GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Ressourceneffizienz
BMBF

Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe: Beiträge der Verbünde

Arbeitspapier im Rahmen des r^4-Integrations- und Transferprojektes

Antonia LOIBL
Martin ERDMANN
Luis TERCERO ESPINOZA

März 2020

BGR
Fraunhofer ISI

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R124 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Cover Foto: Gallium-Kristalle, PPM Pure Metals GmbH. Foto: Andre Bertram, CUTEC.

Karlsruhe & Hannover, März 2020

Kontakt

Dr. Antonia LOIBL
antonia.loibl@isi.fraunhofer.de
Tel. +49 721 6809-401

Dr.-Ing. Luis A. TERCERO ESPINOZA
luis.tercero@isi.fraunhofer.de
Tel. +49 721 6809-401

Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48, D-76139 Karlsruhe

Dr. Martin ERDMANN
martin.erdmann@bgr.de
Tel. +49 511 643 3559

Fachbereich Geologie der mineralischen Rohstoffe
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2, D-30655 Hannover

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6

2 Verortung der Verbünde im anthropogenen Rohstoffkreislauf 7

3 Beiträge der Primärrohstoffverbünde zur Versorgungssicherheit 10

3.1 Verortung der Primärrohstoffprojekte in der Wertschöpfungskette 10

3.2 Rohstoffgruppe Zinn-(Wolfram-)Indium mit den Koppelprodukten Zink, Kupfer und Eisen 11

3.2.1 Aktuelle Versorgungssituation von Zinn 11

3.2.2 Erkundungspotenziale 13

3.2.3 Beiträge der deutschen Lagerstätten zur Bereitstellung von Zinn, Indium, Zink und Eisen 15

3.2.4 Weltweite Potenziale von Zinn-Skarnlagerstätten 18

3.2.5 Hemmnisse 19

3.3 Rohstoffgruppe Seltene Erden 20

3.3.1 Aktuelle Versorgungssituation von Seltenen Erden 20

3.3.2 Erkundungspotenziale 20

3.3.3 Seltenerd-Potenziale in Deutschland 24

3.3.4 Globale Seltenerd-Potenziale außerhalb Chinas 25

3.3.5 Hemmnisse 29

4 Beiträge der Sekundärrohstoffverbünde zur Versorgungssicherheit 30

4.1 Antimon 30

4.2 Baryt 31

4.3 Bismut 32

4.4 Graphit 33

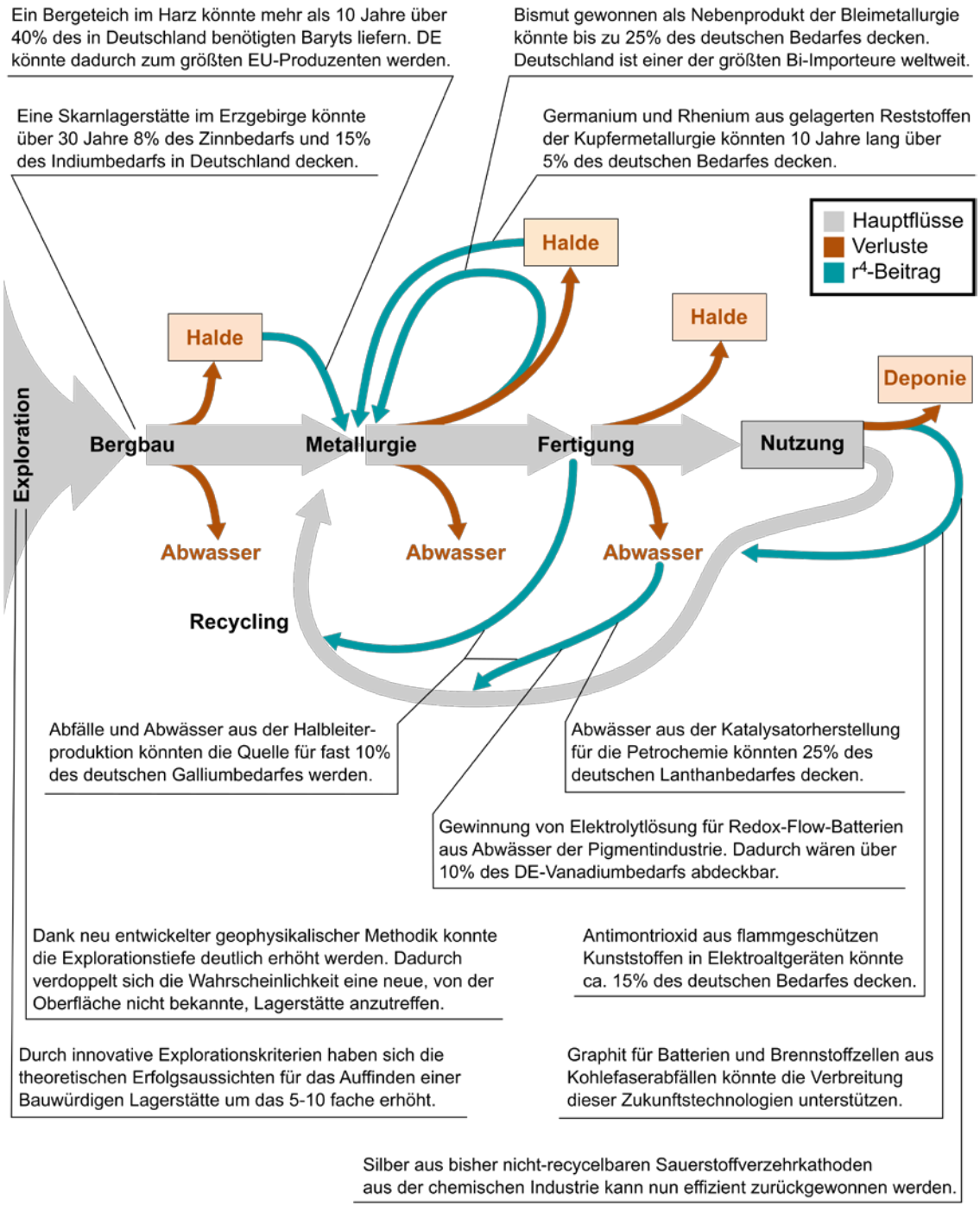
4.5 Lanthan 34

4.6 Silber 35
4.7 Vanadium 36
4.8 Zusammenfassung Sekundärrohstoffprojekte 38

5 Herausragende Beiträge 41

Highlights

Eine verlässliche Rohstoffversorgung ist essenziell für eine funktionierende Wirtschaft. r⁴-Projekte lieferten wichtige Beiträge aus Sicht der Versorgungssicherheit. Diese strecken sich über den gesamten Rohstoffkreislauf und betreffen unterschiedliche Metalle und Mineralien, darunter viele kritische Rohstoffe für die EU, wie unten dargestellt.



1 Einleitung

Eine verlässliche Rohstoffversorgung ist essenziell für eine funktionierende Wirtschaft. Dies trifft auf die deutsche Wirtschaft mit ihrem hohen Anteil an Industrieproduktion in der Gesamtwertschöpfung und der hohen Importabhängigkeit bei vielen (insb. metallischen) Rohstoffen in besonderem Maße zu. Die Fördermaßnahme "r^4 – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe" zielte auf eine Stärkung der Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft sowohl in der primären als auch in der sekundären Rohstoffversorgung (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2012; BMBF 2013). Die inhaltlichen Schwerpunkte der Fördermaßnahme unterstützen die Rohstoffstrategie der Bundesregierung (BMWi 2010) und sind kongruent mit den Leitlinien in der EU Rohstoffinitiative (Europäische Kommision 2010) und den Zielen der Europäischen Innovationspartnerschaft (EIP) für Rohstoffe (Europäische Kommission 2013). Die Schwerpunkte in r^4 waren:

1. Gewinnung von Primärrohstoffen, insb. Konzepte zur wirtschaftlichen Nutzung von komplexen Erzen bekannter Lagerstätten sowie Konzepte zur Exploration,
2. Gewinnung von Sekundärrohstoffen, insb. Mobilisierung von Aufbereitungs- und Produktionsrückständen sowie Kreislaufführung von Altprodukten,
3. Steigerung der Akzeptanz für die Rohstoffgewinnung.

Innerhalb des Integrations- und Transferprojektes (r^4-INTRA) wurden die Beiträge der Verbünde zu den förderpolitischen Zielen der Fördermaßnahme abgeschätzt und kritisch bewertet. In diesem Arbeitspapier werden die Ergebnisse der Verbünde auf ihren Beitrag zu einer verbesserten Versorgungssicherheit mit wirtschaftsstrategischen Rohstoffen hin untersucht.

Von den oben genannten inhaltlichen Schwerpunkten werden lediglich die ersten zwei in der folgenden Analyse berücksichtigt. Obwohl die Akzeptanz für die Rohstoffgewinnung – primär wie sekundär – eine Voraussetzung für ihren Erfolg ist, ist eine Abschätzung der möglichen Effekte der Ergebnisse auf eine verbesserte Versorgung nicht quantitativ darstellbar. Die Betrachtung der Verbundbeiträge basiert auf Ergebnissen aus den r^4-INTRA Arbeitspaketen 3.1 "Stoffflussbasierte Datenerhebung auf Verbundebene" und 3.2 "Verbreitungspotenziale der r^4-Lösungen" sowie auf den Berichten "Rohstoffprofile" (Tercero Espinoza und Erdmann 2018) und "Status quo der Recyclingverfahren in r^4-Projekten behandelter Elemente" (CUTEC 2018), die im Rahmen dieses Arbeitspakets bereits erstellt wurden.

2 Verortung der Verbünde im anthropogenen Rohstoffkreislauf

In diesem Arbeitspapier werden insgesamt 37 Verbünde betrachtet (davon 9 Explorationsprojekte), die Beiträge zur Rohstoffbereitstellung aus primärer und sekundären Quellen leisten sollten. Ursprünglich wurden 38 potenzielle Zielrohstoffe bzw. Rohstoffgruppen von den Verbünden angegeben. Im Laufe der Arbeiten fokussierten sich die Verbünde auf die Rohstoffe mit relevantem Potenzial. Belastbare Ergebnisse, die quantitativ auswertbar sind, liegen abschließend für 21 Rohstoffe vor (Abbildung 1). Hierbei ist zu beachten, dass Projekte im Bereich Suche und Erkundung grundsätzlich nicht quantitativ bewertbar sind. Die erreichten Endergebnisse werden im folgenden Kapitel kurz erläutert und hinsichtlich ihres potenziellen Beitrags zu einer verbesserten Versorgungssicherheit kritisch gewürdigt.

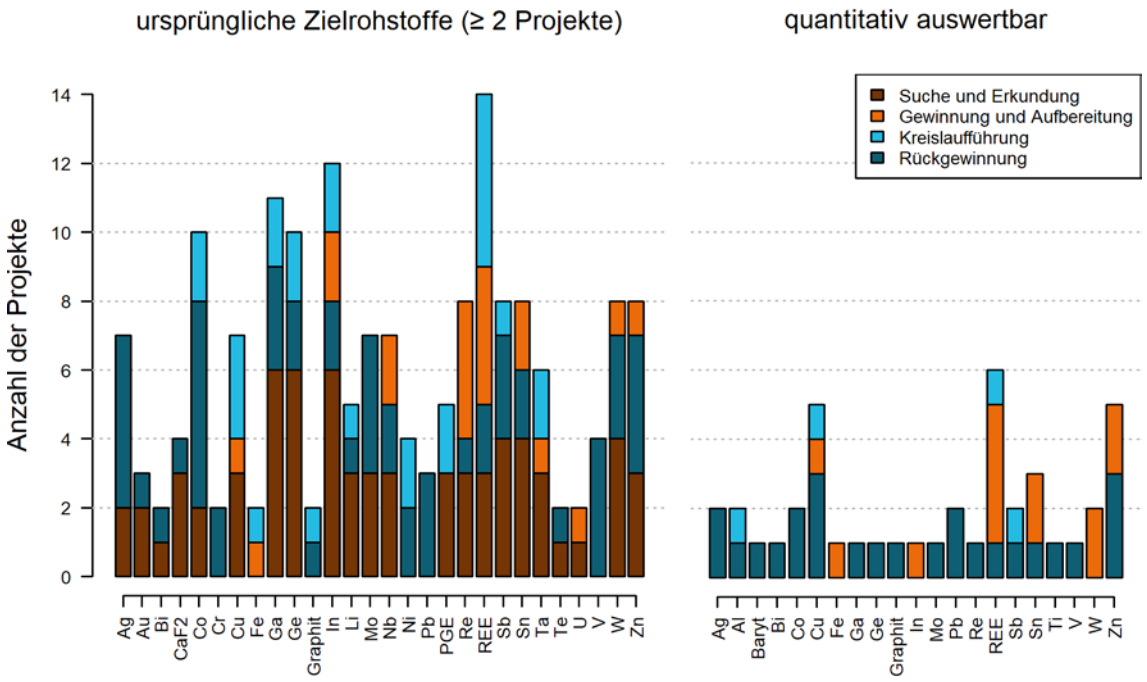


Abbildung 1: Links: Anzahl der Verbünde, die die jeweiligen Zielrohstoffe angegeben haben. Weitere Rohstoffe wurden in jeweils nur einem Projekt behandelt. Diese waren: Aus der Kategorie "Suche und Erkundung" As, Be, Rb, Sc, Se; aus der Kategorie "Gewinnung und Aufbereitung" Zr; aus der Kategorie "Kreislaufführung" B, Mn und Ti; aus der Kategorie "Rückgewinnung" Baryt. Rechts: Die Rohstoffe, die quantitativ ausgewertet wurden.

Von den 38 potenziellen Zielrohstoffen in r^4 sind 15 in der Liste kritischer Rohstoffe für die EU (insg. 26 kritische Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen; European Commission

2017a) und 21 in der Risikogruppe 3 ("hohes Risiko") der DERA Rohstoffliste (DERA 2019). Dies spricht für eine grundsätzlich hohe Relevanz der Forschungsarbeiten. Weiterführende Informationen zu den Anwendungen, in denen die Rohstoffe genutzt werden sowie Daten zum Rohstoffangebot sind im Bericht "Rohstoffprofile: Trends und Vergleiche für die in r⁴ behandelten Rohstoffe" zu finden (Tercero Espinoza und Erdmann 2018).

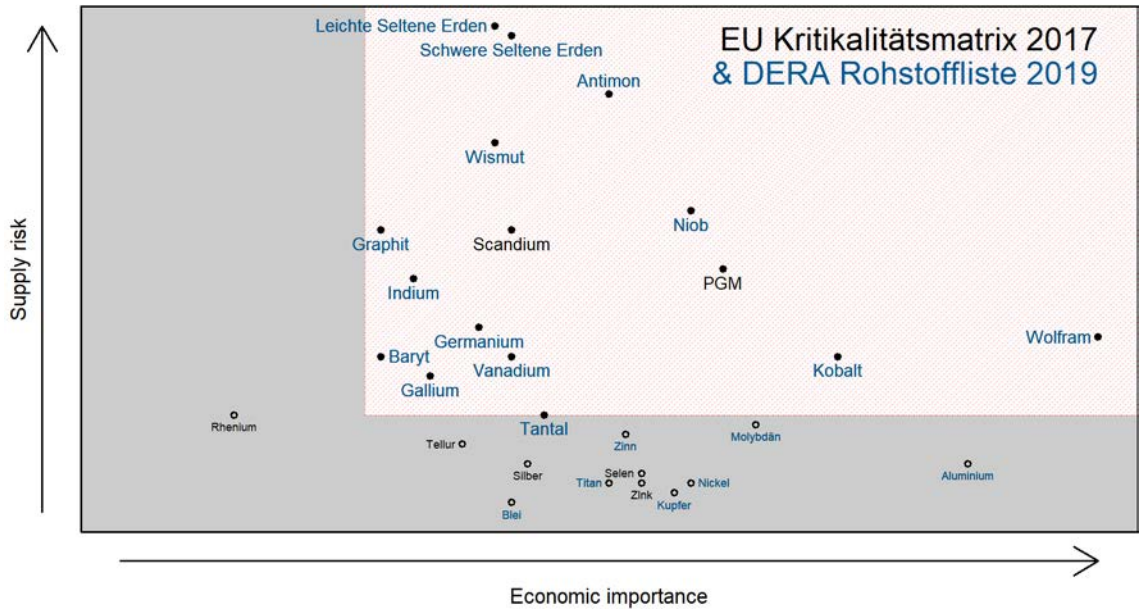


Abbildung 2: Kongruenz zwischen den Zielrohstoffen in r⁴ (beide Tranchen), der Liste kritischer Rohstoffe für die EU (hervorgehobener Bereich rechts oben, European Commission 2017a) und der Risikogruppe 3 ("hohes Risiko") der DERA Rohstoffliste 2019 (DERA 2019). Es wurden nur Rohstoffe berücksichtigt, die in der Kandidatenliste der EU Kritikalitätsstudie vertreten sind.

Die 37 betrachtete Verbünde decken nicht nur eine breite Rohstoffauswahl ab, sondern leisten Beiträge auf unterschiedliche Weise: von der Exploration auf bestimmte Rohstoffe über Aufbereitungsverfahren bis hin zu Rohstoffrückgewinnung aus industriellen Abwässern, Altprodukten und Halden. Der potenzielle Beitrag eines jeden Verbundes hängt stark von dessen Position im anthropogenen Kreislauf ab. So hat bspw. eine Effizienzsteigerung von nur 1 % beim Bergbau potenziell eine viel größere Wirkung auf die Rohstoffverfügbarkeit als die vollständige Erschließung eines Abfallstromes eines bestimmten Prozesses. Große Beiträge zur Versorgungssicherheit bzw. zur Rohstoffverfügbarkeit setzen zwar Erfolge in der technologischen Entwicklung voraus, "kleine" Beiträge dürfen jedoch nicht ohne Weiteres als Misserfolg gedeutet werden. Aus diesem

Grund wurde zunächst eine Verortung der Verbünde im anthropogenen Kreislauf vorgenommen (siehe Abbildung 3). Diese ist wichtig bei der folgenden kritischen Würdigung der unterschiedlichen Beiträge zur Bereitstellung wirtschaftsstrategische Rohstoffe.

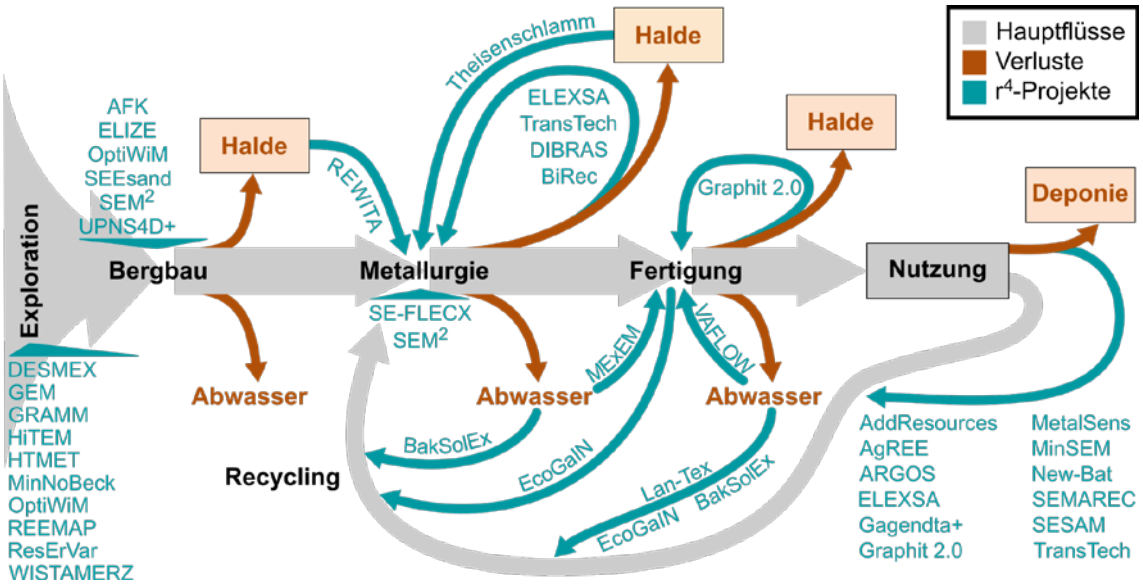


Abbildung 3: Verortung der Verbundbeiträge im anthropogenen Rohstoffkreislauf.

3 Beiträge der Primärrohstoffverbünde zur Versorgungssicherheit

3.1 Verortung der Primärrohstoffprojekte in der Wertschöpfungskette

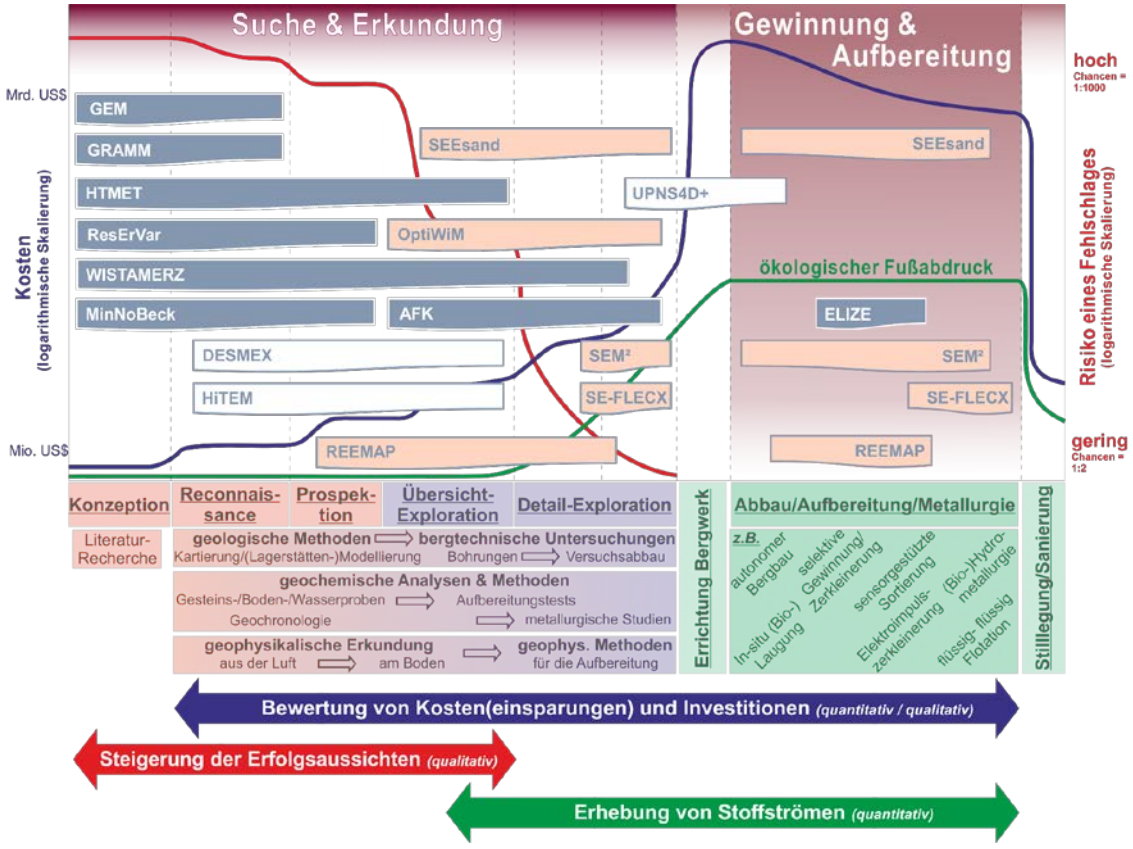


Abbildung 4: Verortung der Primärrohstoffverbünde im Bergbauzyklus. Farblich hervorgehoben ist die Rohstoffgruppe, auf die die Projektarbeiten hauptsächlich/teilweise fokussieren (blaugrau: Sn-(W)-In; rötlich: Seltene Erden; weiß: Zielrohstoff-unabhängige Methodenentwicklung; siehe Text für Details).

Abbildung 4 zeigt die Verortung der Primärrohstoffverbünde im Bergbauzyklus von konzeptionellen Arbeiten und konkreten Explorationsschritten der Suche und Erkundung bis zur Gewinnung und Aufbereitung. Von den Projekten wurden unterschiedliche Methoden, die beispielhaft aufgeführt sind, entwickelt bzw. optimiert. Hierbei können Kosten(einsparungen) und nötige Investitionen bewertet werden (blauer Pfeil), um den Einfluss auf die Kosten während eines Bergbauvorhabens zu quantifizieren (die blaue Kurve stellt die exponentiell steigenden Kosten im Verlauf eines Bergbauprojektes dar). In der frühen Phase der Suche und Erkundung gilt es, die Erfolgsaussichten zu steigern (roter

Pfeil), um das Risiko eines Fehlschlages zu reduzieren (die rote Kurve zeigt die Chancen, dass ein angestoßenes Bergbauprojekt auch tatsächlich in Produktion geht, die erst mit der Detailexploration deutlich steigen). Der Beitrag der Projekte hierzu kann qualitativ beschrieben werden. Stoffströme fallen erst in der fortgeschrittenen Phase der Exploration mit ersten Aufbereitungstests sowie bei der Gewinnung und Aufbereitung an (grüner Pfeil). Diese sind entscheidend u.a. für eine quantitative Bewertung der verbesserten Bereitstellung von Rohstoffen, können allerdings nur von wenigen Projekten erhoben werden.

3.2 Rohstoffgruppe Zinn-(Wolfram-)Indium mit den Koppelprodukten Zink, Kupfer und Eisen

Zinn steht als Hauptwertmetall in dieser Rohstoffgruppe im Fokus, wobei Indium bei den betrachteten Lagerstätten ein häufiges Beiprodukt ist, dessen Bereitstellung entsprechend verbessert werden könnte. Die Koppelprodukte Wolfram, Zink, Kupfer und Eisen können entscheidend für eine wirtschaftliche Gewinnung sein.

3.2.1 Aktuelle Versorgungssituation von Zinn

Deutschland ist mit einem jährlichen Raffinadeverbrauch von 20.000 t Zinn weltweit der viertgrößte Verwender von Zinn (nach China, den USA und Japan). Während die EU Zinn nicht als kritischen Rohstoff einstuft (European Commission 2017b), sieht die DERA die Versorgungslage angespannt. Das gewichtete Länderrisiko ist sowohl bei der Bergwerks- als auch bei der Raffinadeproduktion auf einem hohen Niveau. Während die Länderkonzentration bei der Bergwerksproduktion noch im mäßigen Bereich liegt, steigt sie bei der Raffinade von Zinn deutlich an, sodass Zinn-Raffinadeprodukte ebenso wie das Handelsprodukt „Zinnerze und ihre Konzentrate“ in der höchsten Risikogruppe (3) der DERA eingestuft werden (DERA 2016).

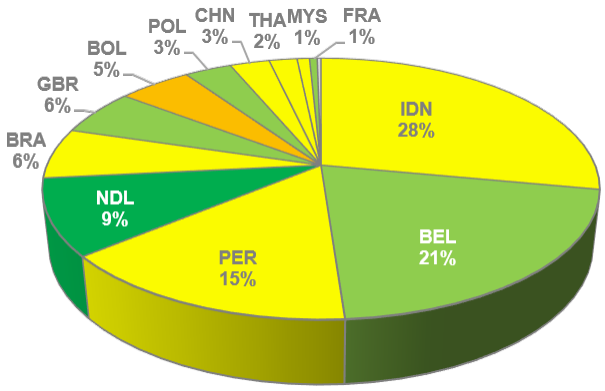


Abbildung 5: Deutsche Importe von Raffinadezinn in 2017. Die Farben beziehen sich auf den Governance-Indikator der Weltbank ((dunkel)grün = (sehr) gute, gelb/orange = mäßige/kritische Regierungsführung.) Die Importe aus BEL, NDL, POL und FRA sind ausschließlich, aus GBR hauptsächlich Sekundärzinn (BGR 2019)

Deutschland ist zu 100 % auf Importe von Raffinadezinn angewiesen. Während 40 % der Zinnimporte als Sekundärrohstoff aus dem europäischen Ausland bezogen wird, stammt 60 % des Zinns aus dem Bergbau (Abbildung 5). Hier ist die Versorgungslage aus unterschiedlichen Gründen leicht bis mäßig kritisch, sodass alternative Bezugsquellen für deutsche Unternehmen sondiert werden sollten. Die größte Bezugsquelle von Zinn ist Indonesien. Hier wird Zinn meist unter großen Umweltauswirkungen aus Seifenlagerstätten gewonnen, häufig auch im besonders umweltschädlichen illegalen Kleinbergbau. Darüber hinaus werden sinkende Vorräte für die Lagerstätten erwartet. Sinkende Vorräte sind auch ein Problem in der großen Zinnmine San Rafael (Peru), aus der Deutschland über 3.000 t Zinn importiert und deren Produktion verringert wird (DERA 2014). Zudem wird das Hauptzinnmineral Kassiterit aufgrund der Gewinnung in der DR Kongo und in Ruanda als Konfliktmineral eingestuft. Die hier gewonnenen Konzentrate gelangen über mehrstufige Handelsrouten auch in die Raffinerien in Südostasien (z. B. Malaysia, China), aus denen auch Deutschland Raffinadezinn importiert. Ab 2021 tritt die EU-Verordnung zur Erfüllung der Sorgfaltspflicht beim Bezug von Zinn (neben Tantal, Wolfram und Gold) in Kraft, womit Unternehmen verpflichtet sind nachzuweisen, dass die Gewinnung des importierten Zinns nicht in Verbindung mit der Konfliktfinanzierung, Kinderarbeit und Verletzung von Menschenrechten verbunden war.

3.2.2 Erkundungspotenziale

Sechs r[4]-Projekte fokussieren auf konzeptionelle Arbeiten, der frühesten Phase der Suche und Erkundung (siehe Abbildung 4). Hier sind die Erfolgsaussichten für ein tatsächliches Auffinden einer bauwürdigen Lagerstätte extrem gering. Diese sollen durch die Projektarbeiten mit unterschiedlichen Ansätzen signifikant verbessert werden.

Die neu entwickelten Explorationskriterien geben Geologen ein Werkzeug an die Hand, nach denen sie im Stile einer Checkliste vier grundlegende geologische Ereignisse überprüfen können, die unabdingbar sind, damit es zu einer Zinn-Wolfram-Mineralisation kommt (u. a. Hochtemperatur-Schmelzbildung). Wird ein Kriterium nicht erfüllt, können ganze geologische Provinzen aber auch einzelne Lagerstätten von einer weiteren Exploration ausgeschlossen werden. Die Kriterien waren teilweise vorher nicht im Detail bekannt, andere wurden mit neuen Daten verbessert. Es ist nicht seriös abzuschätzen, wie viele bisherige gescheiterte Explorationsvorhaben mit dem generierten Wissen frühzeitiger abgebrochen wären, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass die konzeptionellen Arbeiten zukünftig effizienter werden (z. B. mittels einfacher thermischer Modellierungen) und unnötige Ausgaben für kostenintensive Untersuchungen wie Befliegungen und Bohrungen an entsprechenden Stellen nicht vorgenommen werden. Ein direkter Beitrag für die Steigerung der Versorgungssicherheit der entsprechenden Rohstoffe kann zwar nicht beziffert werden, die Erkundung der großen Zinnpotenziale im Erzgebirge (siehe unten) wird durch die Bereitstellung eines detaillierten 3D-Modelles aber verbessert. So werden in der Exploration bisher nicht berücksichtigte Gebiete (abseits der Kontaktbereiche von Graniten) als potenziell wertmetallhaltig identifiziert. Darüber hinaus wird das Verständnis zur Metallverteilung in einzelnen Lagerstätten verbessert, wodurch ein effizienterer, selektiver Abbau möglich wird. Zudem liegen im globalen Maßstab große Anwendungspotenziale zur Erkundung neuer Lagerstätten in bisher nicht bekannten/relevanten Gebieten. Diese neuen Erkenntnisse werden mit einem verbesserten Gesamtverständnis des erzbildenden Systems ergänzt, das wesentlich weiträumiger als die eigentliche Lagerstätte ist. Zusammen mit den entwickelten Modellen u.a. zur Genese der deutschen Sn-(W-)In-Lagerstätten Hämmerlein und Zinnwald können Indikatoren entwickelt werden, welche auf tiefer liegende Lagerstätten, ggf. im Umfeld von bekannten Vorkommen, hinweisen.

Vier Projekte analysierten die Lagerstättenpotenziale wirtschaftsstrategischer Metalle in Deutschland, u. a. auch für die Rohstoffgruppe Zinn-Wolfram-Indium. Ausgewählte hydrothermale Lagerstätten wurden mit verschiedenen geochemischen Methoden neu bewertet und das Ressourcenpotenzial unterhalb der Sedimentbedeckung des norddeutschen Beckens anhand von vorhandenen Bohrungen der Erdölindustrie analysiert. Dabei wurden Formationswässern analysiert, die eine Anreicherung von In, Ga, Ge und

Seltenen Erden in den Pb-, Zn- und CaF_2-Erzen zeigen, deren bergbauliche Gewinnung aufgrund der relativ geringen Potenziale und der sehr großen Tiefe in absehbarer Zukunft allerdings unrealistisch ist. Darüber hinaus wurde aber ein derzeit nicht quantifizierbares Lithium-Potenzial in den Formationswässern nachgewiesen, das potenziell einen Teil des deutschen Bedarfs (Import von > 6.000 t Li-Karbonate in 2018) decken könnte.

Zudem wurde in r^4 ein geochemisches-mineralogisches-wirtschaftsökonomisches Kataster (GMWK) für das deutsche Rohstoffpotenzial an Indium, Gallium, Germanium und Flussspat für zahlreiche Regionen in Deutschland entwickelt. Hierdurch soll das Explorationspotenzial für die Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands und nachfolgend für Unternehmen offengelegt werden. Langfristig sind umfassende Kenntnisse über das heimische (HT)-Rohstoffpotenzial ein wichtiger Baustein, um auf eine veränderte Weltmarktlage (Exportbeschränkungen, starker Preisanstieg) reagieren zu können. Somit ist ein langfristiger, theoretischer Beitrag zur Erhöhung der Versorgungssicherheit gegeben.

Mittels umfangreicher Beprobung des Erzgebirges wurde eine detaillierte 3D-Prognosekarten u. a. für die Verteilung von Zinn, Wolfram und Indium entwickelt, das in Deutschland die größten Potenziale dieser Metalle aufweist. Die Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass die Zinn-Wolfram-Indium-Zink-Mineralisation in Skarnen im Gegensatz zu früheren Annahmen in keiner räumlichen Beziehung zu großen, bekannten Granitintrusionen stehen. Von allen Projekten wurden neue Erkenntnisse zu den größten Indium-Anreicherungen gewonnen (ausschließlich in eisenarmen Sphaleriten), deren Gewinnung als Beiprodukt eine Lagerstätte häufig erst wirtschaftlich macht und zudem die Versorgungssicherheit mit dem Hochtechnologiemetall steigern würde.

Die neuen Explorationskriterien aller Projekte tragen in erheblichen Maße dazu bei, die Wertmetallverteilung in bekannten Lagerstätten und neuen Distrikten des Erzgebirges besser zu verstehen, was die nachfolgende Detail-Exploration und deren Erfolgsaussichten verbessert. Die hier geleisteten Arbeiten laufen grundsätzlich im Vorfeld industrieller Tätigkeit ab. Die geschaffene Datengrundlage als Basis für eine effizientere und erfolgversprechendere Exploration könnte somit das Augenmerk von Bergbauunternehmen verstärkt auf das Erzgebirge lenken, was einen positiven, allerdings nicht quantifizierbaren Einfluss auf die nationale Bereitstellung von Zinn, Wolfram und Indium haben kann.

3.2.3 Beiträge der deutschen Lagerstätten zur Bereitstellung von Zinn, Indium, Zink und Eisen

Große Zinnvorkommen im Erzgebirge sind aus dem historischen Bergbau bereits weitläufig bekannt und zudem relativ gut zugänglich. Allerdings handelt es sich bei den Vorkommen in Skarnen (Fokus der folgenden Betrachtung) und Greisen um sehr feinkörnige, stark verwachsene polymetallische Erze. Eine Gewinnung findet derzeit nicht statt, da die entsprechenden Rohstoffe in weniger komplexen Lagerstätten insbesondere in Südostasien und Südamerika kostengünstiger gewonnen werden können. Kassiterit in Skarnlagerstätten tritt häufig zusammen mit anderen, vor allem sulfidischen Erzmineralen auf, von denen er durch Standardflotationsverfahren nur schwer zu trennen ist. Zudem ist die vorher nötige Zerkleinerung sehr energieintensiv. Auch wenn der Anteil an Skarnlagerstätten an den weltweiten Zinnressourcen 23 % beträgt und damit zusammen mit Seifenlagerstätten den mengenmäßig bedeutendsten Anteil stellt, werden Skarnerze derzeit nur in China auf Zinn abgebaut.

Für eine selektive und energieeffiziente Aufbereitung wurden Technologien wie die Elektroimpulszerkleinerung weiterentwickelt, die in ein adaptives Gesamtverfahren integriert werden können. Die Anlagen wurden bis in den Pilotmaßstab für 140 t Erz entwickelt und bei einem Zinngehalt von ~0,93 Gew.% konnte aus einer Tonne Skarnerz 10 kg Zinnkonzentrat mit einem Zinngehalt von 50 % gewonnen werden. Unter der Voraussetzung, dass das Konzentrat in Deutschland weiter verhüttet und raffiniert wird (ohne Verluste), läge die jährliche Ausbeute von **Zinn**metall im industriellen Maßstab in der gut explorierten Skarnlagerstätte Hämmerlein (Distrikt Tellerhäuser) bei rund 1.750 t. Bei einer deutschlandweiten Nachfrage (=Importe) von rund 13.000 t Raffinadezinn pro Jahr aus dem Bergbau (hauptsächlich aus Indonesien und Peru; zudem Importe von knapp 9.000 t Sekundärraffinadezinn) würde die Gewinnung rund 13,5 % dieser Importe substituieren (Abbildung 6). Bei einer Ausschöpfung der Potenziale in vier weiteren Skarnerzlagerstätten im Erzgebirge mit den relativ weit fortgeschrittenen Vorratsklassifikationen „indicated + inferred Resources“ (unten als „Potenzial 1“ aufgeführt) könnten weitere 7.875 t Zinn jährlich zur Verfügung stehen (jeweils eine Aufbereitungsanlage mit der gleichen Kapazität vorausgesetzt). Nimmt man die vier weiteren Skarnerzlagerstätten, für die eine Aufsuchungserlaubnis vorliegt (unten als „Potenzial 2“ aufgeführt), in diese Betrachtung mit hinein, könnten insgesamt rund 13.000 t Zinn und somit sämtliche Importe von Primärraffinadezinn durch heimischen Bergbau gedeckt werden (Abbildung 6). Da ab 2018 zudem mit einem Rückgang der Ressourcen in den Zinn-Seifenlagerstätten in Indonesien und Peru gerechnet wird (größter Zinnlieferant für Deutschland, siehe oben), könnte die Zinngewinnung in Deutschland einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit liefern (eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung außer Acht gelassen).

Abbildung 6: Oben: Deutsche Importe von Raffinadezinn (BGR 2019). Die Farben beziehen sich auf den Governance-Indikator der Weltbank (siehe Abbildung 5). Unten: Potenzielle jährliche Gewinnung in den deutschen Skarnlagerstätten (siehe Text für Details).

Die Koppel- und Beiprodukte, die in der untersuchten Lagerstätte Hämmerlein mitgewonnen werden könnten, sind Zink, Eisen und Indium. Kupfer ist mit 0,2 Gew.% zwar auch im Erz enthalten, für eine wirtschaftliche Gewinnung ist der Gehalt allerdings deutlich zu niedrig. Wolfram, ein häufiges Koppelprodukt in Zinnlagerstätten, kommt hier nicht vor. 15 Gew.% des verarbeiteten Erzes könnten direkt als Schotter für den nahegelegenen Straßenbau eingesetzt werden.

Der Zinkgehalt im Skarnerz liegt bei 1,39 Gew.%. Aus einer Tonne Erz können 15 kg **Zink**konzentrat mit einem Zinkgehalt von 50 % gewonnen werden. Unter der Voraussetzung, dass das Konzentrat in Deutschland weiter verhüttet und raffiniert wird (ohne Verluste), läge die jährliche Ausbeute von Zinkmetall in der Lagerstätte Hämmerlein bei 2.625 t. Bei einem deutschlandweiten Raffinadeverbrauch von rund 480.000 t Zink (308.000 t Importe; 168.000 t inländische Raffinadeproduktion, die allerdings größtenteils auch auf Importe von Konzentraten aus u. a. Australien, Schweden und den USA angewiesen ist) würde die Gewinnung rund 0,5 % des Bedarfs decken. Eine Ausdehnung auf alle Lagerstätten mit „Potenzial 1“ (siehe oben) würde, bei identischem Gehalt und Ausbringen wie in Hämmerlein, weitere 10.500 t Zink bereitstellen, die Lagerstätten „Potenzial 2“ nochmals 10.500 t, so dass das maximale Potenzial in deutschen Skarnlagerstätten bei rund 5 % des deutschen Raffinadeverbrauchs beträgt.

Da die Recyclingrate von Zink bereits 50 % beträgt (Tercero Espinoza und Erdmann 2018), ist die bergbauliche Gewinnung von Zink mit Blick auf eine gesteigerte Versorgungssicherheit nicht zwingend nötig, im Sinne der Ressourceneffizienz im Bergbau und als Beitrag für einen wirtschaftlichen Abbau von Zinn aber durchaus sinnvoll. Zudem gibt es in Deutschland bereits vorhandene Kapazitäten zur Zinkverhüttung (z.B. Nordenhamer Zinkhütte GmbH).

Der Eisenanteil im Skarnerz liegt bei 20 Gew.%. Aus einer Tonne Erz können 200 kg **Eisen**konzentrat mit einem Eisengehalt von 60 % gewonnen werden. Unter der Voraussetzung, dass das Konzentrat in Deutschland weiterverarbeitet wird (ohne Verluste),

läge die jährliche Ausbeute von Eisen in der Lagerstätte Hämmerlein bei 35.000 t, was knapp der derzeitigen bergbaulichen Gewinnung in Deutschland von 43.500 t entspräche. Bei einem deutschlandweiten Verbrauch von rund 39 Millionen t Stahlerzeugnissen würde die Gewinnung rund 0,09 % des Bedarfs decken. Eine Ausdehnung auf alle Lagerstätten mit „Potenzial 1“ (siehe oben) würde, bei identischem Gehalt und Ausbringen wie in Hämmerlein, weitere 140.000 t Eisen bereitstellen, die Lagerstätten „Potenzial 2“ nochmals 140.000 t, so dass das maximale Potenzial in deutschen Skarnlagerstätten bei rund 0,8 % des deutschen Bedarfs an Stahlerzeugnissen beträgt.

Die bergbauliche Gewinnung von Eisen aus den Lagerstätten im Erzgebirge ist mit Blick auf eine gesteigerte Versorgungssicherheit unbedeutend, im Sinne der Ressourceneffizienz im Bergbau und als Beitrag für einen wirtschaftlichen Abbau von Zinn aber durchaus sinnvoll. Zudem gibt es in Deutschland eine gute Infrastruktur zur Weiterverarbeitung der Eisen-Konzentrate.

Der Indiumgehalt im Skarnerz liegt bei 70 ppm (0,007 Gew.%). Aus einer Tonne Erz können 100 g **Indium**konzentrat mit einem Indiumgehalt von 1 % gewonnen werden. Unter der Voraussetzung, dass das Konzentrat in Deutschland weiter verhüttet und raffiniert wird, läge die jährliche Ausbeute von Indiummetall in der Lagerstätte Hämmerlein bei 3,5 t (ohne Berücksichtigung von Prozessverlusten). Bei einem deutschlandweiten Raffinadeverbrauch von rund 22,6 t Indium (abgeleitet von der Importmenge), würde die Gewinnung rund 15 % des Bedarfs decken. Die Indiumgehalte in Skarn-Lagerstätten variieren stark. In der Lagerstätte Geyer, die in das „Potenzial 1“ (siehe Tabelle 1) fällt, liegt der Indiumgehalt bei 35 ppm. Legt man diesen Wert für die weiteren Lagerstätten mit „Potenzial 1“ zugrunde, würden von diesen 4 Lagerstätten weitere 7 t Indium bereitgestellt und von den Lagerstätten mit „Potenzial 2“ (siehe Tabelle 1) nochmals 7 t, so dass das eine Gewinnung des maximalen Potenzials in deutschen Skarnlagerstätten 77 % der deutschen Indiumimporte obsolet machen könnte.

Wolfram wird in der hier dargestellten Betrachtung ausgeklammert, da es zwar in zahlreichen Skarnlagerstätten vorhanden ist, allerdings in der im Detail betrachteten Lagerstätte Hämmerlein nicht wirtschaftlich angereichert vorkommt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass von den Koppel- und Beiprodukten der betrachteten Lagerstätten im Erzgebirge nur Indium einen signifikanten Einfluss auf die Steigerung der Versorgungssicherheit hat (Tabelle 1). Nichtsdestotrotz spielen die anderen Stoffströme eine wichtige Rolle für eine wirtschaftliche Gewinnung der Skarnerze, zumal die Weiterverarbeitung über die in Deutschland vorhandene Infrastruktur möglich ist. Zudem ist eine Gewinnung und Verwendung von allen bedeutenden Stoffströmen im Sinne der ressourceneffizienten Nutzung einer Lagerstätte und somit der Nachhaltigkeit.

Tabelle 1: Potentieller Beitrag der Skarnlagerstätten im Erzgebirge zur Deckung des deutschen Bedarfs 2017 an den entsprechenden Rohstoffen/Metallen.

Rohstoff/Metall	Hämmerlein	+ Potenzial 1*	+ Potenzial 2#
Zinn	8 %	44 %	59 %
Zink	0,5 %	3 %	5 %
Eisen	0,1 %	0,4 %	0,8 %
Indium	15 %	46 %	77 %

** Potenzial 1: vier weitere Skarnerzlagerstätten im Erzgebirge mit den Vorratsklassifikationen „indicated + inferred Resources“*

 # Potenzial 2: vier weiteren Skarnerzlagerstätten, für die eine Aufsuchungserlaubnis vorliegt

3.2.4 Weltweite Potenziale von Zinn-Skarnlagerstätten

Weltweit könnte Deutschland bei Ausschöpfung aller Zinnpotentiale zu einem der zehn größten Produzenten werden. Ähnlich hohe Zinnvorkommen in Skarnlagerstätten wie in Deutschland wurden in Australien und Kirgistan nachgewiesen. Die Potenziale in Skarnlagerstätten betragen rund 50 % der Zinnvorkommen in Seifen-Lagerstätten, deren Abbau mit hohen Umwelteingriffen verbunden ist und deren Anteil dadurch reduziert werden könnte (Abbildung 7). Insbesondere die Vorkommen in Australien sind zum einen gut exploriert bzw. teilweise kurz vor der Inbetriebnahme und nach derzeitigen Schätzungen auch kostengünstiger in der Produktion als in Deutschland (DERA 2014). Zum anderen wird die Regierungsführung in Australien sehr positiv bewertet, sodass mit einer zuverlässigen Bereitstellung von Zinn für den Weltmarkt gerechnet werden kann. Dies steht im Kontrast zu den großen Lagerstättenpotenzialen in dem kritisch bewerteten Kirgistan, deren größte Lagerstätte zudem von einem chinesischen Unternehmen betrieben wird. Ähnlich wie im Erzgebirge liegen auch bei diesen Vorkommen die größten Herausforderungen bei der Aufbereitung. Die in r^4 entwickelten Aufbereitungstechnologien könnten konzeptionell insbesondere für die Lagerstätten in Australien übernommen, beziehungsweise mit den dort bereits entwickelten Technologien für eine wirtschaftliche Gewinnung kombiniert werden. So könnten auch deutsche Firmen in den australischen Lagerstätten beteiligt sein.

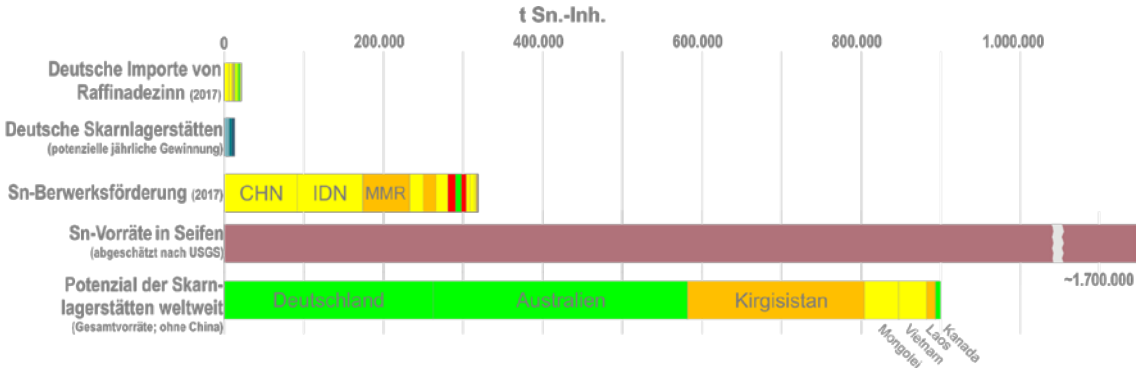


Abbildung 7: Potenzial der Skarnlagerstätten weltweit. Die Farben beziehen sich auf den Governance-Indikator der Weltbank (siehe Abbildung 5). Für Details zu deutschen Importen und der potenziellen Gewinnung in deutschen Skarnlagerstätten siehe Abbildung 6.

3.2.5 Hemmnisse

Das größte Hemmnis für eine Umsetzung der Projektergebnisse in eine wirtschaftlich betriebene Zinnlagerstätte ist der Zinnpreis, der nach einem kurzen Hoch im Februar 2019 (22.000 $US/t) derzeit unter 17.000 $US/t liegt (Stand 02/2020). Für eine wirtschaftliche Gewinnung von Zinn aus Skarnlagerstätten sind deutlich höhere Preise nötig, pessimistischen Meinungen zufolge sogar über 30.000 $US/t (DERA 2014) wenn die Zinngehalte nicht deutlich über 0,5 Gew.% liegen. Eine effiziente, energiearme Aufbereitung und die Gewinnung aller werthaltigen Elemente kann diesen „break-even“ Preis jedoch deutlich drücken. Damit die im Erzgebirge gewonnenen Zinnkonzentrate auch direkt zur Bereitstellung von Zinnmetall in Deutschland beitragen, müsste die Verhüttung und Raffinade auch in Deutschland oder zumindest der EU stattfinden. Mit der Feinhütte Halsbrücke GmbH steht zumindest eine der wenigen europäischen Zinnhütten in unmittelbarer Nähe als potenzieller Abnehmer der Zinn-Konzentrate zur Verfügung. Derzeit werden an dem Standort allerdings ausschließlich zinn- und bleihaltige Schrotte zu einer Blei-Zinn-Legierung verhüttet. Wenn mehrere Lagerstätten in Produktion gingen, könnte eine höhere Kapazität und somit eine Anpassung der Weiterverarbeitungsanlage ermöglicht werden. Dann könnte auch eine Aufbereitungsanlage für mehrere Lagerstätten genutzt werden, um die Investitionskosten zu senken. Einem weiteren Hemmnis, dem potenziellen Fachkräftemangel an Bergleuten in Deutschland, könnten die ebenfalls in r[4] erforschte (Teil-)Automatisierung des Bergbaus entgegenwirken.

3.3 Rohstoffgruppe Seltene Erden

3.3.1 Aktuelle Versorgungssituation von Seltenen Erden

Die Zusammensetzung der Seltenen Erden in den Lagerstätten ist stark unterschiedlich mit einer insgesamt deutlich größeren Häufigkeit der leichten Seltenen Erden (LSE; >90 %) gegenüber den schweren Seltenen Erden (SSE). Da die Bedeutung von SSE in den Anwendungen zunimmt (insb. Dysprosium in Magneten), die Seltenen Erden aber nur gemeinsam gewonnen werden können, kommt es zu einem Ungleichgewicht zwischen Angebot (rel. groß bei LSE) und Nachfrage (verstärkt nach SSE). Dieses schlägt sich bei den in der Regel deutlich höheren Preisen für SSE nieder. Eine nachfragekonforme Verteilung der Seltenerdelementen in neuen Lagerstätten ist daher ein entscheidender Faktor für eine wirtschaftliche aber auch ressourceneffiziente Gewinnung von Seltenen Erden.

Auch wenn die Marktverfügbarkeit von LSE aufgrund der größeren Häufigkeit im Vergleich zu SSE theoretisch besser sein sollte, werden beide Gruppen gleichermaßen von der EU-Kommission als die Rohstoffe mit dem höchsten Risiko in der Verfügbarkeit eingestuft (European Commission 2017a). Grund ist das Beinahe-Monopol Chinas in der Produktion der Seltenen Erden. So wurden in 2016 ca. 85 % der LSE und 100 % der SSE in China produziert und nur bei den LSE ist derzeit eine minimale Entspannung der Marktkonzentration aufgrund einer gesteigerten Produktion der Mt. Weld Mine in Australien (mit der Weiterverarbeitung in Malaysia) zu verzeichnen. Dementsprechend stammen die deutschen Importe von Erzen, Raffinadeprodukten, Verbindungen, Legierungen und Gemischen zum überwiegenden Anteil aus China. Gleichzeitig ist China auch größter Verbraucher von Seltenen Erde. Das „Made-in-China-2025“ Programm, über das ein Aufstieg in der Wertschöpfungskette in zehn strategischen Industrien (u.a. E-Mobilität und erneuerbare Energien) angestrebt wird, wird China endgültig zum Netto-Importeur von Seltenen Erden machen. Die Marktverfügbarkeit ist demnach stark von chinesischen Interessen abhängig, was neben Handelsbeschränkungen (abseits des aktuellen Handelsstreits zwischen China und den USA) zu Lieferengpässen führen kann.

3.3.2 Erkundungspotenziale

Die in r^4 entwickelten geophysikalische Methoden für die Lagerstättenerkundung decken einen Großteil der Explorationsphase ab (vgl. Abbildung 4). Der Fokus lag dabei nur indirekt auf der Erkundung von Seltenerdlagerstätten, sondern vielmehr auf der Methodenentwicklung. Elektrisch leitfähige Erzlagerstätten können dank eines luftgestützten (semi-airborne) Verfahrens bis in 1.500 m Tiefe erkundet werden. Das ist deutlich mehr als bei existierenden Verfahren, die meist nur bis in 150 m Tiefe (in Ausnahmefällen bis

in 500 m) reichen. Dazu werden Starkstromquellen am Boden installiert und die induzierten magnetischen Felder während einer Befliegung von der Luft aus gemessen. Für die Erkundung von sulfidischen Lagerstätten mit Tiefenerstreckung auch unterhalb von 500 m mittels hochsensitiven TEM-Empfängern (transiente, Zeitbereichs- oder Pulselektromagnetik) auch in gestörten, urbanen Gebieten wurde zudem ein rein bodengestützter Ansatz verfolgt. Der Einsatz der TEM-Technologie ist zwar teurer aber auch deutlich schneller als etablierte Methoden und kann zudem ein Target mit einer leitfähigen Struktur trotz Überdeckung detektieren. Gemessen werden bei den in r^4 verfolgten Ansätzen Anomalien von sich dem Umgebungsgestein unterscheidenden Erzkörpern; eine direkte Bestimmung, um welche Erze es sich handelt oder gar wie hoch die Gehalte sind, kann nicht erfolgen. Nichtsdestotrotz birgt das entwickelte Verfahren enorme Potenziale, neue Lagerstätten zu entdecken oder die Tiefenerstreckung von bereits bekannten Lagerstätten besser zu verstehen, da in den meisten Fällen (insb. auch in Deutschland) der geologische Untergrund nur in relativ geringen Tiefen bekannt ist.

Nach einer frühen Studie von Wellmer (1983) lässt sich die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden von unbekannten Lagerstätten in größerer Tiefe theoretisch abschätzen. Hierfür wird angenommen, dass bei steil stehenden, an der Oberfläche aufgeschlossenen Lagerstätten im Durchschnitt die Hälfte des Erzkörpers bereits erodiert ist. Für die durchschnittliche Tiefe x der Lagerstätte bedeutet das x/2. Wellmer (1983) leitet von unterschiedlichen Lagerstätten in den USA und Kanada eine durchschnittliche Lagerstättentiefe von 400 m (=x/2 -> x=800m) ab. Da nur nicht bereits bekannte Lagerstätten in die Berechnung zur Steigerung der Erfolgsaussichten einfließen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, eine neue Lagerstätte anzutreffen, linear mit der Tiefe (Wahrscheinlichkeit = Explorationstiefe ET / durchschnittliche Lagerstättentiefe x; Abbildung 8). Daraus abgeleitet ergibt sich bei einer ET von 800 m die gleiche Wahrscheinlichkeit eine neue, von der Oberfläche nicht bekannte Lagerstätte anzutreffen wie an der Oberfläche. Diese liegt bei state-of-the-art Technik mit Eindringtiefen um 500 m bei lediglich 60 %. Bei einer Tiefe 1.000 m ist die Wahrscheinlichkeit um das 1,3-fache höher als an der Oberfläche, bei einer Explorationstiefe von von 1.500 m sogar um das 1,9-fache höher.

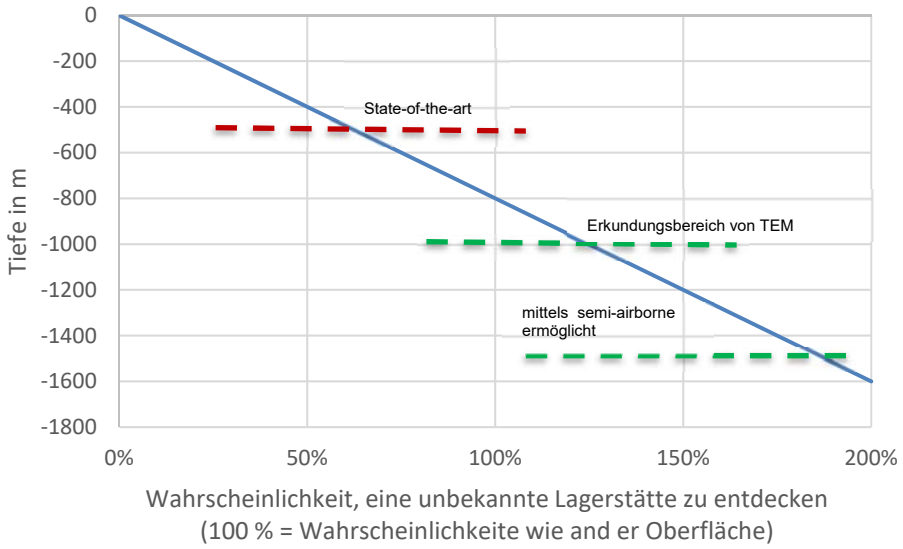


Abbildung 8: Wahrscheinlichkeit, eine von der Oberfläche noch nicht bekannte Lagerstätte zu entdecken. 100 % entspricht der gleichen Wahrscheinlichkeit die an der Oberfläche gegeben ist. Berechnungen basierend auf Modell von Wellmer (1983).

Diese Berechnung beruht allerdings auf variablen Annahmen und kann nur als Näherung betrachtet werden. Zudem muss die geophysikalische Erkundung weiterhin mit geochemischen und geologischen Modellen ergänzt werden.

Generell lässt sich festhalten, dass insb. in traditionellen Bergbauländern mit aktueller und/oder historischer Gewinnung die oberflächennahen Lagerstätten größtenteils bekannt sind. Vor diesem Hintergrund stellen Erkundungsmethoden mit einer hohen Eindringtiefe ein unabdingbares Instrument zum Auffinden neuer Lagerstätten dar.

Die theoretische Wahrscheinlichkeit für das Auffinden einer bauwürdigen Lagerstätte (p_e) lässt sich nach Slaby und Wilke (2006) mit

$p_e = p_{geo} * p_{pr} * p_{ex}$

berechnen, wobei

- p_{geo} = Wahrscheinlichkeit für das geologische Vorhandensein des Vorkommens
- p_{pr} = Wahrscheinlichkeit dafür, dass das geologisch vorhandene Vorkommen auch gefunden wird
- p_{ex} = Wahrscheinlichkeit dafür, dass das gefundene Vorkommen auch bauwürdig ist.

Hierbei handelt es sich um statistisch voneinander unabhängige Wahrscheinlichkeiten. Bei Explorationsprojekten in denen die geophysikalische Erkundung eingesetzt wird,

kann davon ausgegangen werden, dass das geologische Vorhandensein des Vorkommens über Modelle bereits ausführlich untersucht wurde und die Wahrscheinlichkeit bei 50 % (p_{geo} = 0,5) liegt. Über die in r⁴ entwickelten Methoden steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das geologisch vorhandene Vorkommen auch gefunden wird, erheblich an (p_{pr} = 0,5 anstatt 0,05-0,1), während die Wahrscheinlichkeit, dass das gefundene Vorkommen auch bauwürdig ist (p_{ex} = 0,1), gleichbleibt. Die theoretischen Gesamterfolgsaussichten, dass das untersuchte Vorkommen in Produktion geht steigen somit um das 5-fache von 0,5 % auf 2,5%.

Konkret getestet wurde die semi-airborne-Technologie an einer Antimonvererzung in Schleiz (Thüringen) sowie an der weltgrößten Eisenerzlagerstätte Kiruna in Schweden. Dieser vertikal verlaufende Erzkörper wird bereits heute bis in eine Tiefe von 1365 m (unterste Hauptsohle) abgebaut, sodass die geophysikalischen Messungen gut mit den tatsächlichen Gegebenheiten verifiziert werden können. Besonders interessant für die hier beschriebenen Seltenerd-Potenziale ist die Lagerstätte Kiruna, da die Erze 1 Gew. % Seltene Erden enthalten, die derzeit nicht ausgebracht und auf Halde gelegt werden. Die angenommene Gesamttonnage an Seltenen Erden beträgt knapp 20 Millionen Tonnen, womit Kiruna zu den weltweit größten Vorkommen an Seltenen Erden zählt. Eine Gewinnung und ein damit verbundener großer Schritt für die EU zu einer unabhängigeren Versorgung von China scheitert bisher u. a. an der nicht wirtschaftlichen Aufbereitung.

Die schwierige bzw. nicht etablierte Aufbereitung von anderen Erzen als den typischen Erzen der derzeit im Abbau stehenden Lagerstätten, wie Bastnäsit und Monazit beziehungsweise Ionenadsorptionstonen, ist generell das größte Problem für eine Seltenerd-Gewinnung in Europa, u. a. auch für die peralkaline Lagerstätte Norra Kärr in Südschweden. Sie ist eine der am besten explorierten Seltenerd-Lagerstätten in Europa (siehe unten für quantitative Potenzialabschätzungen) und eine Beispiellagerstätte für in r⁴ entwickelte Hyperspektralanalyse zur Identifizierung und Charakterisierung von Seltenerdelementen. Auch wenn die hier entwickelte geophysikalische Methodik mit entsprechender Anpassung auch auf andere Rohstoffe angewendet werden kann, liegt das Hauptaugenmerk der Projektarbeiten auf dem Aufbau einer Referenzbibliothek, um in Echtzeit die Verteilung von Seltenerdanreicherungen in einer Lagerstätte zu detektieren. Quantitative Aussagen zu einem Beitrag zur Bereitstellung von Seltenen Erden für die deutsche Wirtschaft lassen sich hier nicht treffen, nichtsdestotrotz ist die Methodenentwicklung ein weiterer Beitrag um ein genaueres Verständnis über Seltenerdlagerstätten außerhalb Chinas zu erlangen. Vorteile des hyperspektralen Verfahrens sind die angesprochene Echtzeitanalyse bei Schaffung einer entsprechenden Referenzbibliothek, die theoretisch auch mit anderen Rohstoffen erweiterbar ist und die Anwendung der Erkundung auf der

Skala vom Aufschluss in der Lagerstätte, über die Drohne bis zum Satelliten (mit entsprechenden Einbußen in der Genauigkeit). Zudem lässt sich die Technik auch direkt im Bergbau bei der Vorerkundung im Bergwerk zu einem selektiven Abbau sowie in der Sortierung für eine effizientere Aufbereitung anwenden. Die Nachteile der Technologie liegen darin, dass eine ausreichende und gleichmäßige Beleuchtungssituation in den Spektren des Sonnenlichtes vorliegen muss, die Gesteinsoberfläche nicht stark von Vegetation o.ä. bedeckt sein darf und klare Sicht herrschen muss, was bei einer in der Regel hohen Staubbelastung im Bergbau problematisch ist.

3.3.3 Seltenerd-Potenziale in Deutschland

Deutschland verfügt nur über wenige Seltenerdvorkommen. Neben einem nicht weiter untersuchten Vorkommen am Kaiserstuhl (Baden-Württemberg) wurde für das Vorkommen Storkwitz in Delitzsch (Sachsen) eine Ressourcenabschätzung vorgenommen. Aufgrund niedriger Erzgehalte und einer damit verbundenen schwierigen Aufbereitung werden die Explorationsarbeiten aber nicht weiterverfolgt.

In r[4] wurden die Seltenerd-Potenziale in Zirkonen aus Schwermineralsanden der deutschen Ostseeküste bewertet. Schwermineralsande, die in entsprechenden Seifenlagerstätten bereits angereichert sind, dienen auf globaler Ebene zur Rohstoffgewinnung (z.B. Zinn und Gold in residualen Seifen). Bevorzugt im marinen Milieu und bei entsprechenden Ausgangsgesteinen können sich neben Titan und Zirkon auch Seltenerd-Minerale wie Monazit und Xenotime anreichern. Insb. in den 1990er Jahren wurden diese im großen Stil (15 - 30 % der Weltproduktion von Seltenerd-Oxiden) in Australien gewonnen (Mudd und Jowitt 2016). Allerdings wurde bisher nicht der ebenso enthaltene Zirkon zur Seltenerd-Gewinnung genutzt.

Kies- und Sandrohstoffe, die ohnehin zum Küstenschutz gewonnen werden, wurden aufbereitet, um Schwermineralfraktionen zu gewinnen. Die Schwermineralfraktionen werden durch Dichtetrennung in Kombination mit Magnetscheidung abgetrennt. Aus den Schwermineralfraktionen wird Zirkon abgetrennt. Dieser wird chemisch durch Laugung oder Schmelzverfahren aufgeschlossen. Aus dem aufgeschlossenen Material werden Seltene Erden-, Hafnium- und Zirkonium-Konzentrate gewonnen. Titanminerale, Granat und Quarzsand fallen als Nebenkomponenten an.

Jährlich werden allein in Mecklenburg-Vorpommern ca. 800.000 t Küstensande gewonnen und zu Baustoffen verarbeitet bzw. zum Küstenschutz (Strandaufspülung) eingesetzt. Die geologischen Vorräte allein im Abbaufeld Markgrafenheide belaufen sich auf ca. 300 Mio. t Küstensande, die als Potenzial zur Zirkonabtrennung zur Verfügung stün-

den. Die Durchschnittsgehalte von Schwermineralen in Ostseesanden schwanken zwischen 0,5 und 0,9 % mit starken Schwankungen insb. an der Oderbucht. Zirkon ist das Hauptwertmineral, die Gewinnung der darin enthaltenen Seltenen Erden ist zwar technisch möglich, aufgrund der geringen Gehalte und niedrigen Weltmarktpreise aber unrealistisch.

3.3.4 Globale Seltenerd-Potenziale außerhalb Chinas

Neben den großen aktiven Bergwerken in Australien, den USA und Russland sowie kleineren Lagerstätten in Südostasien, Burundi und Brasilien (22 % Gesamtanteil an der globalen Seltenerdproduktion) sind rund 30 Seltenerdlagerstätten außerhalb Chinas in einem fortgeschrittenen Explorationsstadium. Diese liegen größtenteils in Australien, Nordamerika und Afrika (Abbildung 9). In Europa sind derzeit, neben großen Potenzialen in Grönland (politisch zu Dänemark gehörend wenn auch geographisch zu Nordamerika), nur die Lagerstätte Norra Kärr in Schweden in einem erfolgsversprechenden Erkundungsstatus. Norra Kärr ist eine peralkaline Lagerstätte, die generell einen relativ hohen Anteil an SSE und ein für die Nachfrage günstiges Verhältnis von Neodym und Dysprosium haben. Allerdings gibt es, wie oben bereits erwähnt, etablierte Aufbereitungsmethoden bisher nur für Monazit, Bastnäsit, Xenotime aus Karbonatit- und Seifenlagerstätten sowie für Ionenadsorptionstone, bei denen durch verhältnismäßig einfacher Laugung bereits ein hochgradiges Seltenerd-Konzentrat erzeugt werden kann. Silikatische Erze, wie das Haupterzmineral Eudialyt von Norra Kärr und mehreren weiteren peralkalinen Lagerstätten, konnten bisher nicht wirtschaftlich aufbereitet werden, stehen aber im Fokus von zahlreichen Forschungsprojekten (Schreiber et al. 2016) und wurden auch in r^4 adressiert. Jährlich könnten in Norra Kärr bei 6.800 t Gesamtseltenerdoxiden neben 950 t Neodym + Praseodym rund 350 t Dysprosium + Terbium produziert werden und somit einen erheblichen Anteil zu der europäischen Versorgungssicherheit liefern (10 % der Weltproduktion; Deutschland importierte 2016 167 t SSE-Gemische und 2,7 t SSE-Metalle). Weitere peralkaline Lagerstätten mit Eudialyt wie Tanbreez in Grönland könnten 1500 t Neodym + Praseodym und 330 t Dysprosium + Terbium (19.250 t Gesamtseltenerdoxide) für den europäischen Markt hinzusteuern (Tabelle 2; Abbildung 10).

Zudem wurde in r^4 exemplarisch die peralkaline Lagerstätte Khalzan Burged in der Mongolei mit dem Hauptwertmineral Allanit untersucht. Aufgrund eines 2011 abgeschlossenen Rohstoffabkommens zwischen Deutschland und der Mongolei ist hier ein guter Zugang garantiert. In dem optimierten Aufbereitungsverfahren wird wertloses Material frühzeitig ausgeschleust, sodass rund 45 Massen% nicht weiter zerkleinert werden müssen. Somit gibt es ein großes Einsparpotenzial an Wasser und Energie. Auch wenn die Lagerstätte in der Mongolei aufgrund einer sehr komplexen Mineralogie und nicht vorhandener Infrastruktur in absehbarer Zukunft nicht in Produktion gehen wird, gibt es ein

Transferpotenzial der Projektergebnisse auf andere peralkaline Lagerstätten, insb. mit Allanit als Hauptwertmineral wie in Kanada (vgl. Tabelle 2).

Abbildung 9: Derzeitige Seltenerd-Produktionsstätten und fortgeschrittene Projekte außerhalb Chinas getrennt nach Lagerstättentyp (verändert nach Langkau und Erdmann 2020).

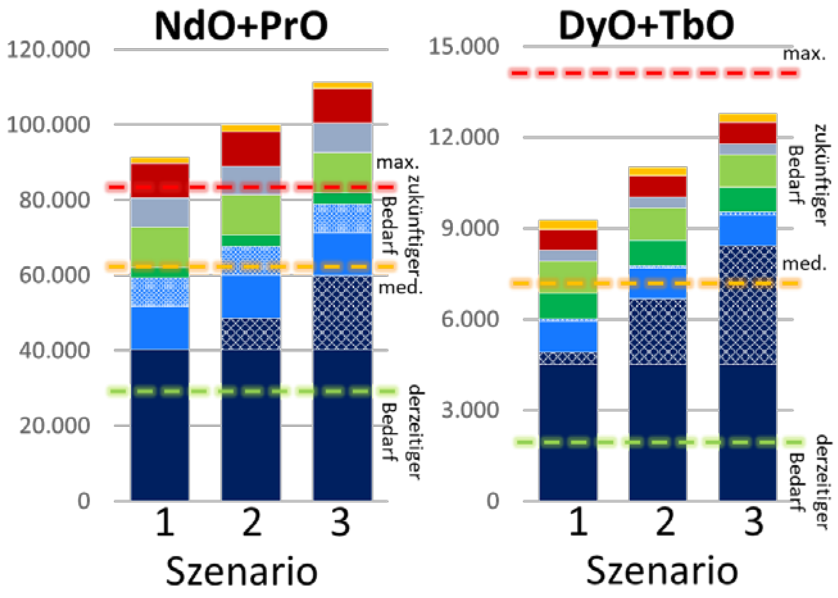


Abbildung 10: Potenzielle Deckung des zukünftigen Bedarfs in 2035 von Neodym (+das assoziierte Praseodym) und Dysprodium (+Terbium) in Abhängigkeit der Bereitstellung von unterschiedlichen Lagerstättentypen (siehe Legende in Abbildung 9). Szenario 1, 2 und 3 bezieht sich auf die unterschiedlichen Annahmen zur künftigen Produktion in China (schraffierter dunkelblauer Balken). Die Schraffur bei der derzeitigen Produktion außerhalb Chinas (hellblauer Balken) bezieht sich auf potenzielle Produktionssteigerungen in diesen Bergwerken.

Die Implementierung einer europäischen Aufbereitungs- und Raffinaderoute durch Primärrohstoffgewinnung von Seltene Erden könnte Synergieeffekte zu einer Wiederaufbereitung von SE-haltigen Sekundärmaterialen hervorrufen. Die europäischen Firmen, mit entsprechendem Knowhow zur Trennung von Seltenerdoxide (Solvay und Silmet) könnten in diesem Zuge ihre Kapazitäten erhöhen bzw. wiederbeleben, was sich auch positiv auf das Recycling auswirken würde. Solvay recycelte bis 2017 zusammen mit Umicore bereits Seltene Erden aus Energiesparlampen, musste die Anlage in La Rochelle aber aus wirtschaftlichen Gründen schließen. Allerdings können insb. die Aufbereitungstechniken stark voneinander abweichen, da Erze und Sekundärrohstoffe eine nicht zu vergleichende Zusammensetzung haben.

Die ebenfalls in r^4 betrachtete Seltenerdlagerstätte Tantalus in Madagaskar ist neben vier weiteren Vorkommen in Kanada und Brasilien eine der wenigen gut erkundeten Ionenadsorptionstonlagerstätten außerhalb Chinas (vgl. Abbildung 9). Ionenadsorptionstone haben verhältnismäßig hohe Anteile an SSE und stellen derzeit weltweit die bedeutendste Quelle für Dysprosium und Co. Der Abbau findet derzeit ausschließlich in China

statt und aufgrund des hohen Wertes der SSE sowie der relativ einfachen Gewinnung über In-situ- oder Haufenlaugung werden 50 - 70 % der Ionenadsorptionstonlagerstätten illegal abgebaut. Da insbesondere der illegale Abbau mit immensen Umweltauswirkungen verbunden ist, versucht die chinesische Regierung diesen über Abbauquoten einzudämmen. Dies könnte zu einer Reduzierung des Angebotes an SSE führen.

Tabelle 2: Fortgeschrittene Seltenerd-Projekte in peralkalinen Lagerstätten

Lagerstätte	Land	Haupt-SE-Mineral	TREO (tpa)	NdO+PrO (tpa)	DyO+TbO (tpa)
Norra Kärr	SWE	Eudialyt	6.800	946	349
Dubbo Zirconia	AUS	Eudialyt	6.000	893	116
Kringlerne/ TANBREEZ	GRL	Eudialyt	9.750	1.506	328
Kipawa/Zeus	CAN	Eudialyt	3.500	589	141
		Summe	***26.050***	***3.934***	***934***
Nechalacho/ Thor Lake	CAN	Allanit	9.286	2.109	286
Strange Lake	CAN	Allanit	9.021	1.445	361
Hoidas Lake	CAN	Allanit	4.000	1.061	18
Kvanefjeld	GRL	Steenstrupine	32.000	5.680	315
Bokan Mountain	USA	Bastnäsit	1.828	313	88
		Gesamt-summe	***82.185***	***14.542***	***2.002***

Für die bereits gut explorierte Lagerstätte Tantalus in Madagaskar wurde ein alternatives Laugungs- und Aufbereitungsverfahren entwickelt. Dieses sieht vor, dass die für die In-situ-Laugung notwendige Anzahl der Bohrungen dadurch reduziert wird, dass die Tonschicht (die ungünstiger Weise im Vergleich zu China sehr kompakt ist) über pneumatisches Fracturing gelockert wird. Die Menge der dann für die Mobilisierung der Seltenerdelemente nötige Laugungslösung könnte dadurch reduziert bzw. das Ausbringen erhöht werden. Das verfolgte Ziel, das derzeit gängige Ammoniumsulfat mit einem umweltfreundlicheren Biolaugungsverfahren abzulösen, hat nicht den erwünschten Erfolg gebracht. Für die anschließend folgende Extraktion und Separation der Seltenerdelementen aus der Laugungslösung wurde ein kombinierter chemisch-biologischer Pfad erfolgreich im Labormaßstab getestet. Da eine Hochskalierung auf einen industriellen Maßstab, insbesondere bei der In-situ-Laugung, nicht vorgenommen werden konnte (die Bedingungen in der Lagerstätte sind grundlegend anders als in den Säulenversuchen), kann keine Aussage zu einer industriellen Umsetzung getroffen werden. Zum einen ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens derzeit nicht gegeben (insb. bei den derzeit relativ niedrigen Seltenerdpreisen), zum anderen spricht die nachteilige Lagerstättenbeschaf-

fenheit im Vergleich zu chinesischen Ionenadsorptionstonen gegen einen Abbau. Darüber hinaus würde eine Gewinnung in Madagaskar das Seltenerdangebot zwar minimal diversifizieren, ob es dadurch allerdings zu einer Steigerung der Versorgungssicherheit in Deutschland kommt, ist fraglich, zumal sich chinesische Investoren den Zugriff auf die Lagerstätte bereits gesichert haben (siehe auch Hemmnisse). Die potenzielle jährliche Gewinnung von rund 205 t Neodym + Praseodym und 24 t Dysprosium ist zudem deutlich geringer als z. B. in Norra Kärr (vgl. Tabelle 2).

3.3.5 Hemmnisse

Ein verantwortungsvolles Management radioaktiver Reststoffe ist für den Aufbau eines neuen Seltenerd-Projektes eine große Herausforderung. Der Anteil an Uran und Thorium in peralkalinen Lagerstätten und in Ionenadsorptionstonen ist zwar relativ gering bzw. gleich Null, Karbonatite und insb. Schwermineralsande mit dem Seltenerd-Mineral Monazit weisen aber einen hohen Anteil an radioaktiven Begleitstoffen auf.

Für neue Projekte ist es generell schwer in Produktion zu gehen, da die Investitionskosten insbesondere für die Aufbereitungs- und Weiterverarbeitungsanlagen sehr hoch sind. Dies gilt auch für die peralkalinen Lagerstätten mit silikatischen Seltenerderzen in Kanada (Strange Lake, Nechalacho) und Australien (Dubbo Zirkonia) mit über 1 Mrd. US$ Kapitalbedarf. Ähnliche Investitionen sind für Norra Kärr in Schweden zu erwarten, wobei hier keine konkreten Zahlen vorliegen. Schwierig für die Finanzierung von neuen Projekten ist die lange statische Reichweite von Seltenen Erden (Dauer, bis die bekannten, wirtschaftlich gewinnbaren Ressourcen bei einer konstanten Produktion ausgebeutet sind), die bei über 150 Jahren liegt (im Vergleich: Zinn = 6 Jahre). Die Kritikalität ergibt sich hauptsächlich aus der Produktionskonzentration auf China. Um diese Vormachtstellung zu festigen, steigt China zudem (direkt oder indirekt) in viele mehr oder weniger erfolgsversprechende Seltenerd-Projekte weltweit ein, um sich den Zugriff auf die Seltenerdkonzentrate zu sichern, so z. B. auch in der oben erwähnten Lagerstätten Tantalus, Madagaskar. Die Konzentrate oder verhütteten Seltenerdgemische (z.B. aus Malaysia, das die Konzentrate aus Mt. Weld (Australien) verhüttet) können derzeit ausschließlich in Baotou in China zu Metallen raffiniert werden. Das Hauptziel, das China verfolgt, ist die Vorwärtsintegration der Seltenerdproduktion, indem nicht direkt die Metalle exportiert werden, sondern höherwertige Produkte wie Magnete, um die Wertschöpfung im eigenen Land zu halten. Der immense Wissensvorsprung in der Produktion von Seltenerdmetallen kann nur schwer durchbrochen werden und bedarf intensiver Forschung.

4 Beiträge der Sekundärrohstoffverbünde zur Versorgungssicherheit

Von den 21 Verbünden der ersten und zweiten Tranche, die sich mit Sekundärrohstoffen beschäftigen, haben zum jetzigen Zeitpunkt 15 Ergebnisse in Form von Stoffflüssen gemeldet. Nach Rohstoffen sortiert werden die größten Beiträge zur Versorgungssicherheit im Folgenden quantifiziert und diskutiert.

4.1 Antimon

Antimon gehört zu den von der EU bezüglich ihrer Versorgungslage als kritisch eingeschätzten Rohstoffe (Europäische Kommission 2017). Und auch in der DERA Rohstoffliste für Deutschland wird Antimon wegen einer hohen Länderkonzentration und einem mittleren gewichteten Länderrisiko in Bergwerksförderung und Handel von Primärmaterial sowie Antimon-haltigen Abfällen in der Risikogruppe 3 aufgeführt. Antimon gehört dabei in die Gruppe von Metallen, deren Angebot sehr stark durch den chinesischen Staat dominiert und durch Exportrestriktionen kontrolliert wird (DERA 2016, 2019). Zudem hat es bislang eine EoL-Recyclingrate von unter 5 %, wodurch es ein hohes Potential an bisher ungenutzten Ansatzpunkten für Recyclingverfahren bietet (CUTEC 2018).

Im Rahmen von r^4 wurde ein bestehendes Verfahren zum Recycling von Kunststoffen aus Elektroaltgeräten um eine Prozessstufe erweitert, sodass neben den reinen Polymeren auch das als Flammschutz verwendete Antimontrioxid zurückgewonnen wird (vgl. Abbildung 11). Bisher ist keine weitere Recyclingtechnologie vorhanden, die Antimontrioxid aus Kunststoffen wieder extrahieren und somit für andere Anwendungen verfügbar machen könnte (CUTEC 2018). Das geschätzte jährliche Aufkommen solcher flammgeschützten Kunststoffe in Deutschland liegt bei 100.000 Tonnen. Bei einem Antimontrioxidgehalt von 2-4 % ergibt sich ein theoretisches Potential von 2000-4000 Tonnen (Seelig und Hochstädt 2017). Davon könnten durch das erweiterte Verfahrenden 900 Tonnen Antimontrioxid jedes Jahr wiedergewonnen werden (Verbundangaben an r^4-INTRA).

Der jährliche Bedarf Deutschlands an Antimontrioxid lag 2017 bei etwa 6.000 Tonnen. Durch eine deutschlandweite Anwendung des erweiterten Prozesses könnten daher knapp 16% des deutschen Bedarfes an Antimontrioxid aus Elektroaltgeräten als Sekundärquelle gedeckt werden (BGR 2018).

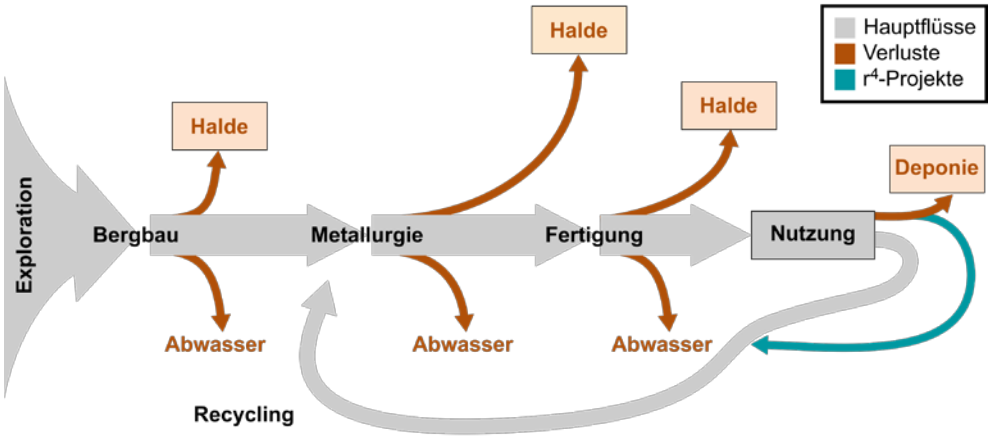


Abbildung 11: Verortung der Beiträge von Verbundprojekten mit quantitativen Angaben zu Antimon im anthropogenen Stoffkreislauf.

4.2 Baryt

Das Industriemineral Baryt wird von der EU derzeit als kritischer Rohstoff eingestuft (Europäische Kommission 2017). In der DERA Rohstoffliste für Deutschland wird die Bergwerksförderung von Baryt mit mittlerer Länderkonzentration und mittlerem gewichteten Länderrisiko in Risikogruppe 2 geführt. Der Handel mit Baryt ist dagegen stark von China dominiert und wird daher mit hoher Länderkonzentration und mittlerem gewichteten Länderrisiko in der hohen Risikogruppe 3 aufgelistet (DERA 2019). Recycling von Baryt findet derzeit kaum statt. Lediglich ein kleiner Anteil des für Ölbohrungsprojekte eingesetzten Baryts wird wiedergewonnen (Europäische Kommission 2017).

Im Rahmen von r^4 wurde ein Verfahren für die Aufarbeitung alter Tailings aus dem Bergwerk Rammelsberg entwickelt (vgl. Abbildung 12). Diese lagern derzeit ungenutzt in einem Bergeteich und enthalten wirtschaftsstrategische Rohstoffe wie Kupfer, Zink und Kobalt sowie Baryt. Die Menge an abgelagertem Material wird auf etwa 7,1 Millionen Tonnen geschätzt. Bei einer jährlichen Aufarbeitung von 500.000 Tonnen, wäre der Bergeteich nach etwas mehr als 14 Jahren komplett abgebaut. Innerhalb dieses Zeitraums könnten pro Jahr 69.000 Tonnen Baryt gewonnen werden (Verbundangaben an r^4-INTRA).

Der Bedarf Deutschlands an Baryt lag 2016 bei 160.000 Tonnen (Kuhn 2017). Durch das neue Verfahren könnten daher etwa 43% des deutschen Bedarfs über einen Zeitraum von 14 Jahren gedeckt werden. Deutschland war mit knapp 88.000 Tonnen 2014 noch der größte Produzent von Baryt in der Europäischen Union (BGS 2019). Durch eine Steigerung der deutschen Produktion in den Jahren zuvor erreichte die EU 2014 eine ausgeglichene Handelsbilanz für Baryt (Europäische Kommission 2017). Seither ist die

deutsche Fördermenge jedoch wieder stark gesunken während Bulgarien die Produktion gleichzeitig stark erhöhte (BGS 2019). Die Produktion in Deutschland lag 2017 noch bei 34.000 Tonnen (BGS 2019; BGR 2018). Durch das innerhalb der Fördermaßnahme r⁴ entwickelte Verfahren könnte die deutsche Produktion von Baryt verdreifacht werden und Deutschland wieder zum größten Produzenten der EU werden.

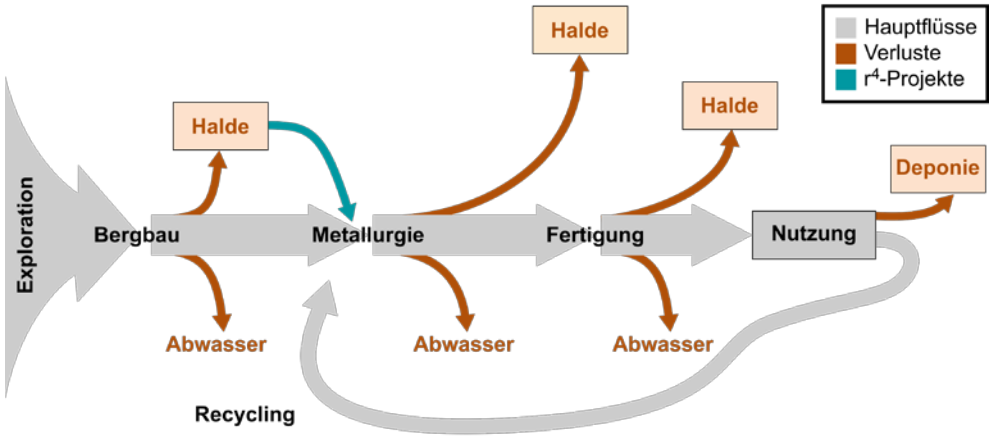


Abbildung 12: Verortung der Beiträge von Verbundprojekten mit quantitativen Angaben zu Baryt im anthropogenen Stoffkreislauf.

4.3 Bismut

Bismut wird sowohl von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft als auch in der DERA Rohstoffliste für Deutschland mit einer hohen Länderkonzentration und mittlerem gewichtetem Länderrisiko in der hohen Risikogruppe 3 geführt (DERA 2019; Europäische Kommission 2017). Bismut gehört dabei zu den Rohstoffen, deren Produktion und Handel stark durch den chinesischen Staat dominiert und kontrolliert werden. Deutschland auf der anderen Seite gehört zu den größten Importeuren von Bismut und seinen Produkten (DERA 2019; Elsner 2015). Das Recycling von Bismut ist nicht etabliert. Die weltweite EoL-Recyclingrate für Bismut liegt unter 1% (UNEP 2011). Daten für Europa oder Deutschland sind nicht verfügbar.

Im Rahmen von r⁴ wurde die Gewinnung von Bismut aus Blei-Bismut-Schäumen, die als Nebenprodukt in der Herstellung von primärem Blei anfallen, untersucht (vgl. Abbildung 13). Die zwei bisher eingesetzten Verfahren sind aus ökologischen und ökonomischen Gründen nicht zukunftsträchtig. Durch die Arbeiten innerhalb von r⁴ liegt nun ein alternatives Verfahren bestehend aus Schmelzzentrifugation, ultraselektiver Oxidation und fraktionierter Kristallisation vor. Eingesetzt werden soll das neue Verfahren lediglich in der am Projekt beteiligten Berzelius Bleihütte. Diese hat eine Jahresproduktion von

120.000 Tonnen Blei, wodurch nun auch 480 Tonnen Bismut gewonnen werden könnten (Verbundangaben an r⁴-INTRA).

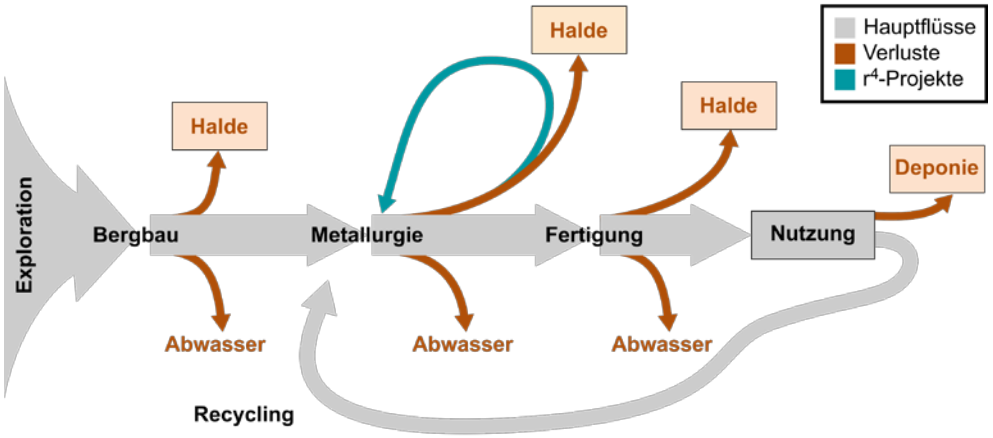


Abbildung 13: Verortung der Beiträge von Verbundprojekten mit quantitativen Angaben zu Bismut im anthropogenen Stoffkreislauf.

Der deutsche Bedarf an Bismut lag 2017 bei 1.900 Tonnen (BGR 2018). Eine Raffination von Bismut hat in den letzten Jahren in Deutschland nicht mehr stattgefunden (Elsner 2015). Durch das neue Verfahren könnten jedoch 25% des deutschen Bedarfs wieder durch Produktion in Deutschland gedeckt werden und die Versorgungssicherheit Deutschlands deutlich verbessert werden.

4.4 Graphit

Natürliches Graphit gehört zu den Rohstoffen, die von der EU als kritisch eingeschätzt werden (Europäische Kommission 2017). Und auch in der DERA Rohstoffliste für Deutschland wird Graphit in Risikogruppe 3 mit einer hohen Länderkonzentration und mittlerem gewichteten Länderrisiko für Bergwerksförderung, für natürlichen Graphit in Flocken- und Pulverform sowie für künstlichen Graphit und sogar mit hoher Länderkonzentration und hohem gewichteten Länderrisiko für natürliches Graphit nicht in Flocken- oder Pulverform geführt (DERA 2019). Recycling von Graphit aus EoL-Produkten findet bisher kaum statt, da es durch den niedrigen Preis und das Überangebot an Primärmaterial größtenteils verhindert wird (Europäische Kommission 2017).

Im Rahmen von r⁴ wurde ein Verfahren entwickelt, um durch mechanische Aufarbeitung und Pyrolyse mittels Mikrowellenstrahlung Kohlefaserabfälle als Sekundärgraphit wieder nutzbar zu machen (vgl. Abbildung 14). Der Stoffstrom von EoL-Kohlefaserabfällen in Deutschland wird für das Jahr 2020 auf 21.080 Tonnen geschätzt (Seelig und Hochstädt

2017). Daraus ergibt sich für Deutschland ein Potential von 9.200 Tonnen Sekundärgraphit aus dem neuen Verfahren pro Jahr (Verbundangaben an r⁴-INTRA).

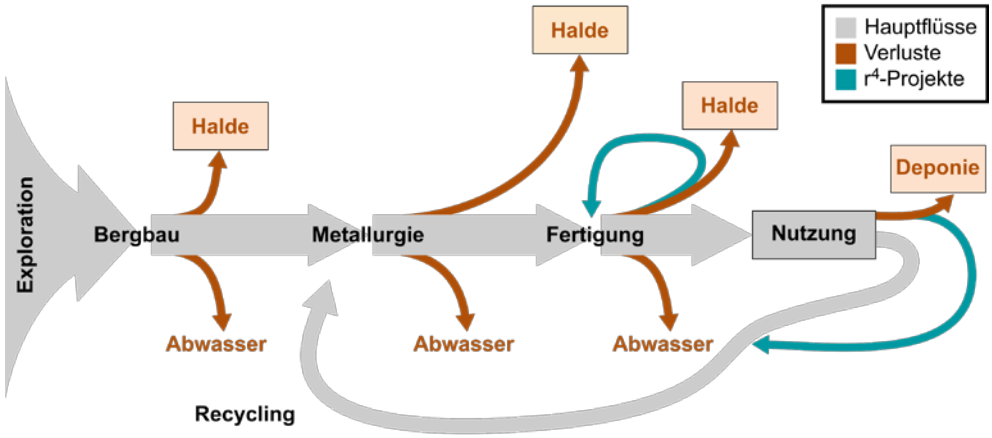


Abbildung 14: Verortung der Beiträge von Verbundprojekten mit quantitativen Angaben zu Graphit im anthropogenen Stoffkreislauf.

2017 lag der deutsche Bedarf an Graphit bei etwa 89.000 Tonnen (BGR 2018). Bei einer Anwendung des neuen Verfahrens auf die gesamte Menge an in Deutschland anfallenden EoL-Kohlefaserabfällen könnten etwa 10 % des deutschen Graphitbedarfs aus dieser Sekundärquelle gedeckt werden (Annahme: ausreichende Qualität des Rezyklats). Allerdings muss beachtet werden, dass sich nicht jede Graphitqualität für jede Anwendung eignet. Das neu entwickelte Verfahren wurde auf eine zukünftige Anwendung des erhaltenen Sekundärgraphits in Bipolarplatten für Batterien und Brennstoffzellen hin optimiert. Bei beiden handelt es sich um Graphitanwendungen in sogenannten Zukunftstechnologien, für die in den nächsten Jahren eine stark steigende Rohstoffnachfrage erwartet wird (Marscheider-Weidemann et al. 2016).

4.5 Lanthan

Lanthan gehört zu den leichten Seltenen Erden und wird von der EU derzeit als kritischer Rohstoff eingeschätzt (Europäische Kommission 2017). In der DERA Rohstoffsituation für Deutschland wird nicht zwischen verschiedenen Seltenen Erden Elementen unterschieden. Auf Grund einer hohen Länderkonzentration und einem mittleren gewichteten Länderrisiko von Bergwerksförderung über Raffinadeproduktion und Handel bis hin zu den chemischen Verbindungen werden Seltene Erden in der hohen Risikogruppe 3 aufgelistet (DERA 2019). Die weltweite Recyclingrate von Lanthan liegt lediglich bei 1 % (Europäische Kommission 2017).

In r⁴ wurde die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus den Prozessabwässern der Katalysatorherstellung für das Erdöl-Cracking untersucht (vgl. Abbildung 15). Die Menge

an in Deutschland anfallenden Abwässern wird dabei auf 250.000 Tonnen pro Jahr geschätzt. Bei einem Lanthangehalt von 0,05-0,1% ergibt sich ein theoretisches Potential von 125-250 Tonnen Lanthan pro Jahr (Seelig und Hochstädt 2017). Hieraus könnten durch das entwickelte Verfahren jährlich 125 Tonnen Lanthan wiedergewonnen werden (Verbundangaben an r⁴-INTRA).

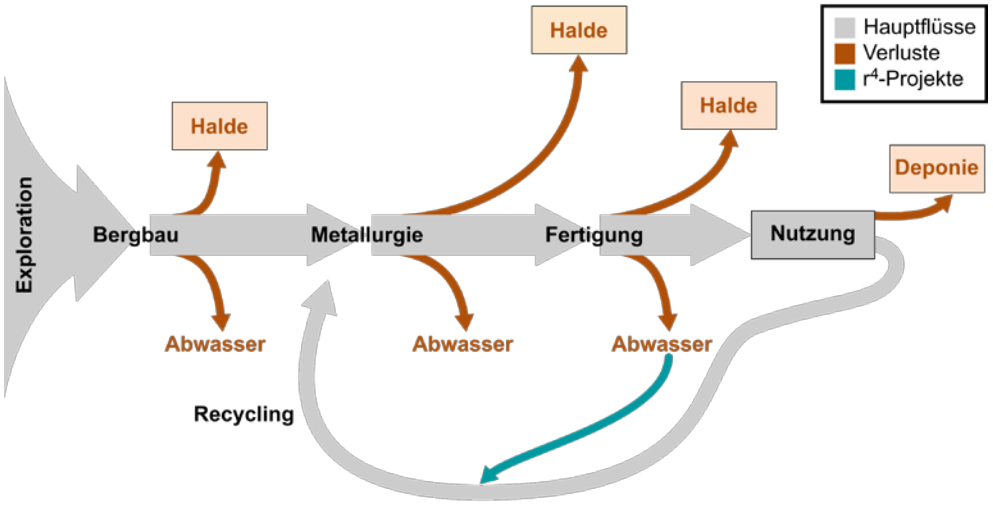


Abbildung 15: Verortung der Beiträge von Verbundprojekten mit quantitativen Angaben zu Lanthan im anthropogenen Stoffkreislauf.

Daten zum jährlichen deutschen Lanthanverbrauch standen nicht zur Verfügung. Der europäische Bedarf an Lanthan wird jedoch auf etwa 3.700 Tonnen geschätzt (Durchschnitt 2010-2014; Europäische Kommission 2017). Da Lanthan fast ausschließlich als Katalysator beim Cracking von Erdöl zum Einsatz kommt, lässt sich über die Verteilung der Raffineriekapazitäten in Europa ein Wert für den deutschen Lanthanbedarf abschätzen. Bei einem deutschen Anteil von knapp 14% der europäischen Erdölraffination ergibt sich ein jährlicher Bedarf an Lanthan von etwa 500 Tonnen in Deutschland (Petroleum & Biofuels Association - Finland 2015; Mineralöl Wirtschaftsverband e.V. 2018). Bei einer deutschlandweiten Verbreitung des neuen Verfahrens könnten demnach etwa 25% des deutschen Lanthanbedarfs aus dieser Sekundärquelle gedeckt werden.

4.6 Silber

Silber gehört nicht zu den Metallen, die von der EU als kritisch eingestuft werden (European Commission 2017b). Und auch in der DERA Rohstoffliste für Deutschland wird die Bergwerksförderung von Silber mit einer geringen Länderkonzentration und mittlerem gewichteten Länderrisiko nur in Risikogruppe 1 geführt (DERA 2019). Die Recyclingraten schwanken sehr stark je nach Anwendung und dafür etablierter Sammelstruktur und

liegen für Schmuck beispielsweise bei 90 %, bei industriellen Anwendungen jedoch lediglich zwischen 20-50 % (CUTEC 2018).

In r⁴ wurde ein Recyclingverfahren für Sauerstoffverzehrkathoden sowie ein biotechnologisches Verfahren zur Extraktion von Metallen aus Reststoffen der Kupferverhüttung, die derzeit ungenutzt in Halden liegen, entwickelt (vgl. Abbildung 16). Besonders vielversprechend zeigte sich das Recycling von Sauerstoffverzehrkathoden. Dabei Diese enthalten große Mengen Silber und werden als neuartige Technologie in der Chlor-Alkali-Elektrolyse eingesetzt. Bei einem angenommenen Marktanteil der Sauerstoffverzehrkathoden von 10% in den nächsten 5-10 Jahren würde der derzeitige deutsche Bedarf an Silber von 3.500 Tonnen 2017 signifikant um etwa 350 Tonnen pro Jahr steigen (BGR 2018; Seelig und Hochstädt 2017). Steht mit dem Anfallen der ersten Altelektroden noch kein geeignetes Recyclingverfahren zur Verfügung, ist auf Grund des hohen Materialwerts von einer Einlagerung bis zur Entwicklung eines Verfahrens auszugehen (CUTEC 2018). Die für die neue Technologie der Sauerstoffverzehrkathoden zusätzlich benötigte Menge an Silber könnte durch das entwickelte Verfahren stattdessen jedoch direkt rezykliert werden (Verbundangaben an r⁴-INTRA). Trotz steigendem Silberbedarf wäre die Lage Deutschlands aus Sicht der Versorgungssicherheit daher unverändert.

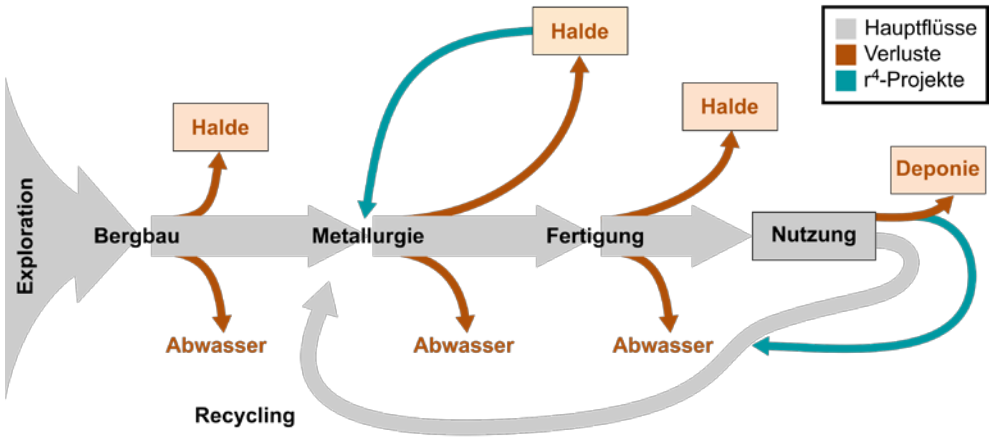


Abbildung 16: Verortung der Beiträge von Verbundprojekten mit quantitativen Angaben zu Silber im anthropogenen Stoffkreislauf.

4.7 Vanadium

Die EU stuft Vanadium im Moment als kritisch bezüglich seiner Verfügbarkeit ein (Europäische Kommission 2017). Auch in der DERA Rohstoffliste für Deutschland wird Bergwerksförderung sowie Handel mit Oxiden und Hydroxiden von Vanadium wegen hoher Länderkonzentration und mittlerem gewichteten Länderrisiko in der hohen Risikogruppe 3 gelistet (DERA 2019). Vanadium wird zu einem großen Teil in Stahllegierungen

eingesetzt. Diese können wieder eingeschmolzen werden, wodurch auch das Vanadium dem Stoffkreislauf erhalten bleibt. Die Sortierung verschiedener Stahllegierungen entscheidet hierbei über die Qualität des wiedergewonnenen Materials. Recyclingverfahren bestehen auch für Vanadium-haltige Katalysatoren. Dennoch wird die EoL-Recyclingrate von Vanadium als niedrig eingeschätzt (CUTEC 2018; Europäische Kommission 2017; UNEP 2011).

In r^4 wurde ein Verfahren entwickelt, um aus Vanadium-haltigen Abwässern der Pigmentindustrie eine Elektrolytlösung für Vanadium-Redox-Flow-Batterien herzustellen (vgl. Abbildung 17). Diese Batterien sind derzeit noch als Zukunftstechnologie anzusehen, deren Verbreitung noch nicht sicher prognostiziert werden kann. Setzt sich die Technologie nicht durch, wird auch das entwickelte Recyclingverfahren zur Herstellung der benötigten Elektrolytlösung keine Verbreitung finden. Der eingesetzte Abwasserstrom wird auf etwa 200.000 Tonnen pro Jahr beziffert. Daraus könnten 400 Tonnen Vanadium in Form der Elektrolytlösung (entspricht ungefähr 740.000 Litern) gewonnen werden (Verbundangaben an r^4-INTRA).

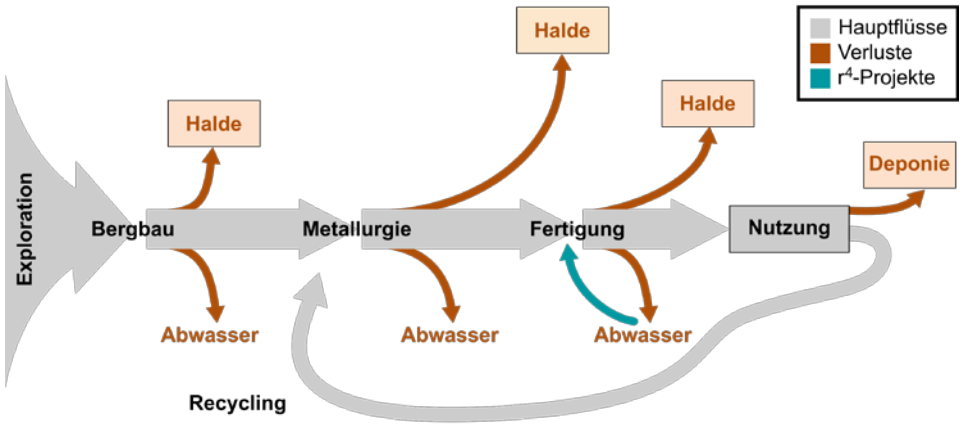


Abbildung 17: Verortung der Beiträge von Verbundprojekten mit quantitativen Angaben zu Vanadium im anthropogenen Stoffkreislauf.

Explizite Zahlen zum deutschen Vanadium Verbrauch sind nicht verfügbar. Die Handelsbilanz für Ferrovanadium lag 2017 jedoch bei 4500 Tonnen (BGR 2018). Der Vanadiumgehalt liegt generell zwischen 35-85%, meist um die 80% (Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry 2010). Mit einer Annahme von 75% für den durchschnittlichen Vanadiumgehalt von Ferrovanadium ergibt sich ein geschätzter Bedarf von 3400 Tonnen Vanadium für 2017 in Deutschland. Die Gewinnung von jährlich 400 Tonnen zusätzlichem Vanadium (in Form von Elektrolytlösung) durch das neue-Verfahren entspricht einem Anteil von 12% des derzeitigen Verbrauchs. Allerdings ist von einem deutlichen Anstieg des Vanadiumverbrauchs in Deutschland auszugehen, wenn sich Vanadium-Redox-Flow-Batterien in Zukunft verbreiten sollten (Marscheider-Weidemann et al.

2016). Das innerhalb der Fördermaßnahme r^4 entwickelte Verfahren würde dazu beitragen die negativen Auswirkungen der neuen Technologie auf die Versorgungssicherheit mit Vanadium zu minimieren.

4.8 Zusammenfassung Sekundärrohstoffprojekte

Insgesamt wurden belastbare Ergebnisse für 20 Rohstoffe in zwölf Sekundärrohstoffprojekten zusammengefasst. Die größten Beiträge zur Versorgungssicherheit wurden für Antimon, Baryt, Bismut, Graphit, Lanthan, Silber und Vanadium geleistet.

Die Beiträge der Verbundprojekte ergeben sich aus der Kombination der mengenmäßigen Bedeutung des behandelten Stoffstroms im Vergleich zum Gesamtbedarf der deutschen Wirtschaft sowie dem technischen Erfolg der r^4-Entwicklungen. Im Falle der betrachteten Projekte erscheint die Wahl des Zielstoffstroms entscheidend, da so die r^4-Entwicklungen eine größere potenzielle Auswirkung auf die zukünftige Rohstoffversorgungssituation Deutschlands haben. Beispielsweise ist die Anwendung von Antimontrioxid in Kunststoffen (Flammschutzmittel) für über 40% der Gesamtnachfrage nach Antimon verantwortlich. Dementsprechend groß ist der resultierende Abfallstrom und konsequenterweise der potenzielle Beitrag bei breiter Anwendung der in r^4 hierfür entwickelten Technologie. Im Gegensatz hierzu ist die Gewinnung von Basismetalle wie Blei, Kupfer und Zink aus Müllverbrennungsaschen mengenmäßig weniger vielversprechend im Vergleich zur Nachfrage. Dies ergibt sich aus der gut entwickelten Recyclinginfrastruktur für Blei, Kupfer und Zink aus deren Hauptanwendungen so dass deren Vorkommen im Hausmüll (und Müllverbrennungsaschen) aus Fehlwürfen bei der Mülltrennung ergibt und insgesamt vergleichsweise gering ausfällt. Dementsprechend gering ist der potenzielle Beitrag zur Sicherheit der Versorgung mit Blei, Kupfer und Zink aus diesem Stoffstrom. Dies ist jedoch keine Aussage über den technischen Erfolg der Entwicklungen noch über die Sinnhaftigkeit oder Erfolgsaussichten einer breiten Anwendung der Technologie. Letztere ergibt sich aus der Kombination der verschiedenen Betrachtungsweisen (technologisch, ökonomisch, ökologisch).

Diese mehrdimensionale Betrachtungsweise ergibt sich aus der Kombination der Ergebnisse der verschiedenen Teilaspekte der r^4-INTRA Begleitforschung. Neben der hier vorgestellten Bewertung der Projekte aufgrund ihres potentiellen Beitrags zur sicheren Versorgung Deutschlands mit Rohstoffen, wurden die Verbundprojekte auf ihre ökologischen und sozioökonomischen Effekte hin untersucht (Abbildung 18) (Marscheider-Weidemann et al. 2020).

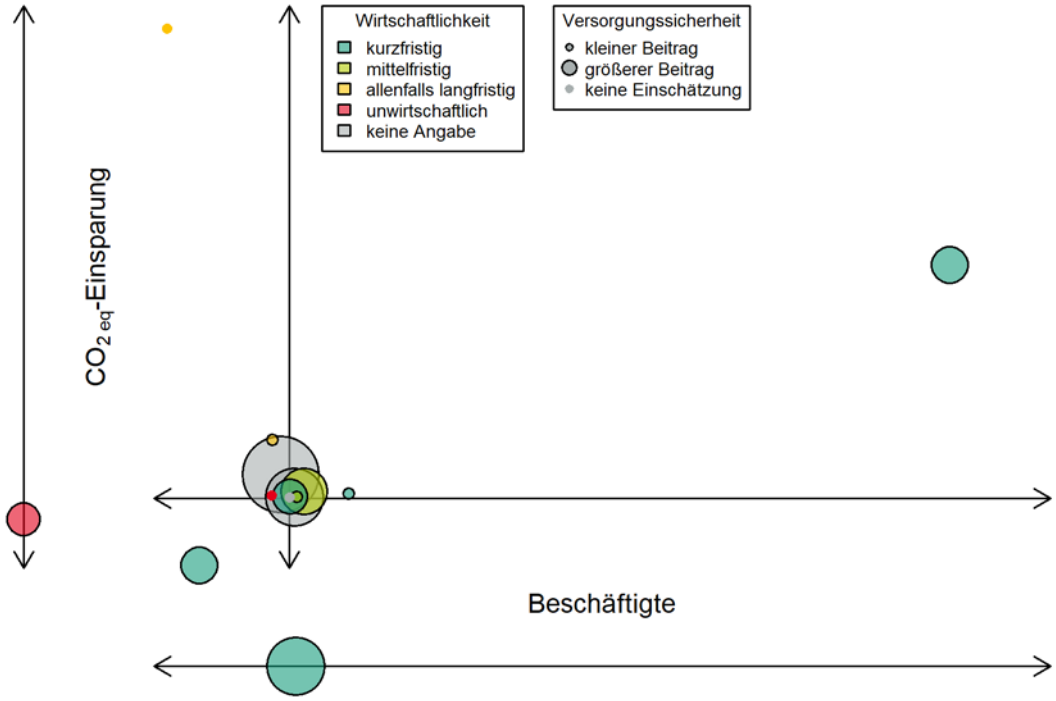


Abbildung 18: Zusammenführung der potentiellen Beiträge der Sekundärrohstoffprojekte zur Versorgungssicherheit mit den weiteren sozioökonomischen (Wirtschaftlichkeit der Technologie, Beschäftigungseffekte auf Deutschland) und ökologischen (Treibhausgaseinsparungen in CO_2-Äquivalenten) Bewertungskategorien der r⁴-INTRA Begleitforschung (Marscheider-Weidemann et al. 2020). Nicht alle Verbundprojekte stellten ausreichend Daten zur Verfügung, um eine Auswertung in allen Bewertungsdimensionen zu ermöglichen. Fehlende Daten zur Wirtschaftlichkeit bzw. Versorgungssicherheit werden in den Kreisen selbst dargestellt. Bei fehlenden Angaben zu Beschäftigten bzw. CO_{2eq}-Einsparung werden die Projekte auf gesonderte Achsen dargestellt.

Es zeigt sich, dass ein Großteil der entwickelten Technologien auch bei deutschlandweiter Verbreitung nur sehr geringe Potentiale für eine Einsparung an Treibhausgasen oder auf die Beschäftigung in Deutschland erzielen konnten. Lediglich ein Projekt hat das Potential zu deutlichen Einsparungen an Treibhausgasen und relevanten positiven Effekten auf die Beschäftigung. Zudem wäre die Umsetzung wirtschaftlich und würde zu einem größeren Beitrag zur Versorgungssicherheit führen. Unter den Projekten, deren Umsetzung voraussichtlich wirtschaftlich ist und einen größeren positiven Beitrag zur Versorgungssicherheit versprechen gibt es auch eines mit negativen Beschäftigungseffekte sowie Mehrausstoß von CO_{2eq}. In diesem Fall stehen Gesamtwirtschaft und Öko-

logie in Konflikt mit einer erhöhten Versorgungssicherheit. Bei allen anderen voraussichtlich wirtschaftlichen Projekten fallen die ökologische und ökonomische Effekte zwar klein, jedoch nicht negativ aus. Es ist auch anzumerken, dass nur eines der Projekte mit relevantem Beitrag zur Versorgungssicherheit unwirtschaftlich ist. Zwei weitere Projekte konnten bzgl. der Wirtschaftlichkeit nicht eingeschätzt werden, liefern jedoch potenziell größere Beiträge zur Versorgungssicherheit.

5 Herausragende Beiträge

Aus der Gesamtschau der r⁴-Projekte ergeben sich einige "Highlights" aus Sicht der Versorgungssicherheit. Diese strecken sich über den gesamten Rohstoffkreislauf und betreffen unterschiedliche Metalle und Mineralien, darunter viele kritische Rohstoffe für die EU (CRM). Zu nennen sind:

- für alle Rohstoffe:

  Mit der Exploration des tiefen Untergrundes verdoppelt sich im Vergleich zur Oberfläche die Wahrscheinlichkeit eine neue, von der Oberfläche nicht bekannte, Lagerstätte anzutreffen.

  Innovative Explorationskriterien erhöhen die theoretische Erfolgsaussichten für das Auffinden einer bauwürdigen Lagerstätte um das 5-10 fache.

- Antimon (CRM und DERA-Rohstoffliste): Antimontrioxid aus flammgeschützen Kunststoffen in Elektroaltgeräten könnte ca. 15% des deutschen Bedarfes decken.
- Baryt (CRM und DERA-Rohstoffliste): Ein Bergeteich im Harz könnte mehr als 10 Jahre über 40% des in Deutschland benötigten Baryts liefern und DE wieder zum größten EU-Produzenten machen.
- Bismut (CRM und DERA-Rohstoffliste) gewonnen als Nebenprodukt der Bleimetallurgie könnte bis zu 25% des deutschen Bedarfes decken. DE ist einer der größten Bi-Importeure weltweit.
- Gallium (CRM und DERA-Rohstoffliste): Abfälle und Abwässer aus der Halbleiterproduktion könnten die Quelle für fast 10% des deutschen Galliumbedarfes werden.
- Germanium (CRM und DERA-Rohstoffliste) und Rhenium aus gelagerten Reststoffen der Kupfermetallurgie könnten 10 Jahre lang über 5% des deutschen Bedarfes decken.
- Graphit (CRM und DERA-Rohstoffliste) für Batterien und Brennstoffzellen aus Kohlefaserabfällen könnte die Verbreitung dieser Zukunftstechnologien unterstützen.
- Lanthan (CRM und DERA-Rohstoffliste) aus Abwässer der Katalysatorherstellung für die Petrochemie könnten 25% des deutschen Lanthanbedarfes decken.
- Silber aus bisher nicht-recycelbaren Sauerstoffverzehrkathoden aus der chemischen Industrie kann nun effizient zurückgewonnen werden.
- Vanadium (CRM und DERA-Rohstoffliste): Gewinnung von Elektrolytlösung für Redox-Flow-Batterien aus Abwässer der Pigmentindustrie. Dadurch wären über 10% des deutschen Vanadiumbedarfs abdeckbar.
- Zinn (DERA-Rohstoffliste) und Indium (CRM und DERA-Rohstoffliste): Eine Skarnlagerstätte im Erzgebirge könnte über 30 Jahre 8% des Zinnbedarfs und 15% des Indiumbedarfs in DE decken.

Quellen

BGR (2018): Deutschland - Rohstoffsituation 2017. Unter Mitarbeit von Harald Andruleit, Harald Elsner, Torsten Graupner, Doris Homberg-Heumann, Dieter Huy, Martin Pein et al. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2017.html, zuletzt geprüft am 22.01.2019.

BGR (2019): Fachinformationssystem Rohstoffe. Unveröffentlicht; Stand 31.08.2019. Hannover.

BGS (2019): World Mineral Production 2013-2017. Unter Mitarbeit von T. J. Brown, N. E. Idoine, E. R. Raycraft, S. F. Hobbs, R. A. Shaw, P. Everett et al. British Geological Survey. Keyworth, Nottingham.

BMBF (2013): Bekanntmachung des Bundesministeriums von Richtlinien zur Fördermaßnahme „r4 – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe“ für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-870.html.

BMWi (2010): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/rohstoffstrategie-der-bundesregierung, zuletzt geprüft am 30.01.2013.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.) (2012): Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. Forschungs- und Entwicklungsprogramm des BMBF für neue Rohstofftechnologien. Bonn. Online verfügbar unter https://www.fona.de/medien/pdf/Wirtschaftsstrategische_Rohstoffe_barrierefrei_neu.pdf, zuletzt geprüft am 31.07.2019.

CUTEC (2018): Status quo der Recyclingverfahren in r4-Projekten behandelter Elemente. Clausthal.

DERA (2014): Zinn. Angebot und Nachfrage bis 2020. Unter Mitarbeit von Harald Elsner. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (DERA Rohstoffinformationen, 20).

DERA (2016): DERA-Rohstoffliste 2016. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten -potenzielle Preis und Lieferrisiken. Unter Mitarbeit von Torsten Brandenburg, Peter Buchholz, Ulrike Dorner, Dieter Huy, Maren Liedtke, Michael Schmidt und Henrike Sievers. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin (DERA Rohstoffinformationen, 32).

DERA (2019): DERA-Rohstoffliste 2019. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten - potenzielle Preis- und Lieferrisiken. Unter Mitarbeit von Dennis Bastian, Torsten Brandenburg, Peter Buchholz, Dieter Huy, Maren Liedtke, Michael Schmidt und Henrike Sievers. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin (DERA Rohstoffinformationen, 40). Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-40.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 30.07.2019.

Elsner, Harald (2015): Bismut - ein typisches Sondermetall. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin (DERA Rohstoffinformationen, 27). Online verfügbar unter http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_bismut.pdf;jsessionid=1E758FBA61345A4B910E3A529D8C0682.1_cid321?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 06.08.2019.

Europäische Kommision (2010): Die Rohstoffinitiative — Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern. Brüssel (Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat, KOM(2008) 699 endgültig/2).

Europäische Kommission (2013): Strategic Implementation Plan for the European Innovation Partnership on Raw Materials. Brüssel.

Europäische Kommission (2017): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Factsheets. Luxembourg, zuletzt geprüft am 21.09.2017.

European Commission (2017a): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Criticality Assessments. Unter Mitarbeit von Deloitte, BGS, BRGM und TNO. Luxembourg, zuletzt geprüft am 21.09.2017.

European Commission (2017b): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Non-critical Raw Materials Factsheets. Unter Mitarbeit von Deloitte, BGS, BRGM und TNO. Luxembourg, zuletzt geprüft am 21.09.2017.

Kuhn, Kerstin (2017): Späte. Fluss- und Schwerspat in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover.

Langkau, Sabine; Erdmann, Martin (2020): Environmental impacts of future rare earth supply for magnet applications: A prospective LCA study. In: *Journal of Industrial Ecology*, (accepted).

Marscheider-Weidemann, Frank; Langkau, Sabine; Hummen, Torsten; Erdmann, Lorenz; Tercero Espinoza, Luis; Angerer, Gerhard et al. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin (DERA Rohstoffinformationen, 28). Online verfügbar unter http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2016.

Marscheider-Weidemann, Frank; Pfaff, Matthias; Rosenberg, Sonja; Sartorius, Christian; Ostertag, Katrin (2020): Verbreitungspotenziale der r4-Sekundärrohstofftechnologien und ihre Implikationen für die Entwicklung von Nachhaltigkeit, Gesamtrohstoffproduktivität und gesamtwirtschaftlichen Effekten. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.

Mineralöl Wirtschaftsverband e.V. (2018): Rohöl-Verarbeitungskapazität der Raffinerien in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.mwv.de/statistiken/raffineriekapazitaeten/, zuletzt geprüft am 26.11.2018.

Mudd, G. M.; Jowitt, S. M. (2016): Rare earth elements from heavy mineral sands: assessing the potential of a forgotten resource. In: *Applied Earth Science* 125 (3), S. 107–113. DOI: 10.1080/03717453.2016.1194955.

Petroleum & Biofuels Association - Finland (2015): European oil refining capacity. Online verfügbar unter http://www.oil.fi/en/statistics-2-oil-production-and-refining/23-european-oil-refining-capacity, zuletzt geprüft am 26.11.2018.

Schreiber, Andrea; Marx, Josefine; Zapp, Petra; Hake, Jürgen-Friedrich; Voßenkaul, Daniel; Friedrich, Bernd (2016): Environmental Impacts of Rare Earth Mining and Separation Based on Eudialyte. A New European Way. In: *Resources* 5 (4), S. 32. DOI: 10.3390/resources5040032.

Seelig, Jan; Hochstädt, Daniel (2017): Potenzialabschätzung der Verbundvorhaben. Verbreitungspotenziale der r4-Lösungen. r4-INTRA-Bewertertreffen. CUTEC. Karlsruhe, 15.11.2017.

Slaby, Dieter; Wilke, Ludwig (2006): Wirtschaftslehre der Bergbauunternehmen und der Bergbaubetriebe. 1. Aufl. Freiberg: Verl. d. Techn. Univ. Bergakademie (Bergwirtschaftslehre, Teil 2).

Tercero Espinoza, Luis; Erdmann, Martin (2018): Rohstoffprofile. Trends und Vergleiche für die in r4 behandelten Rohstoffe. Arbeitspapier im Rahmen des r4-Integrations- und Transferprojektes. Fraunhofer ISI; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Karlsruhe, Hannover. Online verfügbar unter https://www.r4-innovation.de/files/Fraunhofer-ISI-BGR-Rohstoffprofile-neu.pdf.

Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry (2010). Chichester: Wiley.

UNEP (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. Unter Mitarbeit von Thomas E. Graedel, Julian Allwood, Jean-Pierre Birat, Matthias Buchert, Christian Hagelüken, Barbara Reck et al. Hg. v. United Nations Environment Programme. UNEP.