yb <sup>70</sup> )	Faselasern, in der Atomuhr mit vervierfachter Genauigkeit ggü Cs.	
Iridium <sup>77</sup>		Mischler, 2020

In Abbildung 276 auf Seite 461 ist der Einfluss von Rohstoffen mit Versorgungsrisiko auf neun Technologiebereiche dargestellt. Gerade das hohe Versorgungsrisiko bei Seltenen Erden wirkt sich auf den Bereich Motoren bei Windmühlen und Antriebsmotoren aus, was direkt in den Sektoren erneuerbare Energien und e-Mobilität zu Behinderungen führen kann.

Aber auch die Rohstoffe mit moderatem Versorgungsrisiko wie z.B. Kobalt, Metalle aus der PGM-Gruppe und Graphit, haben massiven Einfluss auf die Produktion von Akkus, Brennstoffzellen und, wie schon im Kapitel 2.2 zu lesen war, auf den dringend notwendigen Aufbau einer Elektrolyseur-Produktion, um mit Hilfe des erneuerbar erzeugten Stroms insbesondere des Überschussstroms und Wasser grünen Wasserstoff zu erzeugen. Die Erzeugung erneuerbaren Stroms ist nicht nur auf der Linie Windkraft, sondern auch auf der Linie Photovoltaik gefährdet, da Materialien zum Bau der PV-Module mit einem wenn auch noch geringem Versorgungsrisiko versehen sind.

### 2.13.3.2 Produktion von Magneten

Überall dort, wo Strom durch Drehbewegungen erzeugt oder mit seiner Hilfe Drehbewegungen erzeugt werden, werden starke Magnete benötigt, die auch bei Erhitzung des Aggregats während des Einsatzes ihr magnetisches Moment nicht verlieren. Die Hersteller von Elektrofahrzeugen (EV) haben die starke Abhängigkeit von Seltenen Erden erkannt und versuchen diese bei der Motorenentwicklung durch modifiziertes Design zu verringern. Bisher nur auf Kosten der Reichweite von EVs, sodass die Suche nach Ersatzwerkstoffen für die Lanthanide weitergeht.

Bisher lagen die wichtigsten Patente für die Produktion von Magneten (bonded magnets und sintered magnets) bei japanischen Entwicklern. Im vergangenen Jahrzehnt wurden mehr als 500 neue Patente für gesinterte Magnete angemeldet, was als Indikator für die Bedeutung dieses Marktes angesehen werden kann.<sup>689</sup>

<sup>689</sup> Vgl. IRENA, 2022, S. 7.

### 2.13.3.3 Produktion von Brennstoffzellen

Da Brennstoffzellen (FCC) im Gegensatz zu Wärmekraftmaschinen in der Lage sind, Energie aus Brennstoffen, ohne den Umweg der Erzeugung von Wärme in elektrischen Strom umzuwandeln, sind sie potenziell effizienter als Wärmekraftmaschinen. Es wird seit ihrer Erfindung 1838 von C.F. Schönbein an ihrer Verbesserung geforscht und experimentiert, sodass schon 1875 Jules Verne in seinem Buch „Die geheimnisvolle Insel“ die Hoffnung äußerte, dass die Brennstoffzellen auf unabsehbare Zeit die Energieversorgung der Erde sichern werden.

Offensichtlich hat es mit der Weiterentwicklung etwas länger gedauert. Bei netzfernen elektrischen Anlagen werden heute sehr häufig Methanolbrennstoffzellen zur elektrischen Versorgung eingesetzt, zahlreiche Kleinfahrzeuge wie Hubstapler werden mit Brennstoffzellen ausgerüstet und auch für die Stromversorgung in Netzwerken sind sie vorgesehen, z.B. durch Elektrolyseure erzeugten Wasserstoff katalytisch zu verbrennen und mit dem erzeugten Strom Stromengpässe z.B. in den Dunkelflauten eines Netzes mit Erneuerbaren zu überbrücken.

Damit in Brennstoffzellen elektrochemische Reaktionen stattfinden können sind beide Elektroden mit Katalysatoren beschichtet, vorwiegend Platin, Ruthenium oder Palladium bzw. Gemische von diesen Elementen. Auch Nickel, Nickeloxide, Wolframcarbide und -sulfid werden eingesetzt.

Bei den SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) besteht der Elektrolyt aus mit Yttrium stabilisiertem Zirkonoxid  $Zr(Y)O_2$ .

### 2.13.3.4 Bau von Hochleistungsspeichern

Falls es im Rahmen der Energiewende zu einer Überproduktion von Strom kommt, die durch hohe installierte Kapazitäten von Wind- und Solaranlagen hervorgerufen werden und die zeitgleich keine Abnehmer im Netz findet (siehe hierzu das Kapitel 2 des Gesamtberichtes „Erzeugung und Speicherung von grünem Strom“), ist das kurz- und mittelfristige Speichern von Strom notwendig. Eine Möglichkeit hierzu besteht im Aufbau von Lithium Ionen-Speichern. Tabelle 58 zeigt, dass für die Elemente Nickel, Mangan, Lithium und Kobalt und besonders für Graphit ein enormer Bedarf auftreten wird.

Tabelle 58: Weltweiter Bedarf an Rohstoffen in Tonnen für die Produktion von Lithium-Ionen-Speichern im Jahr 2018 und die Prognose für das Jahr 2040.

Quelle: Statista, 2022h.

Merkmal	2018	2040 <sup>1</sup>
Nickel	32.320	1.742.000
Graphit (natürlich und synthetisch)	21.900	886.400
Mangan	11.140	461.300
Lithium	7.460	328.100
Kobalt	12.750	270.400

Schaut man auf die Liste der Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien, dann fällt auf, dass im Jahr 2017 ausschließlich Hersteller aus Fernost und namentlich LG und Samsung aus Südkorea, BYD, CATL und Lishen aus China und Panasonic aus Japan auf dieser Hitliste zu finden sind.

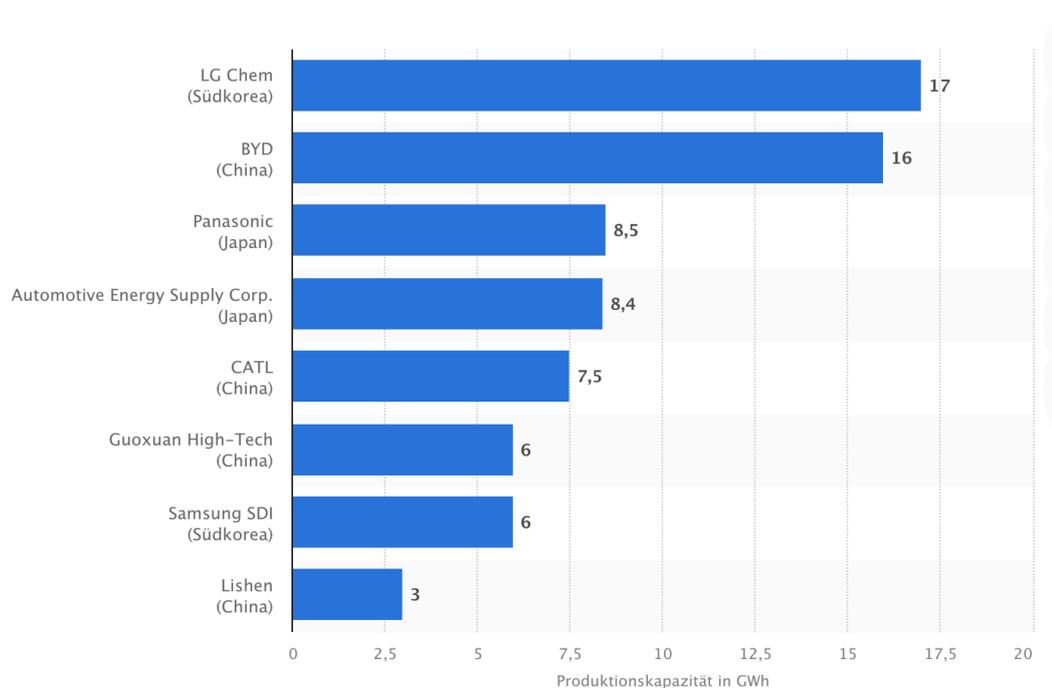


Abbildung 265: Installierte Produktionskapazität für Lithium-Ionen-Batterien von ausgewählten Herstellern weltweit im Jahr 2017.

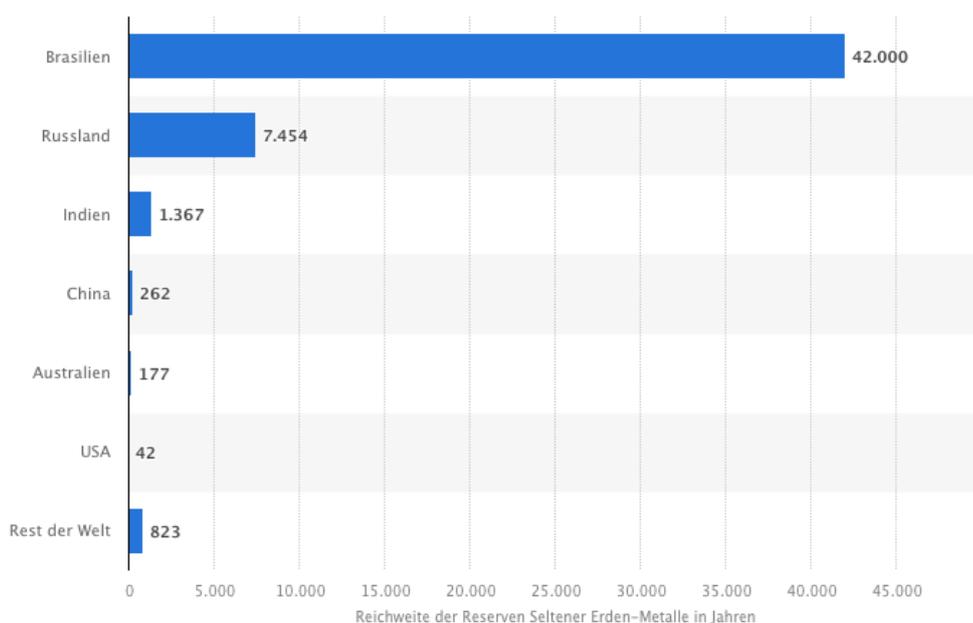
Quelle: Statista, 2022m.

#### 2.13.4 Vorkommen, Reichweiten, Abbaurisiken

Zu den Vorkommen der kritischen Rohstoffe wurden hinreichende Informationen bereits in den einzelnen Kapiteln, die die Substanzen im Detail behandeln, gegeben.

### 2.13.4.1 Grundsätzliches zu Reichweiten

Beim **statischen Paradigma** für die Berechnung der Reichweiten wird davon ausgegangen, dass die Ressourcen auf der Erde fix sind und ihre Größe in der Regel gut geschätzt werden kann. Der ständige Abbau und die Nutzung der Ressourcen führen allerdings früher oder später zu ihrer Verknappung, die unvermeidlich zur Erhöhung ihrer Stückkosten führt. Die statische Zeitdauer bis zur Verteuerung kann durch Maßnahmen wie Rückgewinnung aus Abfällen, Auffinden von Ersatzstoffen, Restriktionen bei ihrer Verwendung verlängert werden. Unsicherheit bei der Bestimmung der statischen Reichweite bestehen beim statischen Paradigma lediglich durch die Unkenntnis von zukünftigen Preis- und Nachfrageentwicklungen. Im statischen Paradigma kann nicht geklärt werden, warum über der Zeit die geschätzten Ressourcen Größen gleichbleiben oder gar zunehmen, obwohl sie eigentlich abnehmen müssten. Statische Reichweiten sagen daher eher etwas über die Charakteristik der Bergbauexplorationszyklen, denn über die physische Verfügbarkeit der Rohstoffe aus.



Details: Weltweit; US Geological Survey

Abbildung 266: Statische Reichweite von Metallen der Seltenen Erden für einige Länder im Jahr 2021.

Quelle: Statista, (2021a).

Abbildung 266 zeigt die statische Reichweite als Anzahl von Jahren, die sich als sog. R/P-Verhältnis aus den bekannten Reserven und der Produktion unter den Randbedingungen der konstanten Produktion und der unveränderten statischen Reserven ergibt.

Die im Vergleich zu Brasilien relativ geringe Reichweite der chinesischen Seltenen Erden lässt nicht auf die Größe der Reserven schließen, wie die Abbildung 267 verdeutlicht, sondern eher auf die geringen Abbaumengen in Brasilien.

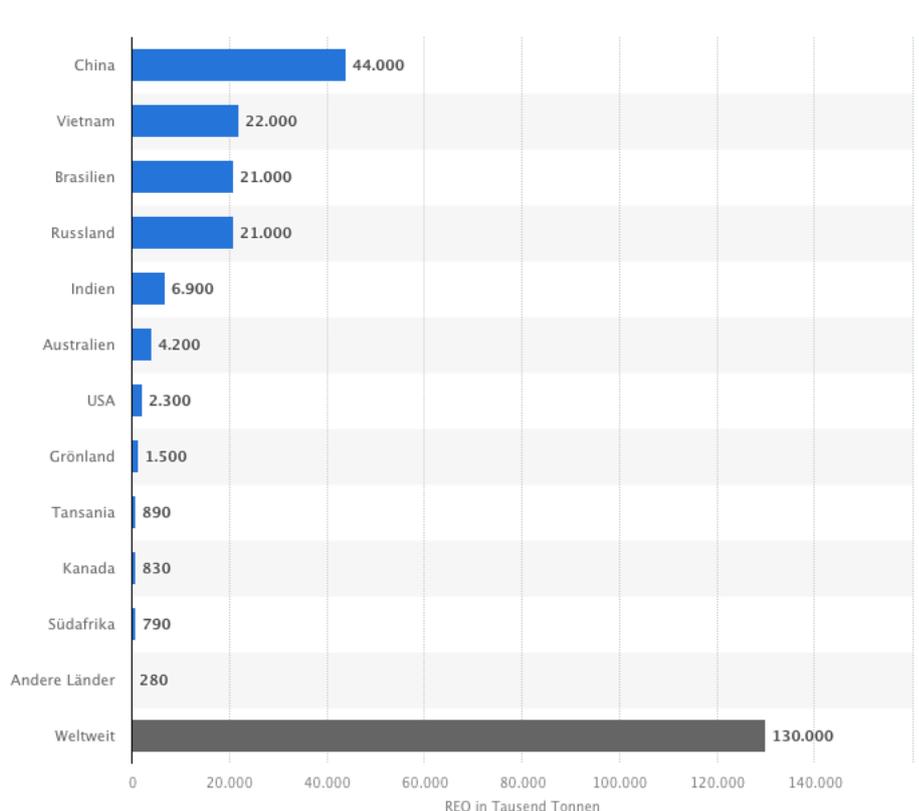


Abbildung 267: Reserven an Seltenen Erden in ausgewählten Ländern im Jahr (2022).

Quelle: Statista, 2022.

Beim **dynamischen Paradigma** wird versucht, sich von den statischen Randbedingungen zu lösen. Seit jeher wird die Verfügbarkeit von mineralischen Vorkommen auf der Basis lokaler Vorkommen mit Extrapolation auf die irdische Gesamtheit geschätzt. Die Schätzungen sind teilweise sehr spekulativ und ihre Genauigkeiten variieren von Element zu Element. Berücksichtigt man nur das Vorkommen von Aluminium und Gold in der Erdkruste, dann könnte abgeschätzt werden, dass unter Beibehaltung der Abbauraten des 20-tes Jahrhunderts Aluminium noch für 57 Milliarden Jahre und Gold noch für 5 Millionen Jahre verfügbar sind.<sup>690</sup> Hiermit wäre der Nachschub an Mineralien aus der Erdkruste offensichtlich kein Thema mehr.

Tatsächlich werden permanent neue Vorkommen gefunden oder bekannte durch zwischenzeitlich entwickelte Technik oder veränderten Marktpreis plötzlich abbaubar und können den Ressourcen zugerechnet werden. Eine dynamische Analyse der Verfügbarkeiten oder Reichweiten von Ressourcen muss daher deutlich mehr Parameter wie z.B. Regularien in Geschäfts- und umweltrelevanten Prozessen, Entwicklung von Recycling-Verfahren berücksichtigen als für die statische Analyse notwendig wäre.

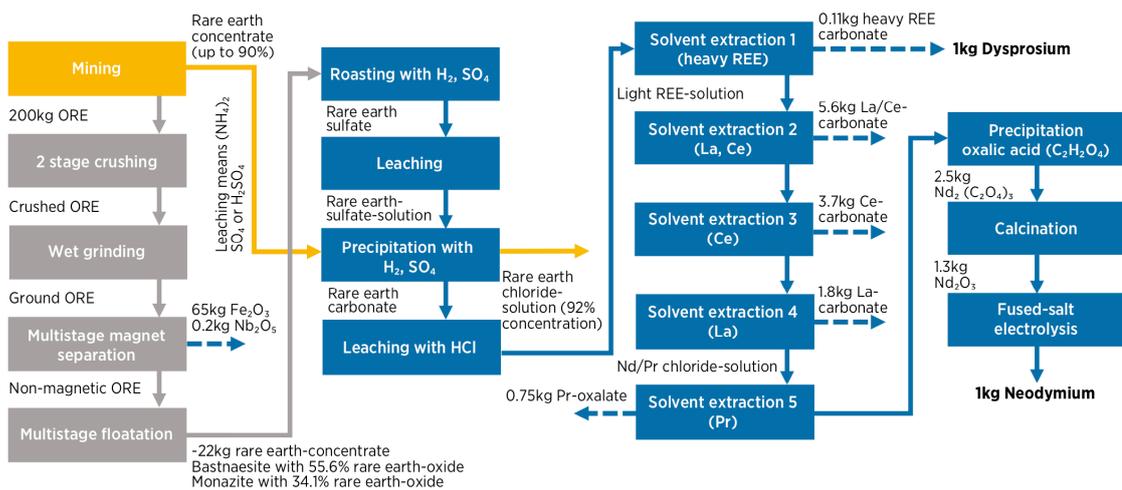
Auch wenn die Häufigkeit der Seltenen Erden in der Erdkruste teilweise nicht seltener als andere Elemente wie Blei, Kupfer oder Arsen ist, sind die Lagerstätten aber doch in der Regel

<sup>690</sup> Vgl. HCSS & TNO, S. 13.

klein und waren vor dem Boom ihrer Verwendung oft zu klein, um wirtschaftlich ausbeutbar zu sein. Da die Seltenen Erden aber meist in Verbindung mit anderen Erzen und Mineralien und vor allem mit anderen REE (Rare Earth Elements) auftreten, ist ihre Gewinnung teilweise ein Nebenprodukt bei der chemischen Aufbereitung und Ausbeutung einer Lagerstätte.

Die Gewinnung von Seltenen Erden erfolgt überwiegend durch Schmelzflusselektrolyse der in Chloride oder Fluoride umgewandelten Oxide. Die so entstandenen Salze können durch verschiedene Verfahren wie Fällung, Kristallisation, Ionentausch mit Elution, Flüssig-Flüssig-Extraktion im Gegenstrom gewonnen werden. Letztgenanntes Verfahren ist das effektivste, obwohl die Überführung der Seltenen Erden in eine organische Phase mit anschließender Extraktion und Fällung der gebildeten Oxalate, Hydroxide und Carbonate mit nachfolgender Verglühung zu Oxiden sehr aufwendig ist (siehe Abbildung 268).

Im Bericht des Umweltbundesamtes werden die Gewinnungsverfahren für LREE durchwegs mit dem Attribut „high aUGP“ (hohes aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial) und die der Gruppe HREE mit dem Attribut „h-m aUGP“ d.h. hohes bis mittleres Potenzial bezeichnet.<sup>691</sup>



Source: BGR, 2021.

Note: Ce = Cerium;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  = ferric oxide; HCl = hydrochloric acid;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  = sulphuric acid; kg = kilogramme; La = lanthanum; Nd = neodymium;  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  = niobium pentoxide;  $\text{NdCl}_3$  = neodymium(III) chloride;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  = neodymium oxide;  $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$  = neodymium oxalate;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  = ammonium sulphate; Pr = praseodymium.

Abbildung 268: Prozessschema für die Produktion von Neodym.

Quelle: IRENA, (2022).

Um die Nachhaltigkeit der Seltenen Erden zu erreichen, sind eine sorgfältige wirtschaftliche Bewertung und eine Bestimmung der ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen erforderlich. Um dieses Ziel zu erreichen, sind neue chemische und technische Technologien erforderlich, beginnend mit dem Recycling und der Wiederverwendung der vielen Produkte, in denen Seltene Erden derzeit verwendet werden. Letztlich sollten Produkte und Anwendungen

<sup>691</sup> Vgl. Dehoust et al., (2020).

so konzipiert werden, dass Seltene Erden sofort und wirtschaftlich wiederverwendet werden können.<sup>692</sup>

## 2.13.5 Recyclingverfahren und -raten

### 2.13.5.1 Allgemeine Bemerkungen zum Recycling kritischer Rohstoffe

Der Istzustand in der EU beim Recycling kritischer Rohstoff wird in Abbildung 269 dargestellt. Nach Angaben der EU sind mittlerweile die Raten für Eisen, Zink und Platin grösser als 50 % und die Sekundärrohstoffe dieser Metalle decken über ein Viertel des Verbrauchs in der EU.

Die Recycling-Einsatzquote ist der Prozentsatz der Gesamtnachfrage, der durch Sekundärrohstoffe gedeckt werden kann.

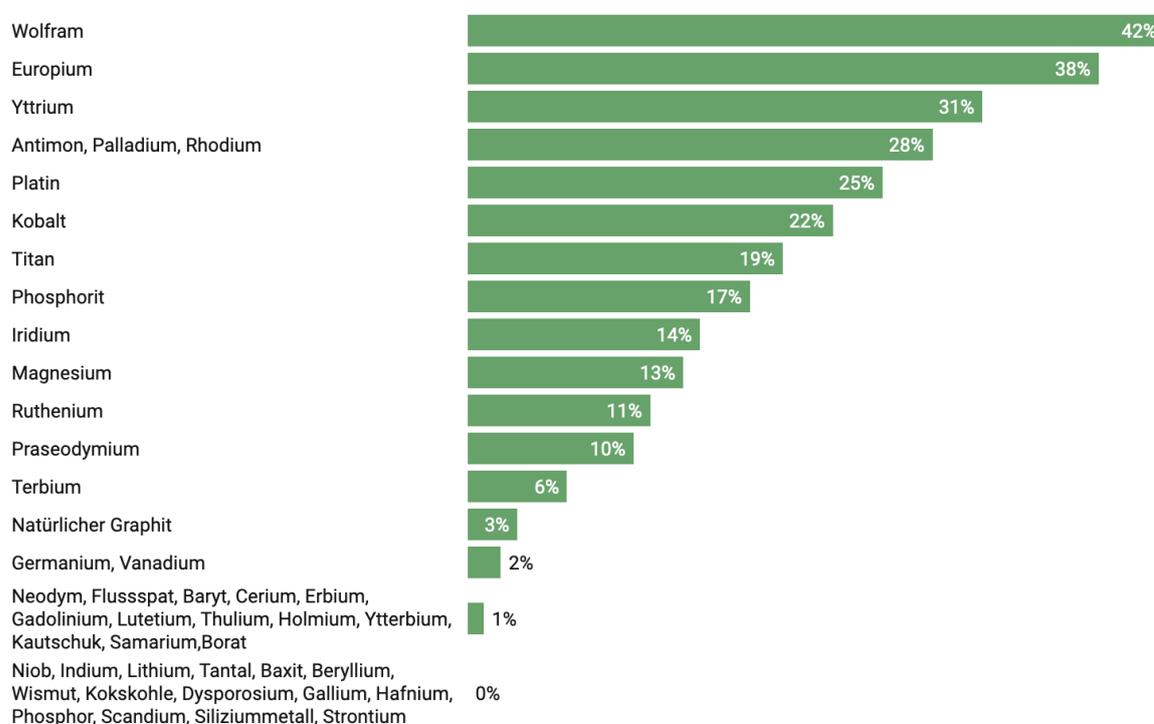


Abbildung 269: Recycling-Einsatzquote in der EU.

Quelle: Neitzel, (2021).

Betrachtet man die Massen von Akkumulatoren und Batterien, die innerhalb der EU recycelt wurden in Abbildung 270, so erkennt man eigentlich nur bei den spanischen Werten eine deutliche Zunahme. Leider sind in Eurostat hierfür keine Recyclingraten verfügbar. Fortschritte beim Ausbau der Recycling-Branche werden seltener vermeldet.<sup>693</sup>

<sup>692</sup> Übersetzung aus Atwood, 2012; Mischler, (2020).

<sup>693</sup> Vgl. Baumann (2022a), Baumann (2022b), Lewicka (2021)

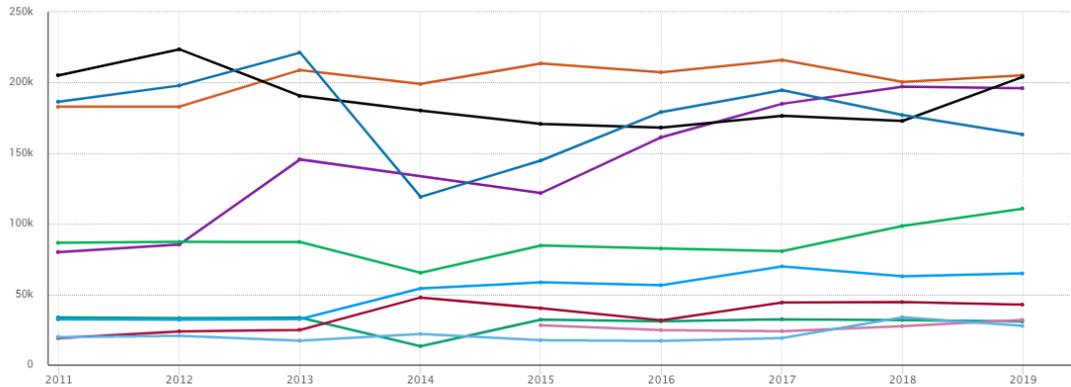


Abbildung 270: Recycling von Batterien und Akkumulatoren in der Zeit von 2011 bis 2019 für einige Länder der EU in Tonnen/a.

Quelle: eurostat (2023).

Es sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass in vielen Ländern informell arbeitende Abfallsammler (z.B. „pepenadores“, „catadores“, „waste pickers“) unterwegs sind, die, um ihren Lebensunterhalt zu sichern, den Müll sortieren und recyceln. Ihre Anzahl wird auf 15 – 50 Millionen Menschen geschätzt, die zwar keine komplexe Hydrometallurgie durchführen können, aber mit sicherem Blick schon einmal die wertvollen Abfälle vorsortieren und der professionellen Aufarbeitung zuführen können.

Die deutsche GIZ unterstützt in Projekten die Erarbeitung von nationalen und lokalen Plänen zur Abfallwirtschaft,<sup>694</sup> die Einbindung der informellen Abfallsammler und den Aufbau von Know-how für die Abfall- und Kreislaufwirtschaft.

### 2.13.5 Urban Mining

In den letzten Jahren hat sich der Begriff „Urban Mining“ für die Bemühung etabliert, aus den „anthropogenen Lager“ von etwa 50 Gt in Deutschland mit einer Zuwachsrate pro Kopf von 10 t/a wertvolle Rohstoffe gemäß des Diktums „Abfall ist Rohstoff“ zurückzugewinnen.<sup>695</sup>

Mit einer Recyclingrate von 30 % bei Kupfer und über 50 % bei Eisen und Stahl lässt sich die Abhängigkeit von Importen deutlich reduzieren. Ohne Recycling würde die steigende Nachfrage z.B. bei Gold, Zinn oder Antimon die derzeit als abbauwürdig betrachteten Lagerstätten in wenigen Jahrzehnten überschreiten.

Abbildung 271 stellt die Zunahme der weltweiten Rohstoffgewinnung pro Kopf dar, die sich ggü. dem Jahr 1990 mehr als verdoppelt hat.

<sup>694</sup> Vgl. GIZ [https://www.giz.de/de/html/suchergebnisse.html?query=abfallwirtschaft&send\\_button\\_search=Suchen](https://www.giz.de/de/html/suchergebnisse.html?query=abfallwirtschaft&send_button_search=Suchen)

<sup>695</sup> Umweltbundesamt, (2017).

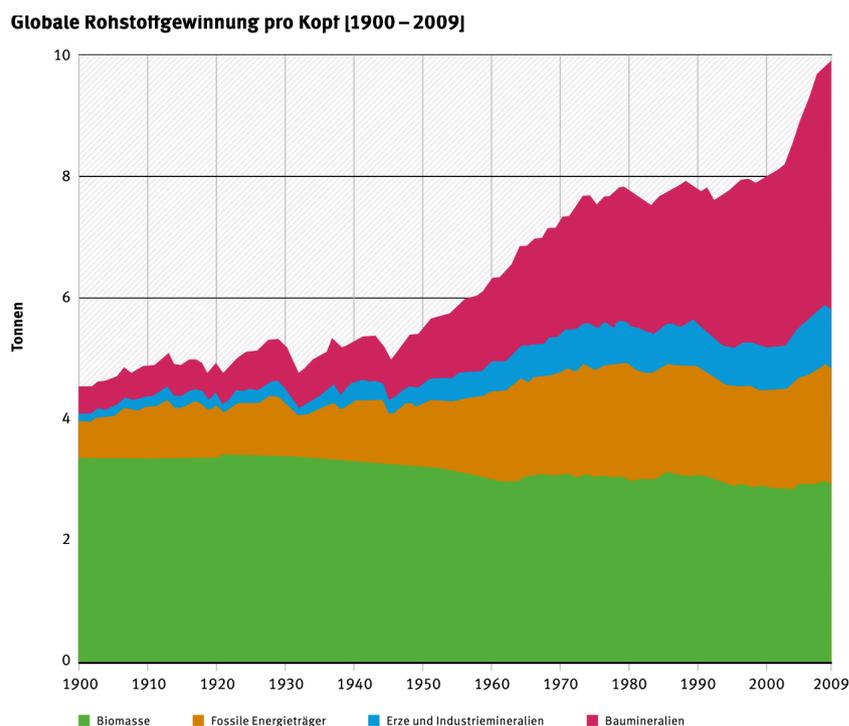


Abbildung 271: Globale Rohstoffgewinnung pro Kopf zwischen 1900 und 2009.

Quelle: Umweltbundesamt, (2017).

Während die Produktion von Biomasse pro Kopf über die Zeit leicht abgenommen hat, sind die Gewinnung von Erzen und Baumineralien massiv gestiegen. Zu berücksichtigen ist auch, dass von diesen gewonnenen Rohstoffen der weitaus größte Anteil von den Industrienationen beansprucht wird ( $\frac{1}{3}$  der Rohstoffe für 15 % der Bevölkerung).<sup>696</sup>

Die Verwendung von Sekundärrohstoffen reduziert nicht nur die Erzeugungskosten (im Jahr 2007 wurde für 8,6 Mrd EUR Kupfer und Stahl durch Recycling gewonnen mit einer Ersparnis ggü. der Erzeugung aus Primärrohstoffen von 1,5 Mrd EUR) sondern die Reduzierung des Primärrohstoffbedarfs kann z.B. Schwellenländern den Zugriff auf Primärrohstoffe erleichtern, sodass Recycling und Urban Mining einen Beitrag zur globalen Verteilungsgerechtigkeit liefert. Recycling spart auch Energie wie man am Beispiel von Kupfer und Stahl deutlich erkennt: gegenüber dem Primäraufwand wurden 406 PJ eingespart, das entspricht dem jährlichen Energieverbrauch von zwei großen Braunkohlekraftwerken.

Die Energieeinsparung zeigt sich z.B. auch im Bereich Kunststoffe: Im Vergleich zu Primärkunststoffen aus Rohöl spart etwa die Nutzung hochwertiger Recyclingkunststoffe mehr als 50 % Treibhausgasemissionen ein.<sup>697</sup>

Die Voraussetzungen für Urban Mining sind sehr gut, da:

<sup>696</sup> Vgl. Umweltbundesamt, 2017, S. 13.

<sup>697</sup> Vgl. Umsicht, (2021).

- der Prospektionsaufwand ggü. dem klassischen Abbau von geologischen Lagerstätten deutlich geringer ist,
- die anthropogenen Lager sich in der Regel deutlich näher an Wirtschaftszentren und in einer gut erschlossenen Umgebung befinden, sodass Kosten für den Transport zur Weiterverarbeitung geringer sind.
- der Wertstoffgehalt der anthropogenen Lager deutlich höher als in natürlichen Erzlagern ist. So entspricht der Goldgehalt eines durchschnittlichen Mobiltelefons dem von 16 kg Golderz.

Abbildung 272 stellt die Nutzung einer Hausmülldeponie als Lagerstätte für Eisen, Kupfer, Aluminium und als Energiequelle dar. Die angegebenen Mengen wurden beim Rückbau einer Deponie in der Schweiz ermittelt.

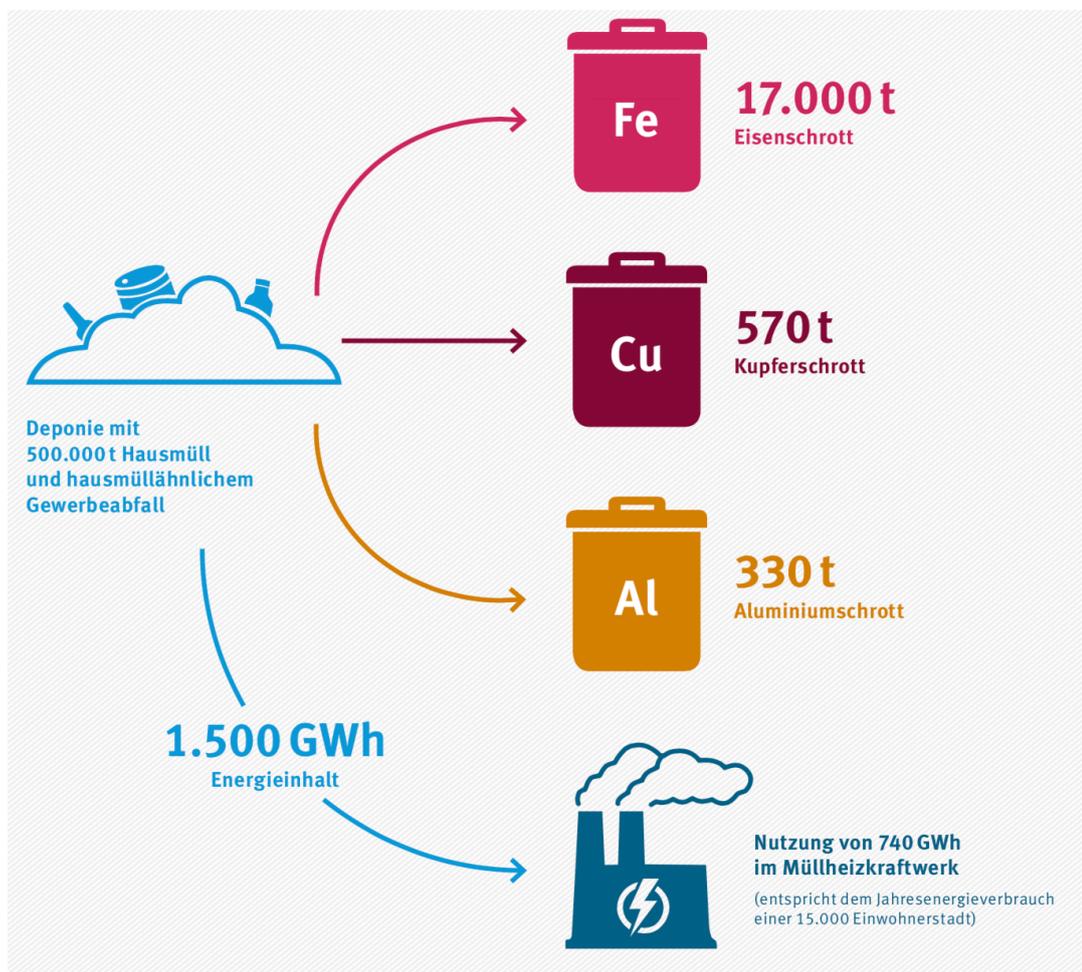


Abbildung 272: Rohstoffpotenzial hinsichtlich Ausbeute von Eisen, Kupfer und Aluminium einer Deponie mit 500 kt Hausmüll.

Da es vor 1972 kaum geordnete Deponien in Deutschland gab, sind in alten Deponien viele interessante Materialien zu finden. Für die Deponien der Jahre 1975 bis 2005 wird vermutet, dass dort Material mit einem Heizwert von 60 Mrd EUR gelagert ist und 26 Mio t Eisenschrott,

1,2 Mio t Kupferschrott und 0,5 Mio t Aluminium gehoben werden können. Außerdem wird geschätzt, dass dort 0,65 Mio t Phosphor mit einem Wert von 14 Mrd EUR lagern.

Die Demontage der gesammelten Güte ist in der Regel sehr aufwendig bzw. Technologien, dies automatisiert zu betreiben, befinden sich in der Entwicklung. „Der Gehalt an kritischen/wertvollen Rohstoffen in den einzelnen Produkten ist oft nicht bekannt. Das macht ein Recycling teuer und Unternehmen beziehen lieber Rohstoffe aus Primärquellen. Daher fehlt oft der ökonomische Anreiz, ein entsprechendes Recycling zu entwickeln und betreiben. Zudem werden oft entsprechende Rohstoffe exportiert und stehen so nicht mehr der lokalen Recyclingwirtschaft zur Verfügung.“<sup>698</sup>

### 2.13.5.3 Weltweite Suche nach Substituten für REE

Das amerikanische Department of Energy (DOE) hat in der Vergangenheit erhebliche F&E-Anstrengungen auf verschiedene Batteriechemikalien und PV-Materialien konzentriert. Ab 2010 hat das DOE seine Investitionen in Ersatzstoffe für Magnete, Motoren und Generatoren erhöht nicht zuletzt deswegen, weil China ab 2005 angefangen hat, die Exportquoten von REO zu reduzieren und die Reduktion im Jahr 2009 um 12 % und im Jahr 2011 sogar um 40 % deutlich reduziert hat.<sup>699</sup> China legt darüber hinaus strategische Lager von REO an.

Auch in der EU ist die Suche nach Substituten für REEs und anderen chemischen Elementen, die drohen knapp zu werden, Gegenstand der R&D Policies geworden.

### 2.13.6 Internationale Rohstoffstrategien zur Sicherung von kritischen Rohstoffen

Nachfolgend werden zusammenfassend die Grundzüge der Rohstoffstrategien von ausgewählten Ländern und Staatenbündnissen dargestellt, um einen internationalen Überblick darüber zu geben, dass strategische Überlegungen hierzu teilweise schon im vorherigen Jahrhundert angestellt worden sind und dass die prinzipiellen Strategien international ähnlich sind. Detailinformationen werden nachfolgend für Deutschland, die EU, UK, Japan, China und USA zusammengestellt. Bei der Auswahl werden die westlichen und asiatischen Industrienationen berücksichtigt. Von den Strategien Chinas und Russlands ahnen wir nur, dass sie zum Ziel haben, den Rest der Welt von ihren Rohstoffen abhängig zu machen. Auch hierzu werden wir in diesem Kapitel Informationen geben.

---

<sup>698</sup> Private Kommunikation mit A. Buckow/Heraeus.

<sup>699</sup> Vgl. DOE, 2011, S. 67.

### 2.13.6.1 Die deutsche Rohstoffstrategie

Deutschland hat seine erstmals 2010 erarbeitete Rohstoffstrategie im Januar 2020 erneuert. Bis dahin war das Leitmotiv, dass in erster Linie die Unternehmen selbst dafür verantwortlich sind, ihre Rohstoffversorgung auf eine sichere Basis zu stellen. Die Hauptaufgabe der Bundesregierung lag in der politischen Flankierung von Maßnahmen der Unternehmen zur Rohstoffversorgung – sowohl bei heimischen Rohstoffen als auch beim Import von Rohstoffen. Dieser marktwirtschaftliche Ansatz auf Basis eines freien und fairen Welthandels wird auch weiterhin den ordnungspolitischen Rahmen der deutschen Rohstoffpolitik bilden.<sup>700</sup> Allerdings ist in der deutschen Strategie zu wenig berücksichtigt worden, dass nicht alle Länder, die uns mit Rohstoffen versorgen, sich immer und in ausreichendem Maße an die Gepflogenheiten des Welthandels halten wollen, dass es durchaus sein kann, dass Lieferanten ihre Schlüsselposition ausnutzen, um den Lieferempfänger zu erpressen.

Da nicht alle Staaten den Ansatz des freien Handels verfolgten und verfolgen, muss es die Aufgabe der Politik sein, ein „Level Playing Field“ in der Rohstoffversorgung zu schaffen, d.h. gleiche Wettbewerbsbedingungen und -regeln herzustellen und „dabei auch gegebenenfalls die Rolle des Staates zu überdenken“,<sup>701</sup> was auch immer damit genau gemeint ist.

„Ziel ist es, Maßnahmen auf den Weg zu bringen, um Unternehmen bei einer sicheren, verantwortungsvollen und der Nachhaltigkeit verpflichteten Rohstoffversorgung zu unterstützen, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu stärken, durch einen effizienten Umgang mit Rohstoffen den Einsatz von Primärrohstoffen möglichst niedrig zu halten und somit den gesellschaftlichen Nutzen für Bürgerinnen und Bürger zu mehren.“<sup>50</sup>

Die Bundesregierung sieht ihre Rohstoffstrategie im Zusammenhang mit der Nationalen Industriestrategie, den Zielen des Pariser Klimaabkommens, dem Klimaschutzplan 2050 und dem Klimaschutzprogramm 2030 sowie den globalen Zielen der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung (SDGs).

Als neue Herausforderung bei der Rohstoffbeschaffung hat die Bundesregierung erfasst, dass in Folge technologischer Entwicklungen wie z.B. der Energiespeicherung die Nachfrage nach Rohstoffen, in diesem Fall Lithium, Kobalt, Nickel, sich extrem verändert. Aufgrund der geringen Anteile Deutschlands und Europas an der Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung gefährdet die Abhängigkeit von den Rohstoffen die Wettbewerbsfähigkeit dieser Zone.<sup>702</sup>

Organisatorisch ist die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klima) mit dem Fachbereich DERA (Deutsche

---

<sup>700</sup> Vgl. BMWi, (2019).

<sup>701</sup> BMWi, 2019, S. 3.

<sup>702</sup> Vgl. Bundesregierung, (2020).

Rohstoffagentur) in der Außenstelle in Berlin für die Maßnahmen der Rohstoffstrategie verantwortlich.<sup>703</sup>

Die Bundesregierung hat in der Neuauflage der Rohstoffstrategie 17 konkrete Maßnahmen beschlossen,<sup>704</sup> die von der Förderung des Recyclings und dem Einsatz von Sekundärrohstoffen, Unterstützung der Bundesländer bei der Transformation von Bergbauregionen bis zur Weiterführung der Ungebundenen Finanzkredite (UFK) reicht,<sup>705</sup> mit denen Projekte deutscher Firmen zur Exploration und Förderung von Rohstoffen gegen politische und wirtschaftliche Ausfallrisiken abgesichert werden. Weiterhin werden Maßnahmen zur heimischen Rohstoffsicherung und der in Entwicklungs- und Schwellenländern sowie der Sicherung und Offenlegung geologischer Daten, Monitoring der Rohstoffe gefördert. Ziele der Strategie sind die Förderung von Kreislaufwirtschaft, Rückgewinnung und Wiederverwendung durch konkrete F&E-Projekte.

Eine Studie zur Wirksamkeit der Maßnahmen liegt vor.<sup>706</sup>

Im Rahmen eines runden Tisches mit Vertretern der Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung soll der Einsatz von Sekundärrohstoffen, die aus Abfällen und Recycling gewonnen werden, gefördert werden. Die Rohstoff- und Ressourceneffizienz kann durch ein BMWi-Technologie-transfer-Programm Leichtbau gefördert werden.

Natürlich erfolgt die Durchführung der deutschen Maßnahmen in Zusammenarbeit mit der EU-Kommission zur nachhaltigen Rohstoffversorgung.

Speziell in Baden-Württemberg waren die Ziele der Landesstrategie:

- Entkopplung des wirtschaftlichen Wachstums vom Ressourcenverbrauch (siehe Abbildung 273, orange und blaue Kurve) unter Beibehaltung und Ausbau des produzierenden Gewerbes
- Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020 (siehe Abbildung 273, orange Kurve)<sup>707</sup>
- Die sichere Versorgung der Wirtschaft mit Rohstoffen durch effizientere Gewinnung von Primärrohstoffen und die Erhöhung des Anteils an Sekundärrohstoffen.

---

<sup>703</sup> Vgl. DERA, (2022).

<sup>704</sup> Vgl. Bundesregierung, (2020).

<sup>705</sup> Vgl. BMWK, o. J.

<sup>706</sup> Vgl. DERA, (2022).

<sup>707</sup> „Die Rohstoffproduktivität drückt aus, wie viel wirtschaftliche Leistung (dargestellt als BIP) durch den Einsatz einer Einheit Rohstoffe „produziert“ wird. Die Gewinnung und Nutzung eines Rohstoffs geht stets mit Flächen-, Material- und Energieinanspruchnahme, Stoffverlagerung sowie Schadstoffemissionen einher. Im Rahmen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie ist es das Ziel der Bundesregierung, die Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020 gegenüber dem Jahr 1994 etwa zu verdoppeln. Dahinter steht das Ziel, wirtschaftliches Wachstum mit einer so geringen Umweltinanspruchnahme zu erreichen, dass der Naturhaushalt nicht überbeansprucht wird“ (LAU Sachsen-Anhalt, 2015).

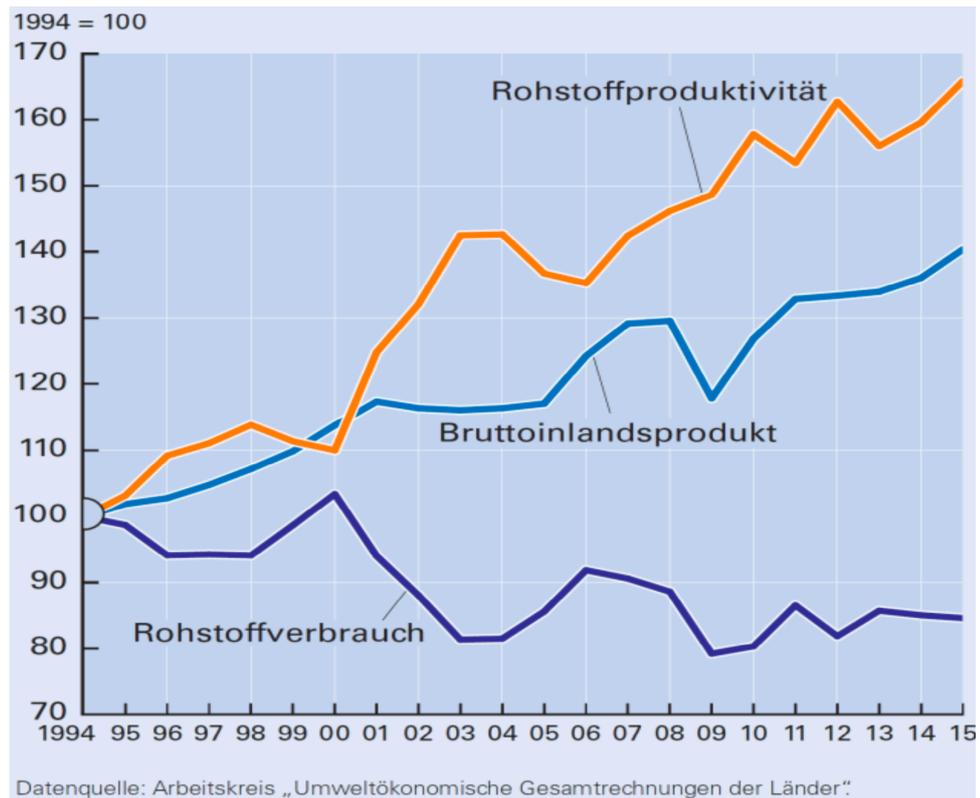


Abbildung 273: Rohstoffverbrauch, Bruttoinlandsprodukt (BIP) und Rohstoffproduktivität in Baden-Württemberg.  
Quelle: Steinmüller, (2020).

In Abbildung 274 werden für Metalle und Industrieminerale die gewichteten Länderrisiken (GLR, siehe Abkürzungsverzeichnis) über den Länderkonzentrationen (HHI, siehe Abkürzungsverzeichnis) für Deutschland aufgetragen. Der rot hinterlegte Bereich enthält Rohstoffe, für die es nur wenige Lieferanten gibt und die aus Ländern importiert werden, für die die Weltbank ein höheres Risiko und schlechtere Governance Indices ermittelt hat. Als Beispiel sei hier Kobalt genannt, für das es nur wenige Lieferanten gibt und das in Ländern wie z.B. Kongo (DRK) mit instabilen politischen Verhältnissen und geringer Governance gefördert wird.

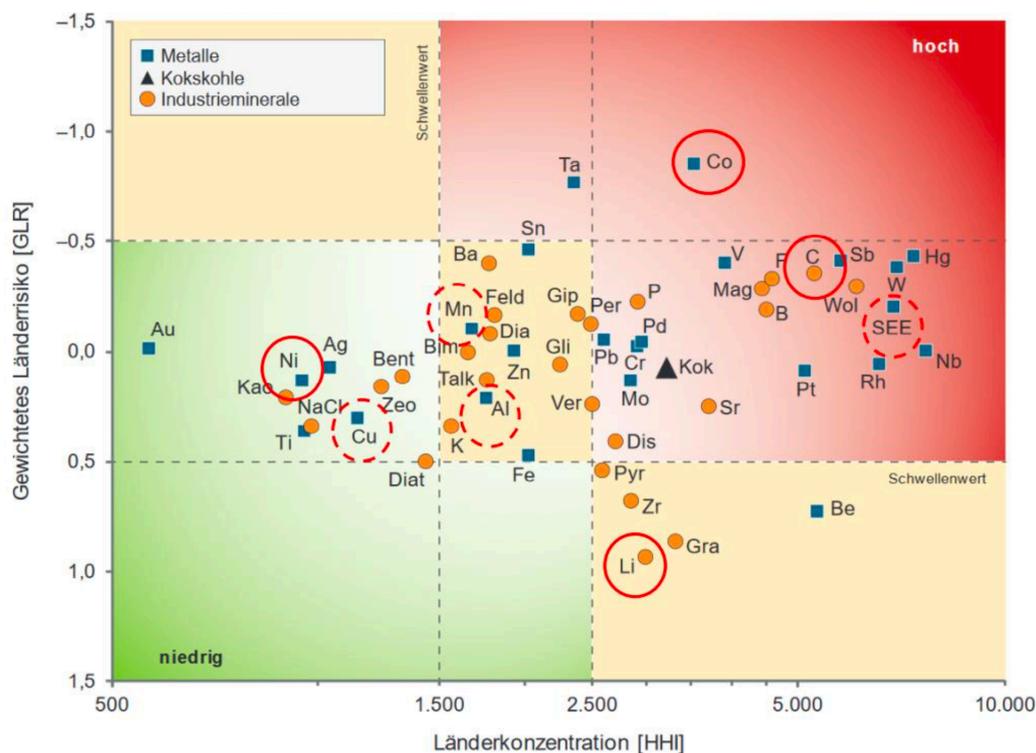


Abbildung 274: Die kritischen Rohstoffe für Deutschland (Batterierohstoffe sind rot eingekreist).  
Quelle: Steinmüller, (2020).

### 2.13.6.2 Die Europäische Rohstoffstrategie

Die Europäische Kommission hat 2020 erkannt, dass es sich kein Land leisten kann, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen gegen die Abhängigkeit von kritischen Materialien einzutauschen. Ihre Definition, was kritische Rohstoffe sind, wurde bereits eingangs im Kapitel 2.13.1. beschrieben. Ihre Beurteilung, welches die kritischen Rohstoffe sind, unterscheidet sich von der deutschen Einschätzung in Abbildung 274.

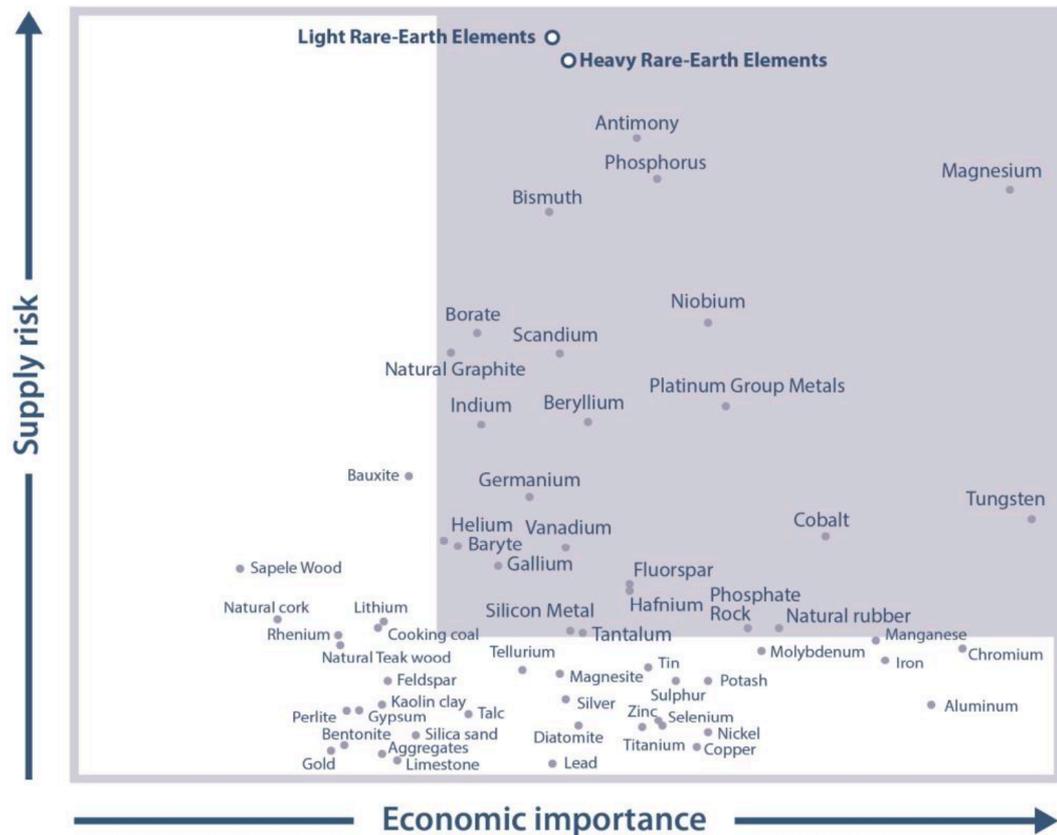


Abbildung 275: Die kritischen Rohstoffe (hellblaues Rechteck) für die EU im Jahr 2017.

Quelle: Steinmüller, (2020).

In ihrer Strategie stützt die EU sich auf drei Säulen:<sup>708</sup>

- Rohstoffdiplomatie durch strategische Partnerschaften und Gespräche zur Sicherung des Zugangs zu Rohstoffen.
- Förderung einer nachhaltigen Versorgung in der EU:
  - Festlegung einer nationalen Mineralienpolitik zur Gewährleistung einer wirtschaftlich vertretbaren Rohstoffgewinnung.
  - Festlegung einer Raumordnungspolitik für Rohstoffe mit dem Erstellen einer geologischen Datenbank, einer transparenten Methode zur Erkundung mineralischer Rohstoffe, Schätzung der langfristigen Verbräuche, Erkundung und Sicherung mineralischer Rohstoffvorkommen.
  - Einführung eines verständlichen Verfahrens zur Genehmigung der Exploration und Gewinnung mineralischer Rohstoffvorkommen.
  - Steigerung der Ressourceneffizienz und Förderung des Recyclings. Insbesondere die „Rückgewinnung nützlicher Stoffe aus Siedlungsabfall“ (Urban Mining), stellt für die europäische Industrie eine der wichtigsten Quellen von

<sup>708</sup> Vgl. Europäische Kommission, 2011.

metallischen und mineralischen Rohstoffen dar. Durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen wird ein Beitrag zur Ressourceneffizienz, zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und zum Umweltschutz geleistet. Das Potenzial von vielen dieser Ressourcen wird jedoch nicht in vollem Umfang genutzt. So sind zwischen den einzelnen Mitgliedstaaten beträchtliche Unterschiede festzustellen, obwohl sich die Werte für das Recycling von Siedlungsabfällen in der EU in den letzten zehn Jahren verdoppelt haben. Angesichts der Notwendigkeit, die CO<sub>2</sub>-Emissionen einzudämmen, die menschliche Gesundheit zu schützen und die Einfuhrabhängigkeit zu reduzieren, gilt es, verstärkt der Frage nachzugehen, was das Abfallrecycling behindert“.<sup>709</sup>

Die Kommission plant hierzu:

- Überarbeitung der Strategie für Abfallvermeidung und -recycling.
- Förderung von Forschungs- und Pilotmaßnahmen zur Ressourceneffizienz, Schaffung wirtschaftlicher Anreize für die Einrichtung von Recycling- und Pfandsystemen.

Überarbeitung des Aktionsplans für nachhaltigen Konsum und nachhaltige Produktion aus dem Jahr 2012.

### 2.13.6.3 Die US-amerikanische Rohstoffstrategie

Die Vereinigten Staaten sind nach China der zweitgrößte Verbraucher von metallischen Rohstoffen für ihre Industrieproduktion. Obwohl die USA über ausgiebige Bodenschätze verfügen, sind sie bei zahlreichen Rohstoffen vollständig von Importen abhängig und die Regierung hatte bereits 1939 im Rahmen eines Programmes zur Sicherung der nationalen Verteidigungsbereitschaft über Qualität und Quantität von zu bevorratenden Mineralien nachgedacht und diese umgesetzt. Das Programm wurde von der Hoffnung getragen, dass dieser ‚National Defense Stockpile‘ Aggressoren davon abhalten würde, den Versuch zu unternehmen, die USA von Nachschub abzuschneiden, um die Verteidigungsindustrie lahmzulegen. Die hohen Kosten der Bevorratung waren in der Geschichte mehrmals Anlass, über ihren Sinn und Umfang zu beraten. Aus den Nachschubproblemen während des Korea-Krieges entstand z.B. die ‚Defense Production Act‘, die die Subventionierung heimischer Minen und Hütten zur Produktion von Aluminium, Kupfer, Wolfram vorsah. Nach dem Ende des Kalten Krieges entschied das DOD allerdings, die Bestände des National Defense Stockpile aufzulösen. Der Verkauf, zu dem auch die Veräußerung von Mineralien der Seltenen Erden gehört, hält noch bis heute an.<sup>710</sup>

<sup>709</sup> Europäische Kommission, 2011.

<sup>710</sup> Vgl. HCSS & TNO, 2010, S. 22.

Die USA waren immer darüber besorgt, dass Unruhen in z.B. Südafrika die Versorgung ihres Landes in diesem Beispiel mit Platin gefährden könnten. Tatsächlich drückten sich politische Konflikte in Zaire (heute DR Kongo) der Jahre 1978 und 1979 in einem hohen Rückgang der Kobalt-Produktion aus, die zu Engpässen in den USA führten. Als Großmacht neigte USA auch dazu, in politische Konflikte oder Krisenherde militärisch einzugreifen, um die Versorgung mit kritischen und/oder strategischen Rohstoffen zu sichern.

In der US-Policy sind die Begriffe ‚kritische Mineralien‘ und ‚strategische Mineralien‘ nicht deutlich voneinander zu trennen. Bei ihrer Definition werden gleichsam militärische und zivile Nutzung benannt, bei denen eine Unterbrechung der Versorgung durch US- und ausgewählter nicht-US-Unternehmen nicht akzeptabel wäre und für die es keinen ökonomisch sinnvollen Ersatz gibt.<sup>711</sup>

In den USA gehörten in den Reports des DOD und DOE in den Jahren der 1970-er und 1980-er als besonders kritische Metalle Al, Cr, Co, Mn, Ni und die Elemente der PGM (Platin-Metall-Gruppe). Das NRC entwickelte eine Methode, die Kritikalität von Mineralien zu bestimmen, die keine Brennstoffe sind. Tabelle 59 verdeutlicht den Wandel der Einschätzung bei der Bestimmung der Kritikalität.

Die Wichtigkeit von REE zur Produktion von z.B. Magneten war im Jahr 2010 bekannt, die Kritikalität damals aber noch nicht als hoch eingestuft worden. Die Verfügbarkeit von Beryllium für die Herstellung von Sensoren, Raketen, Satelliten, Flugzeugen und Atomwaffen wurde damals als wichtiger eingeschätzt.

Im Jahr 2010 lief gerade eine Abstimmung im amerikanischen Congress, die REEs als Stoffe, die strategisch oder kritisch für die nationale Sicherheit sind, einzustufen. Der Zwischenfall, bei dem ein chinesisches Schiff mit einem japanischen kollidierte, und China den Export von REE nach Japan verringerte, war ausschlaggebend für den „Rare Earths and Critical Revitalization Act“ aus dem Jahr 2010, in dem unter anderem die Einrichtung eines Informationszentrums beschlossen wurde, in dem Berichte über REE für den Congress erstellt werden sollten. In weiteren Acts wurden z.B. auch Untersuchungen darüber initiiert, welche militärischen Systeme von REE abhängen und die Unterstützung der US-Produktion von Magneten unterstützt. Um die Fähigkeit der US zu verbessern, Entwicklungen auf dem Markt der strategischen Materialien zu beobachten und darauf reagieren zu können, wurde das SMSP (Strategic Material Security Program) gegründet. Die US-Regierung strebte an, die Produktion von REE in der Mountain Pass Min (Süd-Kalifornien) 2012 wieder zu beginnen, wo das Gneiss-Gestein etwa 8 % - 12 % Seltene Erden (Ce, La, Nd und Eu) enthält.

---

<sup>711</sup> Vgl. HCSS & TNO, 2010, S. 23.

Im Jahr 2017 forderte die US-Regierung das Handelsministerium auf, eine nationale Strategie zur Versorgungssicherheit von kritischen Metallen zu erarbeiten („A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals“) das die Maßnahmen der „Critical Materials Strategy“ von 2010/2011 erweiterte. Die Liste der kritischen Minerale aus 2018 befindet sich im Anhang auf S.460 als Tabelle 62 A-2 Liste der US-amerikanischen kritischen Minerale

Tabelle 62: Liste der kritischen Minerale der US-amerikanischen Industrien.

Quelle: Steinmüller, (2020).

Tabelle 59: Strategische und kritische Mineralien in Reports des DOD, die in verschiedenen Jahren zur Aufnahme in den National Defense Stockpile empfohlen wurden.

Quelle: HCSS & TNO, 2010, S. 25.

1970s-80s Strategic Minerals ( W.C.J. van Rensburg)	2008 Critical Minerals (National Research Council)	2010 DOD Recommended Materials for National Defense Stockpile (Report to Congress)
Aluminium	Platinum Group Metals	Beryllium Metal
Chromium	Rare Earth Elements	Chromium Metal
Cobalt	Indium	Cobalt
Manganese	Manganese	Columbium (Niobium)
Nickel	Niobium	Ferro Chromium
Platinum Group Metals		Ferro Manganese
Titanium		Germanium
		Iridium
		Platinum
		Tantalum
		Tin
		Tungsten
		Zinc

#### 2.13.6.4 Die britische Rohstoffstrategie

Als die Position des Vereinigten Königreichs als wichtiger Exporteur von Mineralien ins Wanken geriet – UK war bis Mitte des 19ten Jahrhunderts führender Exporteur von Eisen, Zinn, Kupfer und Blei - und Verknappungen an einigen Rohstoffen im ersten und zweiten Weltkrieg spürbar geworden waren, beschloss die Regierung den Export von kritischen Rohstoffen zu reduzieren, das Recycling von Metallen zu verbessern und die heimische Industrie hierbei zu unterstützen. Das British Geological Survey (BGS) erkannte während des kalten Krieges, dass die Verfügbarkeit von Metallen und Mineralien kritisch sei, und daher wurden die Lieferantenbeziehungen diversifiziert und Lager aufgebaut und unterhalten. UK unterhielt ähnlich wie die USA Lager für Materialien, die es als strategisch betrachtete: Wolfram (für ballistische Raketen) und Chrom, Mangan und Vanadium.

Im Jahr 1975 setzte die Regierung das „Minerals Reconnaissance Program“ (MRP) auf, mit dem die Exploration und Verarbeitung von Mineralien in UK gefördert werden sollte. Das MRP

hatte auch die Aufgabe, die Regierung mit Informationen über die weltweite Versorgungslage von Mineralien zu informieren.

*Tabelle 60: Liste von im Vereinigten Königreich als kritisch eingestuften Materialien.*

*Quelle: HCSS & TNO, 2010, S. 43.*

Industrial Minerals	Construction Minerals	Material Risk Materials
Kaolin	Aggregates	Zirconium
Ball clay	Brick clay	Indium
Limestone	Cement making materials	Lithium
Silica sand	Gypsum	Potash
Potash	Sand	Molybdenum
Salt	Gravel	Borate
Fluorspar barites	Slate	Iron
Sulphur		Feldspar
Bentonite		
Magnesia		

Zum Ende des Kalten Krieges wurde das MRP als nicht mehr zeitgemäß betrachtet, da es aufgrund der Globalisierung als sicher galt, dass die Versorgung mit Allem auch bei lokalen Unruhen oder Kriegen gesichert werden könne. Heute wissen wir, dass diese Einschätzung unzutreffend war.

Auch wenn UK einen großen Anteil an Baumaterial im eigenen Land hergestellt hat, war es nicht autark. UK hatte daher ein großes Interesse daran, seinen Bergbaubereich funktionierend zu halten. Hierbei sieht sich die Industrie vertreten durch CBI (Confederation of British Industry) bei der Suche und Ausbeutung neuer Lagerstätten verstärkten Behinderungen durch die Umwelt- und Mineralgesetzgebung ausgesetzt, die vor dem Brexit stark von der Gesetzgebung der EU beeinflusst worden war.

UK besitzt keine umfassende Strategie für den Umgang mit Rohstoffen/Mineralien. Regierung und Administration haben eigene Programme, die sich um den Ausbau der heimischen Ressourcen und Industrien drehen und ansonsten den Glauben daran dokumentieren, dass der Bedarf an Rohstoffen vom globalen Markt gedeckt werden kann.

#### 2.13.6.5 Die japanische Rohstoffstrategie

Die japanische Rohstoffstrategie basiert auf vier wesentlichen Säulen:

- Diversifizierung der Beschaffung durch Entwicklung alternativer Rohstoffquellen in rohstoffreichen Regionen oder auf Japans Meeresboden und Wahrung der guten Beziehungen zu seinen Nachbarn
- Wiederverwendung von heimischen Mineralien durch den Ansatz „urban mining“
- Entwicklung alternativer Materialien durch starke Anstrengungen im Bereich Forschung und Entwicklung

- Bevorratung von strategisch wichtigen Materialien

Das Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) gründete 1963 die Metal Mining Agency of Japan (MMAJ), um die Versorgung mit Nicht-Eisen-Metallen und Mineralien zu sichern. Die Ölkrise in den 1970er Jahren machte die Verwundbarkeit Japans als Importeur von Brennstoffen und Nicht-Brennstoffen deutlich. Japan ist selbst ein rohstoffarmes Land mit einer expansiven Industrie, das vollständig von ausländischen Lieferanten abhängig ist. Obwohl Japan bis 2010 ein führender Exporteur von Indium war, gibt es heute keine heimische Produktionskapazität mehr.

Eine weitere Regierungsorganisation, die Japan Oil, Gas and Metal National Corporation (JOGMEC), hält auch Bestände von als kritisch eingestuftem Materialien auf Lager: Ni, Cr, W, Co, Mo<sup>42</sup>, Mn<sup>25</sup>, V<sup>23</sup>. Dabei beschreibt die JOGMEC kritische Materialien einfach als solche, „die für das moderne Leben und die Industrie unerlässlich sind“.<sup>712</sup>

#### 2.13.6.6 Die chinesische Rohstoffstrategie

Zur chinesischen Rohstoffstrategie gibt es keine zitierbaren Dokumente. Wir können nur ihre Folgen beobachten und an dieser Stelle kommentieren. „Die Volksrepublik hat sich in jahrzehntelanger strategischer Vorarbeit den Zugriff auf die meisten Metalle und mineralischen Rohstoffe gesichert. Wenn deutsche Autos wie geplant vom Band rollen sollen, brauchen sie Vorprodukte made in China“.<sup>713</sup> China hat eine sehr starke Stellung auf dem Rohstoffmarkt aufgebaut. Die Aufstellung der deutschen Rohstoffagentur weist aus, dass die Volksrepublik bei 22 von 53 Rohstoffen das größte Bergbauland ist und bei vielen weiteren Rohstoffen unter den Top drei rangiert. Das sei ein erheblicher Anteil, es ist fast die Hälfte weltweiter Bergwerkproduktion. Zudem ist China bei 25 von 27 Raffinadeprodukten der größte Hersteller – also bei Erzeugnissen, die aus der Aufbereitung und Veredlung der im Bergwerk gewonnenen Grundstoffe entstehen. „Die Volksrepublik hat sich in jahrzehntelanger strategischer Vorarbeit den Zugriff auf die meisten Metalle und mineralischen Rohstoffe gesichert“.<sup>714</sup>

Ähnlich lief es bei Silizium, eminent wichtig für Chips, die überall eingebaut sind, in Waschmaschinen und Küchengeräten, in Autos oder Handys. Auch hier rangiert China mit einem Produktionsanteil von knapp 62 % deutlich vor den USA (14,8 %) und Brasilien (6,5 %). Im Herbst 2021 vervierfachte sich der Preis innerhalb von nur zwei Monaten, weil die Provinzregierung von Yunnan nur noch zehn Prozent der vorher üblichen Mengen herstellen ließ. Der Grund: Energiesparziele.

---

<sup>712</sup> Übersetzung aus HCSS & TNO, (2010).

<sup>713</sup> Jakobs, (2022). Die Texte zum Kapitel 2.6. sind Auszüge aus diesem Artikel.

<sup>714</sup> Jakobs, (2022).

Und Peking baut diesen Vorteil gezielt strategisch aus. So fusionierte die Regierung Anfang des Jahres drei von sechs vorher eigenständigen Firmen für Seltene Erden zu einem Konglomerat, der staatlichen China Rare Earth Group Ltd. Von Beginn an war sie mit 62 % Weltmarktanteil globaler Champion. Ein solcher Monopolist hat beste Chancen, die eigene Preissetzungsmacht auszuspielen. Hier entwickelt sich ein neuer Rare-Earth-Gigant.

Schließlich geht es nicht nur um Seltene Erden, sondern beispielsweise auch um Magnesium, das für die Chemieindustrie, für Aluminium und Keramik wichtig ist. 86 % der US-Importe dieses Stoffs kommen aus dem Reich der Mitte. Und so geht es weiter: über Gallium (82 %), Wismut (81 %), Wolfram (81 %) und Arsen (69 %) bis Mangan (26 %).

Wie groß die im Land gehorteten Rohstoffe sind, gehört zu den Geheimnissen des Imperiums. Auf Bitten, kritische Rohstoffe auch im Ausland zu lagern, reagiert Peking nicht. Bergbau und Rohstoffe – das ist in China Chefsache, lautet die Botschaft.

Im Jahr 2020 führte die COVID-19-Pandemie zu einem weltweiten Wirtschaftsabschwung und einem Rückgang der Nachfrage. Zusammen mit dem Handelskrieg zwischen China und den Vereinigten Staaten und den amerikanischen Handelsbeschränkungen gegen Huawei und andere chinesische Unternehmen zwang dies die chinesische Regierung, sich auf das Inland zu konzentrieren. Das Ergebnis war der inländisch-internationale Parallelumlauf als eine Strategie zur Neuausrichtung der chinesischen Wirtschaft, bei der dem inländischen Konsum ("interner Umlauf") Vorrang eingeräumt wird, während die Wirtschaft für den internationalen Handel und Investitionen offenbleibt. Die erste wissenschaftliche Studie über den Parallelumlauf definierte ihn als "die vom inländischen Konsum angetriebene wirtschaftliche Neuausrichtung zur Erreichung einer nachhaltigen wirtschaftlichen Entwicklung".

Der geistige Vorläufer des Parallelumlaufs war der "große internationale Umlauf", eine Strategie des Wirtschaftswachstums durch exportorientierte Produktion, die in der Ära des chinesischen Staatschefs Deng Xiaoping formuliert wurde.

Analysten erklärten, dass die Strategie die Unterstützung einheimischer Unternehmen und die Verringerung der Abhängigkeit Chinas von Importen, u. a. bei Energie, Mikrochips und anderen Technologien, beinhalten würde. Wirtschaftswissenschaftler sagten, dass ein wichtiger Teil des Projekts darin bestehen sollte, die Lebensmittel- und Energiesicherheit Chinas zu gewährleisten und dass die neue Politik als Reaktion auf die sich verschlechternden Beziehungen zwischen China und den Vereinigten Staaten zu verstehen seien, China sich auf den schlimmsten Fall vorbereiten muss.<sup>715</sup>

The Economist fasste die Strategie folgendermaßen zusammen: "China für die Welt offen halten (der 'große internationale Kreislauf'), während der eigene Markt gestärkt wird (der 'große

---

<sup>715</sup> Vgl. Wikipedia, o. J. a

inländische Kreislauf)". Genauer gesagt, so The Economist, geht es bei der doppelten Zirkulation darum, die chinesische Wirtschaft für ausländische Unternehmen zu öffnen, um sie von China abhängig zu machen, was wiederum der chinesischen Regierung mehr geopolitischen Einfluss verschaffen würde.

#### 2.13.6.7 Die russische Rohstoffstrategie

„Die geökonomischen Machtstrategien der Bündnispartner Russland und China verändern die Rohstoffmärkte und die Weltwirtschaft nachhaltig. Autokraten wie Russlands Kriegsherr Putin und Chinas Staats- und Parteichef Xi Jinping grenzen sich vom demokratischen Westen ab und schreddern die hehren Prinzipien des Freihandels. Die Theorien des britischen Ökonomen David Ricardo gelten für offene Märkte – nicht aber für Wirtschaftsblöcke, die merkantile Kriege austragen wollen.“<sup>716</sup>

#### 2.13.7 Zusammenfassung

- Deutschland, die EU, China und die USA fördern die Entwicklung und Produktion von kritischen, metallischen Rohstoffen im Inland.
- China und Japan unterhalten Bevorratungssysteme für kritische, industrierelevante Rohstoffe. Die USA hat nur für den militärischen Bereich ein Bevorratungssystem.
- China und Japan treiben mit nationalen Unternehmen und massiver finanzieller Unterstützung (Kredite, Bürgschaften) die Entwicklung von und die Beteiligung an Rohstoffprojekten im Ausland voran.
- Deutschland unterstützt seine Industrie bei Auslandsaktivitäten im Rohstoffbereich mit Instrumenten der Außenwirtschaftsförderung wie Kredite und Bürgschaften. Staatliche Maßnahmen der ersten Rohstoffstrategie, wie die Explorationsförderung und strategische Rohstoffpartnerschaften mit verschiedenen Ländern sind gescheitert oder haben nicht die gewünschten Ergebnisse erzielt.
- Alle Länder unterstützen mit Nachdruck das Recycling und die Wiederverwertung von metallischen Rohstoffen und arbeiten auf eine Kreislaufwirtschaft hin.
- Deutschland, die EU, China und Japan zielen auf eine starke Einbeziehung von ökologischen und sozialen Aspekten in der nationalen und internationalen Rohstoffgewinnung sowie auf eine Stärkung der Nachhaltigkeit in Liefer- und Wertschöpfungsketten ab.

---

<sup>716</sup> Jakobs, (2022).

- Besonders Deutschland, die EU und die USA setzen sich dafür ein, dass der Handel mit Rohstoffen weltweit offenbleibt und die Transparenz im Handel verbessert wird.
- Deutschland, die EU, Japan und die USA führen Forschungsprojekte bezüglich Exploration, Bergbau, Aufbereitung und Weiterverarbeitung von kritischen Rohstoffen durch.
- Deutschland, die EU und die USA favorisieren den freien Markt und Handel und fördern (momentan) keine zentralen staatlichen Steuerungselemente.  
Deutschland und die EU fördern mit ihren Rohstoffstrategien weltweit die Nachhaltigkeit in der Rohstoffgewinnung und des Lieferkettenmanagements im Rohstoffbereich. China ist seit einigen Jahren mit Nachdruck dabei, die Nachhaltigkeit seiner Rohstoffindustrie im Ausland und ihrer Lieferketten zu verbessern.
- China und Japan unterstützen mit staatlichen Maßnahmen massiv ihre zumeist vertikal integrierte Industrie bei Auslandsaktivitäten im Rohstoffbereich.

## Anhang zu 2.13

A-1 Liste der kritischen Rohstoffe der EU in 2020<sup>717</sup>

Tabelle 61: Liste der kritischen Rohstoffe der EU in 2020.

Rohstoffe	Phase	Weltweit größte Erzeuger	Wichtigste Lieferländer <sup>33</sup> der EU	Importabhängigkeit <sup>34</sup>	EoL-RIR <sup>35</sup>	Ausgewählte Verwendungen
Antimon	Förderung	China (74 %) Tadschikistan (8 %) Russland (4 %)	Türkei (62 %) Bolivien (20 %) Guatemala (7 %)	100 %	28 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flammenschutzmittel</li> <li>• Verteidigungsanwendungen</li> <li>• Bleibatterien</li> </ul>
Baryt	Förderung	China (38 %) Indien (12 %) Marokko (10 %)	China (38 %) Marokko (28 %) Andere EU-Länder (15 %) Deutschland (10 %) Norwegen (1 %)	70 %	1 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medizinische Anwendungen</li> <li>• Strahlenschutz</li> <li>• Chemische Anwendungen</li> </ul>
Bauxit	Förderung	Australien (28 %) China (20 %) Brasilien (13 %)	Guinea (64 %) Griechenland (12 %) Brasilien (10 %) Frankreich (1 %)	87 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminiumproduktion</li> </ul>
Beryllium	Förderung	Vereinigte Staaten (88 %) China (8 %) Madagaskar (2 %)	k. A.	k. A. <sup>36</sup>	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektronische und Kommunikationsgeräte</li> <li>• Komponenten für die Auto-, Luft- und Raumfahrt sowie die Verteidigungsindustrie</li> </ul>
Wismut	Verarbeitung	China (85 %) DVR Laos (7 %) Mexiko (4 %)	China (93 %)	100 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pharmazeutische und Futtermittelindustrie</li> <li>• Medizinische Anwendungen</li> <li>• Legierungen mit niedrigem Schmelzpunkt</li> </ul>
Borat	Förderung	Türkei (42 %) Vereinigte Staaten (24 %) Chile (11 %)	Türkei (98%)	100 %	1 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochleistungsglas</li> <li>• Düngemittel</li> <li>• Permanentmagnete</li> </ul>
Kobalt	Förderung	Kongo, DR (59 %) China (7 %) Kanada (5 %)	Kongo, DR (68%) Finnland (14 %) Französisch-Guyana (5 %)	86 %	22 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batterien</li> <li>• Superlegierungen</li> <li>• Katalysatoren</li> <li>• Magnete</li> </ul>

<sup>33</sup> Auf der Grundlage von inländischer Produktion und Einfuhren (ohne Ausfuhr)<sup>34</sup>  $IA = (Einfuhr - Ausfuhr) / (Inlandsproduktion + Einfuhr - Ausfuhr)$ <sup>35</sup> Die End-of-Life-Recycling-Einsatzquote (EoL-RIR) ist der Prozentsatz der Gesamtnachfrage, der durch Sekundärrohstoffe gedeckt werden kann.<sup>36</sup> Die Importabhängigkeit der EU kann für Beryllium nicht berechnet werden, weil in der EU weder die Produktion noch der Handel mit Berylliumerzen und -konzentraten stattfinden.<sup>717</sup> Vgl. Europäische Kommission, 2020, S. 20-24.

Rohstoffe	Phase	Weltweit größte Erzeuger	Wichtigste Lieferländer <sup>33</sup> der EU	Importabhängigkeit <sup>34</sup>	EoL-RIR <sup>35</sup>	Ausgewählte Verwendungen
Kokskohle	Förderung	China (55 %) Australien (16 %) Russland (7 %)	Australien (24 %) Polen (23 %) Vereinigte Staaten (21 %) Tschechien (8 %) Deutschland (8 %)	62 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koks für die Stahlerzeugung</li> <li>• Kohlenstofffasern</li> <li>• Batterieelektroden</li> </ul>
Flussspat	Förderung	China (65 %) Mexiko (15 %) Mongolei (5 %)	Mexiko (25 %) Spanien (14 %) Südafrika (12 %) Bulgarien (10 %) Deutschland (6 %)	66 %	1 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stahl- und Eisenerzeugung</li> <li>• Kälte- und Klimaanlage</li> <li>• Aluminiumproduktion und andere Metallurgie</li> </ul>
Gallium	Verarbeitung	China (80 %) Deutschland (8 %) Ukraine (5 %)	Deutschland (35 %) VK (28 %) China (27 %) Ungarn (2 %)	31 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Halbleiter</li> <li>• Photovoltaische Zellen</li> </ul>
Germanium	Verarbeitung	China (80 %) Finnland (10 %) Russland (5 %)	Finnland (51 %) China (17 %) VK (11 %)	31 %	2 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optische Fasern und Infraroptik</li> <li>• Satelliten-Solarzellen</li> <li>• Polymerisationskatalysatoren</li> </ul>
Hafnium	Verarbeitung	Frankreich (49 %) Vereinigte Staaten (44 %) Russland (3 %)	Frankreich (84 %) Vereinigte Staaten (5 %) VK (4 %)	0 % <sup>37</sup>	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superlegierungen</li> <li>• Steuerstäbe</li> <li>• Feuerfeste Keramik</li> </ul>
Indium	Verarbeitung	China (48 %) Korea, Rep. (21 %) Japan (8 %)	Frankreich (28 %) Belgien (23 %) VK (12 %) Deutschland (10 %) Italien (5 %)	0 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flachbildschirme</li> <li>• Fotovoltaikzellen und Photonik</li> <li>• Lötmetalle</li> </ul>
Lithium	Verarbeitung	Chile (44 %) China (39 %) Argentinien (13 %)	Chile (78 %) Vereinigte Staaten (8 %) Russland (4 %)	100 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batterien</li> <li>• Glas und Keramik</li> <li>• Stahl- und Aluminiummetallurgie</li> </ul>
Magnesium	Verarbeitung	China (89 %) Vereinigte Staaten (4 %)	China (93 %)	100 %	13 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichte Legierungen für die Auto-, Elektronik-, Verpackungs- oder Bauindustrie</li> <li>• Entschwefelungsmittel in der Stahlerzeugung</li> </ul>

<sup>37</sup> Die EU ist Nettoexporteur von Hafnium und Indium

Rohstoffe	Phase	Weltweit größte Erzeuger	Wichtigste Lieferländer <sup>33</sup> der EU	Importabhängigkeit <sup>34</sup>	EoLRIR <sup>35</sup>	Ausgewählte Verwendungen
Natürlicher Grafit	Förderung	China (69 %) Indien (12 %) Brasilien (8 %)	China (47 %) Brasilien (12 %) Norwegen (8 %) Rumänien (2 %)	98 %	3 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batterien</li> <li>• Feuerfestmaterialien für die Stahlerzeugung</li> </ul>
Naturkautschuk	Förderung	Thailand (33 %) Indonesien (24 %) Vietnam (7 %)	Indonesien (31 %) Thailand (18 %) Malaysia (16 %)	100 %	1 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bereifung</li> <li>• Gummitteile für Maschinen und Haushaltswaren</li> </ul>
Niob	Verarbeitung	Brasilien (92 %) Kanada (8 %)	Brasilien (85 %) Kanada (13 %)	100 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochfester Stahl und Superlegierungen für Transport und Infrastruktur</li> <li>• High-Tech-Anwendungen (Kondensatoren, supraleitende Magnete usw.)</li> </ul>
Phosphorit	Förderung	China (48 %) Marokko (11 %) Vereinigte Staaten (10 %)	Marokko (24 %) Russland (20 %) Finnland (16 %)	84 %	17 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineraldünger</li> <li>• Phosphorverbindungen</li> </ul>
Phosphor	Verarbeitung	China (74 %) Kasachstan (9 %) Vietnam (9 %)	Kasachstan (71 %) Vietnam (18 %) China (9 %)	100 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemische Anwendungen</li> <li>• Verteidigungsanwendungen</li> </ul>
Scandium	Verarbeitung	China (66 %) Russland (26 %) Ukraine (7 %)	VK (98 %) Russland (1 %)	100 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festoxid-Brennstoffzellen</li> <li>• Leichte Legierungen</li> </ul>
Siliciummetall	Verarbeitung	China (66 %) Vereinigte Staaten (8 %) Norwegen (6 %) Frankreich (4 %)	Norwegen (30 %) Frankreich (20 %) China (11 %) Deutschland (6 %) Spanien (6 %)	63 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Halbleiter</li> <li>• Fotovoltaik</li> <li>• Elektronische Bauteile</li> <li>• Silikone</li> </ul>
Strontium	Förderung	Spanien (31 %) Iran, Islamische Rep. (30 %) China (19 %)	Spanien (100 %)	0 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keramikmagnete</li> <li>• Aluminiumlegierungen</li> <li>• Medizinische Anwendungen</li> <li>• Pyrotechnik</li> </ul>

Rohstoffe	Phase	Weltweit größte Erzeuger	Wichtigste Lieferländer <sup>33</sup> der EU	Importabhängigkeit <sup>34</sup>	EoL-RIR <sup>35</sup>	Ausgewählte Verwendungen
Tantal	Förderung	Kongo, DR (33 %) Ruanda (28 %) Brasilien (9 %)	Kongo, DR (36 %) Ruanda (30 %) Brasilien (13 %)	99 %	0 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondensatoren für elektronische Geräte</li> <li>• Superlegierungen</li> </ul>
Titan <sup>38</sup>	Verarbeitung	China (45 %) Russland (22 %) Japan (22 %)	k. A.	100 %	19 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichte hochfeste Legierungen, z. B. für Luft- und Raumfahrt und Verteidigung</li> <li>• Medizinische Anwendungen</li> </ul>
Wolfram <sup>39</sup>	Verarbeitung	China (69 %) Vietnam (7 %) Vereinigte Staaten (6 %) Österreich (1 %) Deutschland (1 %)	k. A.	k. A.	42 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Legierungen z. B. für Luft- und Raumfahrt, Verteidigung, Elektrotechnik</li> <li>• Fräs-, Schneid- und Bergbauwerkzeuge</li> </ul>
Vanadium <sup>40</sup>	Verarbeitung	China (55 %) Südafrika (22 %) Russland (19 %)	k. A.	k. A.	2 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochfeste Niedriglegierungen, z. B. für Luft- und Raumfahrt, Kernreaktoren</li> <li>• Chemische Katalysatoren</li> </ul>
Metalle der Platingruppe <sup>41</sup>	Verarbeitung	Südafrika (84 %) - Iridium, Platin, Rhodium, Ruthenium Russland (40 %) - Palladium	k. A.	100 %	21 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemische Katalysatoren und Katalysatoren für die Autoindustrie</li> <li>• Brennstoffzellen</li> <li>• Elektronische Anwendungen</li> </ul>
Schwere seltene Erden <sup>42</sup>	Verarbeitung	China (86 %) Australien (6 %) Vereinigte Staaten (2 %)	China (98 %) Andere Nicht-EU-Länder (1 %) VK (1 %)	100 %	8 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permanentmagnete für Elektromotoren und Stromgeneratoren</li> <li>• Leuchtphosphore</li> <li>• Katalysatoren</li> </ul>

<sup>38</sup> Für Titan-Metallschwamm gibt es keine Handelscodes für die EU

<sup>39</sup> Die Verteilung der Wolframschmelzen und -raffinerien wurde stellvertretend für die Produktionskonzentration verwendet. Handelsdaten sind aus Gründen des Geschäftsgeheimnisses nicht vollständig verfügbar.

<sup>40</sup> Die Importabhängigkeit der EU kann für Vanadium nicht berechnet werden, weil in der EU weder die Produktion noch der Handel mit Vanadiumerzen und -konzentraten stattfinden.

<sup>41</sup> Die Handelsdaten umfassen Metall aus allen Quellen, sowohl aus primären als auch aus sekundären Quellen. Die Quelle und die relativen Beiträge von Primär- und Sekundärmaterialien konnten nicht ermittelt werden.

<sup>42</sup> Die weltweite Produktion bezieht sich auf Konzentrate von Seltenerdoxiden sowohl für leichte als auch für schwere seltene Erden.

Rohstoffe	Phase	Weltweit größte Erzeuger	Wichtigste Lieferländer <sup>33</sup> der EU	Importabhängigkeit <sup>34</sup>	EoL-RIR <sup>35</sup>	Ausgewählte Verwendungen
Leichte seltene Erden	Verarbeitung	China (86 %) Australien (6 %) Vereinigte Staaten (2 %)	China (99 %) VK (1 %)	100 %	3 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batterien</li> <li>• Glas und Keramik</li> </ul>

## A-2 Liste der US-amerikanischen kritischen Minerale

Tabelle 62: Liste der kritischen Minerale der US-amerikanischen Industrien.

Quelle: Steinmüller, (2020).

Mineral commodity	Sectors						Top Producer	Top Supplier	Notable example application
	Aerospace (non-defense)	Defense	Energy	Telecommunications & electronics	Transportation (non-aerospace)	Other			
Aluminum							China	Canada	Aircraft, power transmission lines, lightweight alloys
Antimony							China	China	Lead-acid batteries
Arsenic							China	China	Microwave communications (gallium arsenide)
Barite							China	China	Oil and gas drilling fluid
Beryllium							United States	Kazakhstan	Satellite communications, beryllium metal for aerospace
Bismuth							China	China	Pharmaceuticals, lead-free solders
Cesium and rubidium							Canada	Canada	Medical applications, global positioning satellites, night-vision devices
Chromium							South Africa	South Africa	Jet engines (superalloys), stainless steels
Cobalt							Congo (DRC)	Norway	Jet engines (superalloys), rechargeable batteries
Fluorspar							China	Mexico	Aluminum and steel production, uranium processing
Gallium							China	China	Radar, light-emitting diodes (LEDs), cellular phones
Germanium							China	China	Infrared devices, fiber optics
Graphite (natural)							China	China	Rechargeable batteries, body armor
Helium							United States	Qatar	Cryogenic (magnetic resonance imaging (MRI))
Indium							China	Canada	Flat-panel displays (indium-tin-oxide), specialty alloys
Lithium							Australia	Chile	Rechargeable batteries, aluminum-lithium alloys for aerospace
Magnesium							China	China	Incendiary countermeasures for aerospace
Manganese							China	South Africa	Aluminum and steel production, lightweight alloys
Niobium							Brazil	Brazil	High-strength steel for defense and infrastructure
Platinum group metals							South Africa	South Africa	Catalysts, superalloys for jet engines
Potash							Canada	Canada	Agricultural fertilizer
Rare earth elements							China	China	Aerospace guidance, lasers, fiber optics
Rhenium							Chile	Chile	Jet engines (superalloys), catalysts
Scandium							China	China	Lightweight alloys, fuel cells
Strontium							Spain	Mexico	Aluminum alloys, permanent magnets, flares
Tantalum							Rwanda	China	Capacitors in cellular phones, jet engines (superalloys)
Tellurium							China	Canada	Infrared devices (night-vision), solar cells
Tin							China	Peru	Solder, flat-panel displays (indium-tin-oxide)
Titanium							China	South Africa	Jet engines (superalloys) and airframes (titanium alloys), armor
Tungsten							China	China	Cutting and drilling tools, catalysts, jet engines (superalloys)
Uranium							Kazakhstan	Canada	Nuclear applications, medical applications
Vanadium							China	South Africa	Jet engines (superalloys) and airframes (titanium alloys), high-strength steel
Zirconium and hafnium							Australia	China	Thermal barrier coating in jet engines, nuclear applications

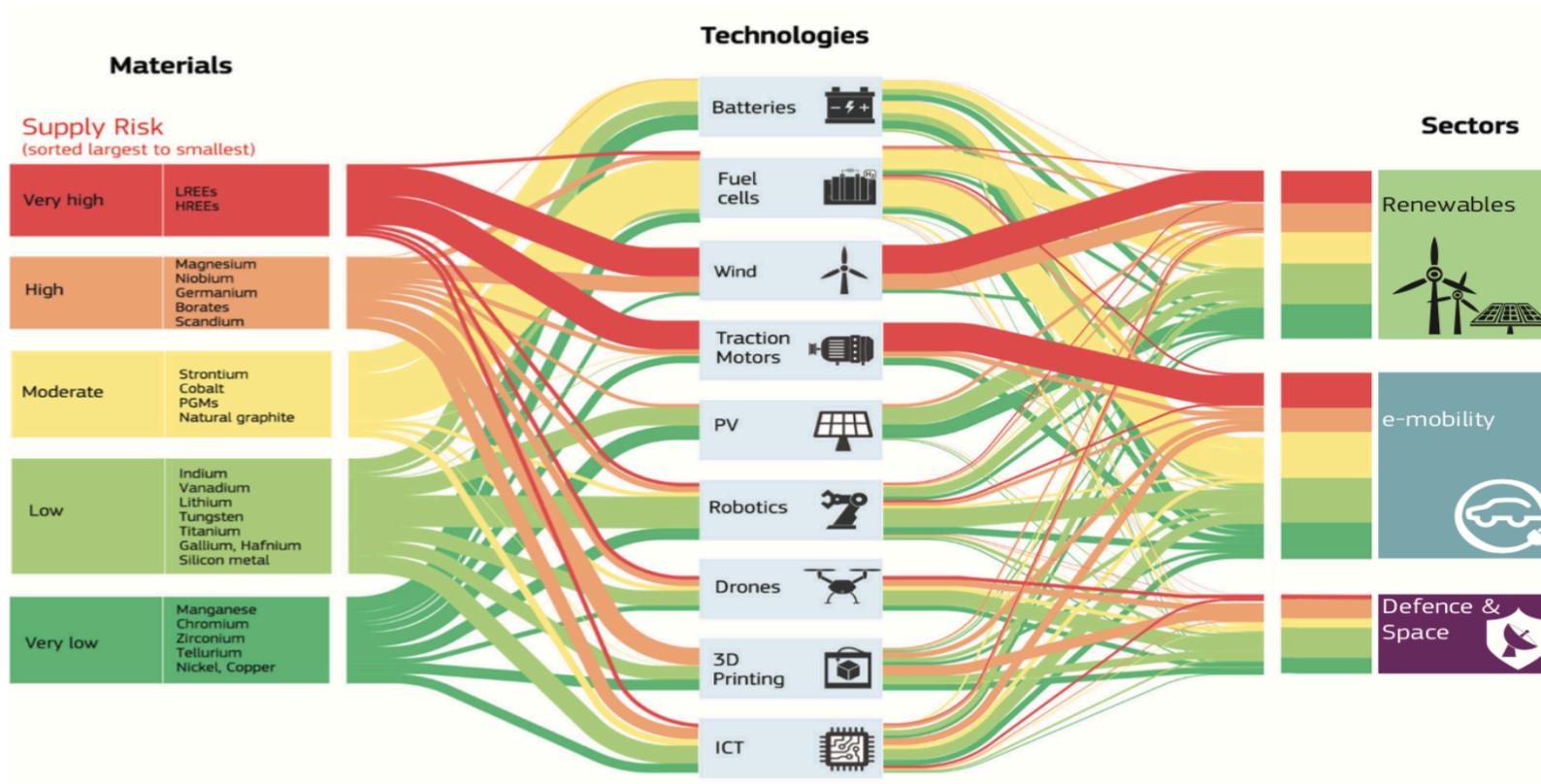


Abbildung 276: Semi-quantitative Darstellung des Flusses von Rohstoffen und ihrem Versorgungsrisiko zu den neun ausgewählten Technologiesektoren in den Bereichen Erneuerbare Energie, e-Mobilität, Verteidigung und Raumfahrt.

Quelle: European Commission, (2020).



Abbildung 277: Verteilung der Produktion Seltener Erden.

Quelle: Statista aus onePioneer vom 13.05.22