

Die Rolle kritischer Materialien für die Energiewende

Herausforderungen und Chancen

IMPRESSUM

HERAUSGEBERIN UND KONTAKT

Akademien der Wissenschaften Schweiz (a+) • Erweiterte Energiekommission
Haus der Akademien • Laupenstrasse 7 • Postfach • 3001 Bern • Schweiz
+41 31 306 93 52 • urs.neu@scnat.ch • energie.akademien-schweiz.ch • [@akademien_ch](https://x.com/akademien_ch)

ZITIERVORSCHLAG

Noailly et al. (2024)
Die Rolle kritischer Materialien in der Energiewende. Herausforderungen und Chancen.
Swiss Academies Reports 19 (3)

AUTORIN

Joëlle Noailly, Geneva Graduate Institute

BEITRAGENDE

Christian Bauer, Paul Scherrer Institut • Xaver Edelmann, World Resources Forum • Tobias Haller, Universität Bern • Christian Holzner, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften • Alessandra Hool, ESM Foundation • Vanessa Schenker, ETH Zürich • Patrick Wäger, EMPA

REDAKTION

Urs Neu, Leiter Erweiterte Energiekommission

LAYOUT

Olivia Zwyzgart, SCNAT

TITELBILD

stock.adobe.com/Philip (generiert mit KI)

1. Auflage, 2024

ISSN (online) 2297-1807

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.12168422



Mit dieser Publikation leisten die Akademien der Wissenschaften Schweiz einen Beitrag zu SDG 7:
«Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern».

> sustainabledevelopment.un.org

> eda.admin.ch/agenda2030/de/home/html

Die Rolle kritischer Materialien für die Energiewende

Herausforderungen und Chancen

Dieser Bericht fasst die zunehmenden Risiken bei der internationalen Versorgung mit kritischen Materialien für die Energiewende zusammen, erörtert mögliche Auswirkungen, Herausforderungen und Chancen und gibt Empfehlungen für die Schweiz.

Inhaltsverzeichnis

Das Wichtigste in Kürze	3
1 Globale Überlegungen.....	5
1.1 Einleitung: Besorgnis über die internationale Versorgung mit kritischen Materialien	5
1.2 Konzentration von Bergbau und Verarbeitung in einigen wenigen Ländern.....	5
1.3 Änderung der Versorgungsrisiken	7
1.4 Nachteilige Auswirkungen des Bergbaus auf die lokale Umwelt	8
1.5 Minderung der Versorgungsrisiken.....	9
2 Herausforderungen und Chancen für die Schweiz.....	10
2.1 Herausforderungen für die Schweiz.....	10
2.2 Rolle des Schweizer Rohstoffhandelssektors	11
2.3 Chancen für Kreislaufwirtschaft und technologische Innovation	12
3 Empfehlungen.....	13
3.1 Politische Optionen und abschliessende Empfehlungen	13
Referenzen	15

Das Wichtigste in Kürze

1. Die Schweiz ist stark von Importen abhängig

- Mit der starken Ausweitung von Technologien wie Photovoltaik (PV), Batterien für Elektroautos, Wärmepumpen usw. wächst die wachsende Besorgnis über die Verfügbarkeit von Materialien, die für den Übergang zu erneuerbaren Energien zentral sind und ein hohes Versorgungsrisiko aufweisen (z. B. Lithium, Kobalt, Nickel) (Kap. 1.1). Die rasch steigende Nachfrage nach solchen so genannten kritischen Mineralien und Materialien könnte zu Lieferengpässen, und zu steigenden Kosten führen, auch bei Halbfertig- und Endprodukten. Diese wiederum könnten sich auf die Kosten für Schweizer Unternehmen auswirken, die solche Technologien entwickeln und Endprodukte herstellen (Kap. 2.2).

Empfehlung

→ Erstellung einer detaillierten Übersicht über den Bedarf der Schweiz im Hinblick auf kritische Materialien.

2. Die Versorgungsrisiken sind mehr geopolitischer als physischer Natur

- Die Versorgungsrisiken werden nicht in erster Linie durch mangelnde weltweite Vorkommen verursacht, sondern durch geopolitische Aspekte und Risiken entlang der Lieferkette (Kap. 1.1). Ein wichtiges geopolitisches Problem besteht darin, dass sowohl die Gewinnung von Rohstoffen als auch die Verarbeitung dieser Materialien in der Regel in einer kleinen Zahl von Ländern konzentriert ist. Insbesondere China hat auf vielen Märkten eine besondere Vormachtstellung. Vor allem bei Seltenen Erden kontrolliert es den grössten Teil der Lieferkette. Die EU ist bei der Deckung ihres Bedarfs an Photovoltaik praktisch vollständig von Einfuhren aus China abhängig. Die EU produziert nur 4% der Rohmineralien und 12% der verarbeiteten Materialien der weltweiten PV-Produktion und nur 2% der Rohmineralien und 4% der verarbeiteten Materialien der weltweiten Lithium-Ionen-Batterieproduktion selbst (Kap. 1.2).
- Die Schweiz ist stark von Importen abhängig, wobei es sich grösstenteils um Komponenten oder Endprodukte handelt: 2021 importierte die Schweiz Komponenten für die Solarenergie zu 57% aus Europa (Deutschland 22%, Niederlande 18%) und zu 38% aus China. Allerdings basieren die aus der EU importierten Komponenten selbst auf importierten Materialien aus China, was China trotzdem zum entscheidenden Land in der Lieferkette macht. Windmotoren und -masten wurden zu 48% aus der Türkei, zu 30% aus Deutschland und zu 17% aus Italien importiert (Kap. 2.1). Für die Schweiz sind die Abhängigkeiten bei PV und Batterien – aufgrund des Fokus der Energiewende auf PV und die

Elektrifizierung von Autos – wichtiger als bei der Windkraft, wo die Nachfrage geringer und das Angebot vielfältiger ist.

- Die Versorgungsrisiken künftiger erneuerbarer Energiesysteme unterscheiden sich von denen heutiger fossil-basierter Systeme: Für den Betrieb fossiler Anlagen ist ein kontinuierlicher Import fossiler Brennstoffe nötig. Eine plötzliche Verknappung hätte schnell massive Auswirkungen auf die Wirtschaft. Hingegen würde beispielsweise ein einjähriger Lieferstopp für PV-Module nur den Ersatz oder die Erweiterung einiger weniger Prozente der Anlagen betreffen. Der Übergang von einem fossilen zu einem erneuerbaren Energiesystem führt zu einem starken Rückgang des Gesamtversorgungsrisikos für Brennstoffe, aber zu einem Anstieg des Versorgungsrisikos beim Bau von Stromerzeugungsanlagen (Kap. 1.3).

Empfehlung

→ Verringerung der Nachfrage kritischer Materialien: durch Diversifizierung des Technologiemicxes; Förderung der gemeinsamen Nutzung und Wiederverwendung von Produkten; Rückgewinnung von Rohstoffen; Vermeidung von geplantem Verschleiss; Vermeidung von Abfall; Suffizienz.

3. Handel und internationale Zusammenarbeit sind wichtig

- Die Schweiz spielt eine wichtige Rolle im Handel mit Rohstoffen und hat daher einen erleichterten Zugang zu entsprechenden Handelsplattformen. Andererseits kann das wachsende Bewusstsein und die Besorgnis über ökologische, soziale, regulatorische und gesundheitliche Herausforderungen von Bergbauaktivitäten die öffentliche Aufmerksamkeit auf den Schweizer Rohstoffhandelssektor lenken und die Reputationsrisiken für diesen Sektor erhöhen (Kap. 2.2).
- Entscheidend für die Schweizer Industrie ist weniger der direkte Zugang zu kritischen Materialien, sondern vielmehr das Funktionieren der Handelsmärkte und langfristig der Zugang zu Second-Life-Komponenten und -Materialien (Kap. 2.2).

Empfehlung

→ Mit der EU entlang der gesamten Lieferkette zusammenarbeiten; sichere und nachhaltige Lieferketten für die Schweiz aufbauen.

4. Soziale Folgen des Bergbaus berücksichtigen

- Die stark steigende Nachfrage nach Mineralien und die Ausweitung des entsprechenden Bergbaus führen zu sozialen sowie ökologischen Problemen wie Treibhausgasemissionen, Abfall, Wasser- und Bodenverschmutzung mit entsprechenden gesundheitlichen Auswirkungen. Diese sollten genau beobachtet werden. Eines der zentralen sozialen Probleme ist die Vergabe von Bergbaulizenzen durch Staaten an private Unternehmen und das damit verbundene Untergraben lokaler Landrechte. Dies führt zur Zerstörung langfristiger Lebensgrundlagen und Kulturlandschaften, zu Gesundheitsproblemen und zur Verarmung lokaler Gemeinschaften (Kap. 1.4).

Empfehlung

- Unterstützung der Einführung und Einhaltung von Umwelt-, Sozial- und Gesundheitsstandards im Bergbau (und Recycling).

5. Technologieentwicklung und Forschung fördern

- Versorgungsrisiken können vermindert werden durch technologische Innovationen zur Verringerung der Materialintensität von Komponenten für die Energiewende (Substitution, Designoptimierung, Einführung neuer Werkstoffe, Verlängerung der Lebensdauer von Produkten) und durch Senkung des Energieverbrauchs bei der Nutzung, beispielsweise durch Verringerung der Fahrzeuggrösse und/oder des Gewichts von Elektroautos oder durch Carsharing (Kap. 1.5).
- Die Schweiz und ihre Industrie und Forschung haben ein hohes Potenzial für die technologische Entwicklung neuer/innovativer Kreislaufprozesse, das Recycling von Mineralien und die Verringerung der Materialintensität (Kap. 2.3).

Empfehlungen

- Förderung von Forschung/Innovation zum Ersatz kritischer Mineralien und zum Aufbau von Recycling-Infrastrukturen und -ketten.

1 Globale Überlegungen

1.1 Einleitung: Besorgnis über die internationale Versorgung mit kritischen Materialien

Viele Länder, darunter die USA, die EU-Staaten, China und Indien, haben ehrgeizige Fahrpläne für die Erreichung ihrer Netto-Null-Ziele bis Mitte des Jahrhunderts angekündigt, um das Übereinkommen von Paris von 2015 zu erfüllen. Im Rahmen der Energiestrategie und des Klima- und Innovationsgesetzes hat sich die Schweiz ein ähnliches Ziel gesetzt: Netto-Null-Emissionen von Treibhausgasen bis 2050. Die Verwirklichung dieser Ziele setzt eine umfassende Umstellung der derzeitigen Energiesysteme voraus, bei der kohlenstoffhaltige fossile Brennstoffe durch erneuerbare Energiequellen mit geringen CO₂-Emissionen ersetzt werden. In einem globalen Szenario mit Netto-Null-Emissionen müsste der Verkauf von Elektroautos bis 2030 zwei Drittel der Neuwagenverkäufe ausmachen, und die weltweite Stromerzeugungskapazität aus erneuerbaren Energien müsste sich zwischen 2022 und 2030 verdreifachen (IEA 2023b). Die Ausweitung dieser Technologien bedeutet auch eine steigende Nachfrage nach Übertragungs- und Verteilungsleitungen in den Stromnetzen und nach Batterien zur Energiespeicherung.

Es gibt zunehmend Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit von Materialien, die kritisch oder von grosser Bedeutung für den Übergang zu sauberer Energie sind und deren Versorgung gleichzeitig mit einem hohen Risiko verbunden ist (Europäische Kommission 2023b, DOE 2023). Die Europäische Union (EU) stuft insbesondere Gallium, Magnesium, Seltene Erden,¹ Lithium, Germanium, Kobalt, Siliziummetall, Nickel und Kupfer als kritisch ein, um die künftige Nachfrage in den Bereichen erneuerbare Energien und Elektromobilität zu decken (Europäische Kommission 2023b). Erneuerbare Energietechnologien wie Wind- und Solarenergie benötigen erhebliche Mengen an kritischen Materialien wie Seltene Erden für Permanentmagnete und Siliziummetall für die Herstellung von Dünnschichtmodulen für die Photovoltaik. Batterien für Elektrofahrzeuge benötigen grosse Mengen an Lithium, Mangan und Kobalt, während Kupfer und Aluminium in grossem Umfang für die Herstellung von Stromübertragungsleitungen verwendet werden.

¹ Mit «Seltene Erden» werden die 17 chemischen Elemente der 3. Nebengruppe des Periodensystems bezeichnet. Es handelt sich hierbei um Metalle, die mit einer Ausnahme (Promethium) in der Erdkruste gar nicht so selten sind oder (im Fall von Cerium, Yttrium und Neodym) sogar häufiger vorkommen als beispielsweise Blei oder Kupfer. Selten sind hingegen grössere, wirtschaftlich ausbeutbare Lagerstätten

Materialversorgungskette

(Europäische Kommission 2023b)

Die Versorgung mit kritischen Materialien ist durch verschiedene Schritte gekennzeichnet:

- **Rohstoffe:** Geförderte, aufbereitete und veredelte Rohminerale. Aufbereitungsvorgänge dienen der Trennung, Verhüttung, Veredelung und Reinigung der abgebauten mineralischen Stoffe.
- **Verarbeitete Materialien:** Halbfertigprodukte (z. B. Metalllegierungen), die aus einer Kombination mehrerer Materialien (z. B. Legierungen) bestehen
- **Komponenten:** Gefertigte kleine Bausteine einer Technologie (z. B. Dauermagnete)
- **(Super-)Baugruppen:** Zusammengesetzte Komponenten (z. B. montierte Elektromotoren)

Versorgungsrisiken werden in der Regel nicht durch die globale physische Knappheit verursacht – Mineralreserven sind ein dynamisches Konzept, das von der Exploration, den Technologien und der wirtschaftlichen Tragfähigkeit abhängt (Meinert et al. 2016) –, sondern vielmehr durch geopolitische Aspekte und Risiken entlang der Lieferkette (siehe Kasten). Diese machen es schwierig, das Angebot in der erforderlichen Geschwindigkeit und Gröszenordnung zu steigern, um die Nachfrage zu decken.

1.2 Konzentration von Bergbau und Verarbeitung in einigen wenigen Ländern

Ein wichtiges geopolitisches Problem besteht darin, dass sowohl die Gewinnung von Rohstoffen als auch die Verarbeitung dieser Materialien tendenziell in einer kleinen Anzahl von Ländern konzentriert ist, wobei China auf vielen Märkten eine besondere Vormachtstellung einnimmt (Leruth et al. 2022, Cool et al. 2020), siehe Abbildung 1. Die Vorherrschaft Chinas ist besonders wichtig auf dem Markt für Seltene Erden, wo es den grössten Teil der Lieferkette kontrolliert. China fördert etwa 60% des weltweiten Angebots an Seltenen Erden und ist Eigentümer fast aller Raffinerieanlagen (USGS 2019). Chinas Schlüsselrolle bei kritischen Materialien ist das Ergebnis strategischer Bemühungen der letzten Jahrzehnte, die gesamte Lieferkette zu erobern, und zwar durch industriepolitische Massnahmen und Investitionen in Bergbauprojekte im Ausland. Darüber hinaus haben die USA den Grossteil



Abbildung 1: Länder mit dem grössten Anteil an der weltweiten Versorgung mit kritischen Materialien. Quelle: Europäische Kommission 2023a

ihrer Bergbauaktivitäten im Bereich der Seltenen Erden bereits vor Jahrzehnten eingestellt, obwohl sie über erhebliche Reserven verfügen. Während Australien und Chile für 70% der Lithiumproduktion verantwortlich sind, kontrollieren chinesische Staatsunternehmen ein Drittel des Gesamtmarktes (aufgrund monopolistischer Spodumen-Raffineriekapazitäten und Kapazitäten zur Umwandlung von Lithium-Karbonat in Lithium-Hydroxid). Die Demokratische Republik Kongo produziert fast 70% des weltweiten Kobalts. Die meisten Unternehmen, die Kobaltminen betreiben, sind jedoch, abgesehen von Glencore, in China ansässig. Das Land hat sich im Rahmen der «Neue Seidenstrasse»-Initiative aktiv um exklusive Schürfrechte in mehreren afrikanischen Ländern bemüht (Leruth et al. 2022). Auch Russland ist ein wichtiger Akteur bei der Versorgung mit kritischen Materialien, da es etwa 10% zum weltweiten Nickelangebot beisteuert – einschliesslich 20% zum weltweiten Angebot an Nickel der Klasse I, das für die Batterieproduktion benötigt wird). Die jüngste russische Invasion in der Ukraine hat die Sorge über Lieferunterbrechungen aufgrund von Handels- und Wirtschaftssanktionen geweckt.

Länder mit einer grossen Nachfrage und umfangreichen Einfuhren wichtiger Materialien für ihre saubere Energieindustrie sind daher weitgehend von einer kleinen Gruppe von Lieferanten abhängig. So ist die EU beispielsweise bei der Deckung ihres Bedarfs an Photovoltaik vollständig auf Einfuhren aus China angewiesen. Abbildung 2 zeigt die einzelnen Schritte der Lieferkette für die Photovoltaik: Die EU produziert nur 4% der Rohmineralien und 12% der verarbeiteten Materialien der weltweiten Produktion. Bei Lithium-Ionen-Batterien ist die Situation noch extremer: Hier produziert die EU nur 2% der Rohmineralien und 4% der verarbeiteten Materialien der weltweiten Produktion.

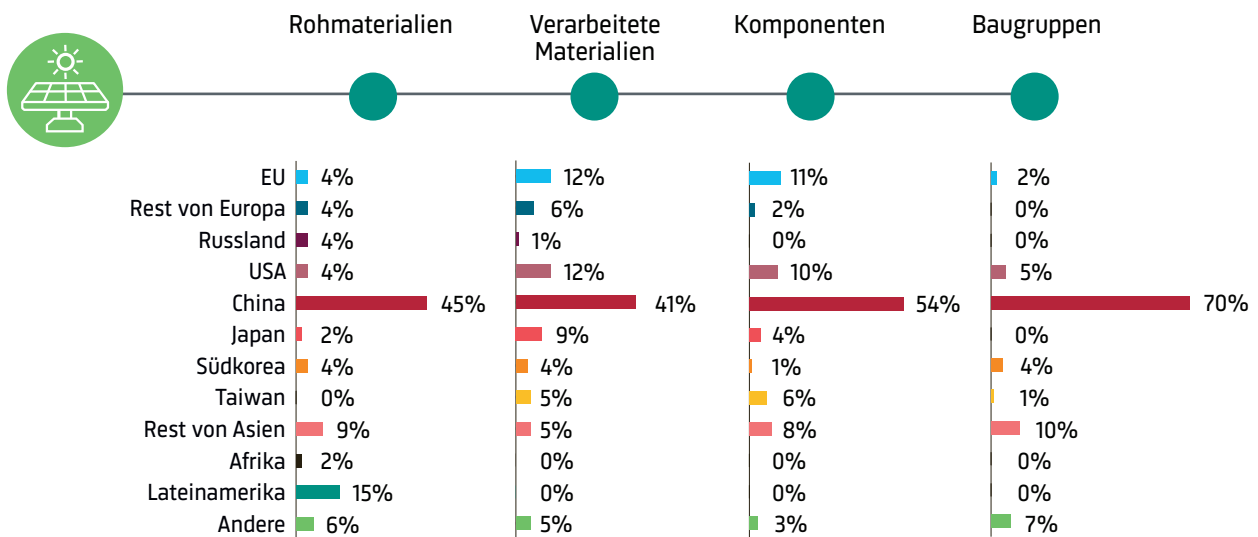


Abbildung 2: Angebotskonzentration und Hauptakteure entlang der Lieferkette von Photovoltaik in der EU. Die Anteile geben den durchschnittlichen Anteil der einzelnen Länder an der weltweiten Produktion auf jeder Stufe der Lieferkette an. Quelle: Europäische Kommission 2023b

Preissteigerungen und Volatilität aufgrund von Lieferbeschränkungen können die in den letzten zehn Jahren erzielten Kostensenkungen bei sauberen Technologien wieder zunichtemachen und damit die Erschwinglichkeit der Energiewende gefährden. Während die Kathodenmaterialien (Kobalt, Nickel und Mangan) 2015 weniger als 5% der Kosten für Akkupakete ausmachten, sind es heute 20% der Kosten. Es gibt Anzeichen dafür, dass die Preise für Solar-PV und Lithium-Ionen-Batterien zwischen 2020 und 2021 (IEA, 2023a) bzw. zwischen 2021 und 2022 (Goldmann Sachs 2023) wieder gestiegen sind, nachdem sie ein Jahrzehnt lang gesunken waren. Es bleibt abzuwarten, ob es sich dabei um längerfristige Trends handelt oder nur um kurzfristige Schwankungen, die auf die derzeitige Materialknappheit oder auf immer noch von der COVID-Pandemie verursachte Unterbrechungen in der Lieferkette zurückzuführen sind. Darüber hinaus sind die wirtschaftlichen Triebkräfte für den Abbau kritischer Mineralien in vielen Fällen nicht diese Mineralien, sondern der Abbau anderer Rohstoffe und die Mineralien sind lediglich Nebenprodukte. Daher folgen das Angebot und die Preise nicht unbedingt der Nachfrage.

1.3 Änderung der Versorgungsrisiken

Die Versorgungsrisiken für künftige erneuerbare Energiesysteme unterscheiden sich von denen der derzeitigen fossilen Energiesysteme: Bei den fossilen Systemen geht es hauptsächlich um den Brennstoff, der für den Betrieb einer Anlage ständig nachgeliefert werden muss, während kritische Materialien nur für den Bau von Anlagen benötigt werden und diese auch ohne weitere Material-

lieferungen betrieben werden können – ausser vielleicht im Falle eines Schadens. Während also eine plötzliche Verknappung fossiler Brennstoffe rasch massive Auswirkungen auf die Wirtschaft hätte – mit allenfalls etwas Entlastung durch Pflichtlagerbestände an Erdölprodukten –, würde beispielsweise ein Lieferstopp von PV-Modulen für ein Jahr «nur» den Ersatz oder den Neubau von einigen wenigen Prozenten des Gesamtvolumens der Anlagen, die eine Lebensdauer von ca. 25 Jahren haben, betreffen und die Stromproduktion aus vorhandenen Beständen nicht gefährden. Elektroautos werden als Ganzes importiert und hätten nur bei einem «Blackout» ein Problem, während Benzin- und Dieselfahrzeugen von einem Importstopp fossiler Brennstoffe unmittelbar betroffen wären.

Erneuerbare Energiesysteme sind in der Regel mineralienintensiver, da für sauberen Strom mehr Mineralien pro Kilowatt benötigt werden als für Strom aus fossilen Brennstoffen. Für die Herstellung eines Elektroautos werden ausserdem mehr als 200 kg Mineralien pro Fahrzeug benötigt – darunter Kupfer, Nickel, Lithium, Mangan und Graphit –, verglichen mit 35 kg für ein konventionelles Auto (hauptsächlich Kupfer und Mangan) (IEA 2022a). Was die geopolitischen Risiken angeht, so sind die Märkte für mineralische Rohstoffe oft recht klein und der Konzentrationsgrad ist höher als bei den Märkten für fossile Brennstoffe. Im Vergleich zu Öl- und Gasförderstätten sind Mineralienminen tendenziell stärker in Entwicklungsländern mit hohem politischem Risiko konzentriert, weil dort grosse Vorkommen vorhanden sind und der gesellschaftliche Widerstand gegen die Eröffnung von Minen in diesen Ländern geringer ist oder die politischen

Folgen eines solchen Widerstands ausbleiben. Allerdings könnte der Umfang der für die Energiewende erforderlichen Bergbautätigkeiten am Ende geringer sein als bei fossilen Brennstoffen, insbesondere da Mineralien recycelt werden können (Nijzens et al. 2023).

Um diese Risiken und künftige Versorgungsunterbrechungen abzumildern, haben mehrere Länder begonnen, Massnahmen zur Diversifizierung ihrer Lieferketten zu ergreifen. Im November 2023 hat die EU eine Einigung über das EU-Gesetz zu kritischen Rohstoffen erzielt. Das Gesetz tritt 2024 in Kraft. Es zielt darauf ab, die Versorgung mit strategischen Rohstoffen (inklusive Aluminium und synthetischer Graphit) zu sichern: Die «inländische Kapazität» der Gewinnung von strategischen Rohstoffen in der EU soll auf mindestens 10% des Jahresverbrauchs erhöht, die Verarbeitungskapazität auf 40% und die Recyclingkapazität auf mindestens 25% des EU-Jahresverbrauchs gesteigert werden. Weiter sollen die Importe so diversifiziert werden, dass bis 2030 kein Land mehr als 65% des EU-Jahresverbrauchs abdeckt (Europäische Kommission, 2023d). In den USA sieht der «Inflation Reduction Act» Steuerabzüge für Hersteller von Elektroautos und Batterien vor, sofern sie einen grossen Anteil kritischer Materialien verwenden, die aus den USA oder einem Land stammen, das ein Handelsabkommen mit den USA hat. Südkorea hat strategische Mineralien für landesweit relevante Sektoren wie Motoren, Batterien und Halbleiter definiert.

1.4 Nachteilige Auswirkungen des Bergbaus auf die lokale Umwelt

Zusätzliche Erkundungs- und Bergbautätigkeiten in Industrieländern oder von ihren Handelspartnern könnten dazu beitragen, das Angebot an wichtigen Mineralien zu erhöhen und zu diversifizieren. Die Erkundung und der Abbau werden jedoch durch die notwendige Berücksichtigung der durch den Bergbau aufgeworfenen ökologischen und sozialen Bedenken eingeschränkt. Es gibt immer mehr Belege für negative Auswirkungen des Bergbaus auf die lokale Umwelt. Der Abbau von Mineralien ist mit verschiedenen Umweltproblemen verbunden, wie Luftverschmutzung, lokale Kontamination durch giftige Chemikalien, Beeinträchtigung der Landschaft, Verlust der biologischen Vielfalt und Abfallerzeugung (Sengupta 2021). Obwohl Mineralien für die Erzeugung erneuerbarer Energien oder für die Batterieproduktion nur einen Bruchteil des gesamten Bergbaus – einschliesslich der Gewinnung fossiler Energieträger – ausmachen und der Übergang zu erneuerbaren Energien die Bergbauaktivitäten insgesamt verringern wird (Krane und Idel 2021, Nijzens et al. 2016), führt die stark steigende Nachfrage zu einer Ausweitung des entsprechenden Bergbaus.

Damit verbundene soziale, gesundheitliche und ökologische Fragen sollten deshalb genau betrachtet werden.

Der Abbau, die Zerkleinerung des Erzes und der Transport des Materials mit grossen Diesel-LKW sind flächen-, energie- und emissionsintensiv und Bergbauabfälle und -rückstände können zu einer Verunreinigung des örtlichen Wassers und des Bodens führen, mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit der betroffenen Bevölkerung. Darüber hinaus ist der Bergbau mit einer Vielzahl negativer sozialer und politischer Auswirkungen verbunden, die sich gravierend auf die Lebensgrundlage der Gemeinden in der Nähe der Minen auswirken, einschliesslich der Vertreibung der lokalen Bevölkerung, der Verletzung von Menschenrechten und des Beitrags zu bewaffneten Konflikten. Eines der zentralen Probleme sind die kolonialen und postkolonialen Hinterlassenschaften der mineralgewinnenden Industrien, durch welche lokale Landrechte, die oft Allgemeingut sind, durch die Vergabe von Bergbaulizenzen an private Unternehmen untergraben wurden. Diese Form der Aneignung von Gemeingütern führt häufig nicht nur zu Umweltverschmutzung, sondern auch zur Zerstörung lokaler langfristiger Existenzgrundlagen und Kulturlandschaften mit hoher Biodiversität, zu Gesundheitsproblemen und zur Verarmung lokaler Gemeinschaften (Niederberger et al. 2016, Haller 2019, Haller et al. (Hrsg.) 2020, Sternberg et al. 2022). Die Massnahmen der sozialen Verantwortung der Unternehmen («Corporate Social Responsibility» CSR) reichen weder aus, um die langfristigen Verluste zu decken, noch werden sie in der Regel auf partizipative Weise umgesetzt (Niederberger et al. 2016, Dolan und Rajak 2022).

Die Ausweitung des Bergbaus für die Erzeugung von grüner Energie birgt daher die Gefahr, diesen Landübernahme-Prozess mit der Begründung einer nachhaltigen und grünen Energiewende und den Zielen für nachhaltige Entwicklung weiter zu verschärfen (Larsen et al. 2022). Um die Gewinnung von Mineralien mit den Zielen der Energiewende in Einklang zu bringen, bedarf es daher einer tiefgreifenden Umstellung der Produktionsverfahren durch die Entwicklung sauberer Bergbautechnologien, die Verbesserung von Indikatoren für die Rückverfolgbarkeit von Bergbau- und Gewinnungstätigkeiten und den Einbezug lokaler Gemeinschaften in Entscheidungsprozesse. In vielen Förderländern sind die Daten zur Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt, die Gesellschaft und die Regierungsführung immer noch begrenzt, nicht standardisiert oder gar nicht vorhanden. Die Einführung eines digitalen Produktpasses könnte eine Option sein, um dieses Problem zu lösen. Die im Jahr 2023 in Kraft getretene Batterieverordnung (Europäische Kommission 2023c) ist ein Schritt in diese Richtung. Der «Critical Minerals Policy Tracker» der IEA (2022b) versucht, Informationen über politische Entwicklungen und ESG-Belange

(Umwelt, Soziales und Unternehmensführung) bereitstellen und mit Regierungen und anderen Interessengruppen zusammenzuarbeiten, um neue politische Leitlinien zur Verringerung der negativen Auswirkungen der Mineralienproduktion zu entwickeln (IEA 2023c).

1.5 Minderung der Versorgungsrisiken

Neben der Öffnung und Regulierung von Minen könnte die technologische Innovation durch die Verringerung der Materialintensität von Komponenten erheblich zur Verringerung von Versorgungsrisiken beitragen. Technologische Substitution, Effizienzverbesserung, Designoptimierung, die Einführung neuer Materialien oder die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten können die Nachfrage nach kritischen Mineralien und Materialien beeinflussen. So haben beispielsweise seit 2015 Veränderungen in der Batteriechemie von Elektrofahrzeugen, einschliesslich eines höheren Anteils von Lithium-Ferrophosphat (LFP), die Abhängigkeit von Kobalt und Nickel deutlich verringert (EERA 2023). Das Recycling von Altprodukten kann die künftige Verfügbarkeit kritischer Materialien verbessern, auch wenn die Wirtschaftlichkeit des Recyclings im Vergleich zur Neugewinnung noch fraglich ist. Die Einführung obligatorischer Informationen über den ökologischen Fussabdruck von Materialien könnte ein Weg sein, um das Recycling wettbewerbsfähiger zu machen. In einer Welt mit schnell wachsender Nachfrage und in Anbetracht der Lebensdauer von Autos von 10 bis 20 Jahren und von Wind- und PV-Anlagen von 20 bis 30 Jahren kann das Recycling kurz- bis mittelfristig nur geringfügig zur Versorgung beitragen (Liang et al. 2023), aber es ist umso wichtiger, bereits heute funktionierende Systeme für die langfristige Zukunft zu schaffen.

Nicht zuletzt können die Versorgungsrisiken durch eine Verringerung der Nachfrage nach Materialien für Energietechnologien wie Elektroautos verringert werden, beispielsweise durch eine Verringerung der Fahrzeuggrösse und/oder des Gewichts sowie Carsharing.

2 Herausforderungen und Chancen für die Schweiz

2.1 Herausforderungen für die Schweiz

Die Schweiz ist zwar ein rohstoffreiches Land, aber hauptsächlich in Bezug auf den Bausektor (Kies, Sand usw.). Bei den kritischen Mineralien bzw. Metallen wie Kobalt, Lithium oder Seltenen Erden ist die Schweiz vor allem auf Importe angewiesen, oft in Form von Vorprodukten und Halbfertigwaren. Die Schweiz spielt jedoch eine wichtige Rolle im Handel mit Rohstoffen (siehe Kap. 2.2) und hat deshalb einen erleichterten Zugang zu entsprechenden Handelsplattformen. Während die Schweiz bei der Verarbeitung von Rohgold und dem Handel mit Feingold und Goldprodukten weltweit eine wichtige Rolle spielt, ist dies bei anderen kritischen Mineralien nicht der Fall. Hier muss die Schweiz entweder raffiniertes Material für ihre Unternehmen, die Technologien entwickeln und Endprodukte herstellen (zum Beispiel Gurit, Meyer Burger, ABB), importieren oder sie importiert Endprodukte. Für die Schweizer Industrie ist nicht der direkte Zugang zu kritischen Rohstoffen, sondern vielmehr das gute Funktionieren der Handelsmärkte entscheidend.

Herkunft der Einfuhren in die Schweiz

Die Schweiz importiert nur eine kleine Menge roher Seltenen Erden, aber die Mehrheit davon (57%) kommt heute aus Asien. Im Jahr 2021 kamen 26% der in die Schweiz importierten Seltenen Erden aus China, 26% aus Indien und 10% aus Indonesien. Auf Europa entfallen 34% der Schweizer Importe (vor allem aus Deutschland, Frankreich und Österreich). Der Anteil Asiens hat sich in den letzten zehn Jahren verdreifacht, denn 2010 entfielen noch 73% der Schweizer Importe auf Europa, während Asien nur 19% ausmachte.²

Eine 2016 durchgeführte Umfrage unter Schweizer Unternehmen des Sektors Maschinen, elektrische Ausrüstungen und Metalle ergab, dass 20% der Unternehmen Seltenen Erden verwenden, neben Chrom (74%), Molybdän (69%), Magnesium (60%), Wolfram (57%) und Graphit (53%). Dies hauptsächlich über die indirekte Lieferung von Zwischenprodukten, da Schweizer Unternehmen am Ende der Lieferkette stehen (Bundesrat 2018).

Permanentmagnete sind ein nachgelagertes Produkt der von Schweizer Unternehmen verwendeten Seltenen Erden. Magnete werden in Industrierobotern, Uhren, aber auch in Windkraftanlagen eingesetzt. Internationale Handelsdaten zeigen, dass 87% der Schweizer Einfuhren von Dauermagneten auf Asien entfallen (China und Malaysia machen 36 bzw. 47% der Einfuhren aus), verglichen mit 68% im Jahr 2010. In den letzten zehn Jahren ist der Anteil Europas an den Schweizer Importen von Dauermagneten von 31% auf heute 11% gesunken.

Die Beschleunigung des Übergangs zu erneuerbarer Energie kann neue Herausforderungen mit sich bringen. Während in der Anfangsphase der Entwicklung der Solarenergienutzung Schweizer Unternehmen zu den weltweit führenden gehörten, hat die Schweiz diese Position verloren und muss – wie die anderen europäischen Länder – die meisten Endprodukte importieren, obwohl es immer noch eine Reihe von eher kleinen Firmen gibt, welche die Paneele selbst herstellen. Der Anteil der Solarenergie am Schweizer Energieverbrauch steigt sehr schnell (von 3% im Jahr 2019 auf 6,6% im Jahr 2022 und 10% im Jahr 2023; BFE 2023) und das Marktwachstum hat sich seit 2017 versechsfacht (Swissolar 2024). Die Nachfrage wird also weiter steigen, und die Importe werden einen grossen Teil zur künftig installierten Schweizer Solarkapazität beitragen.

2021 wurden Komponenten und Maschinen für die Solarenergie zu 38% aus China, zu 22% aus Deutschland und zu 18% aus den Niederlanden importiert, während diese Anteile im Jahr 2010 noch bei 15%, 46% und 7% lagen. Im Moment ist Europa noch die wichtigste Quelle für Solarkomponenten für die Schweiz (57%), vor Asien (42%), siehe Abbildung 3. Allerdings sind die aus der EU importierten Komponenten selbst von importierten Materialien aus China abhängig, so dass in der Lieferkette immer noch eine grosse Abhängigkeit von China besteht. Das EU-Gesetz über kritische Mineralien zur Sicherung der Versorgung mit kritischen und strategischen Materialien (siehe Kap. 1.3), das 2024 in Kraft treten wird, könnte diese indirekte Abhängigkeit in Zukunft verringern.

Was die Windmotoren und -türme betrifft, so importiert die Schweiz 2021 die Mehrheit (51%) dieser Komponenten aus Asien (48% aus der Türkei, 1% aus China, 0,4% aus Japan und Vietnam), der Rest wird aus Europa (49% – vor allem aus Deutschland mit 30% und Italien mit 17%) importiert (siehe Abb. 3). Für die Schweiz sind aufgrund der Fokussierung der Energiewende auf PV-Anlagen und die Elektrifizierung von Autos die Abhängigkeiten bei PV

² Die Handelsstatistiken in diesem Abschnitt stammen aus dem BACI-Datensatz über bilaterale Handelsströme auf Produktebene (Gaulier und Zignago, 2010), die anhand des Harmonisierten Systems (HS 2007 Revision) identifiziert wurden. Die Prozentsätze werden anhand der Mengenanteile der einzelnen Herkunftsländer an den gesamten Schweizer Importen berechnet (Meldeland: Schweiz). Die verwendeten HS-Codes für 1) Seltene Erden und Permanentmagnete stammen aus Mancheri (2015, 2016), 2) Windenergie aus Subramaniam (2019) und 3) Solarenergie aus WTO (2022). Wir danken Ayse Nihal Yilmaz für die hervorragende Forschungsunterstützung bei der Arbeit mit dem BACI-Datensatz.

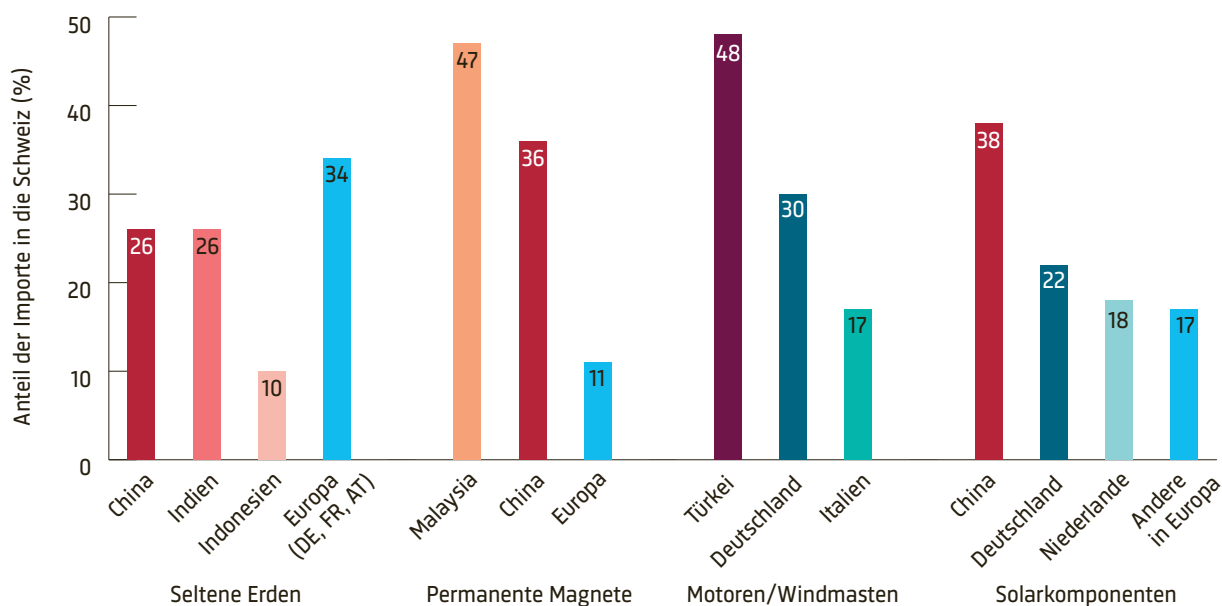


Abbildung 3: Länder, aus denen 2021 ein bedeutender Anteil der Importe in die Schweiz stammt: Seltene Erden, Permanentmagnete und Motoren und Türme für Windkraftanlagen (alles Komponenten von Windkraftanlagen) sowie PV-Komponenten. Quelle: BACI-Datensatz zu den bilateralen Handelsströmen²

und Batterien jedoch wichtiger als bei der Windkraft, wo die Nachfrage geringer und das Angebot vielfältiger ist.

Knappheit, Preise und Politik

Die rasant steigende Nachfrage nach kritischen Mineralien und Materialien könnte weltweit zu Lieferengpässen bei Materialien, Halbfertig- und Endprodukten sowie zu steigenden Kosten führen, die nicht ausreichend vorhergesehen wurden. Dies könnte sich auf die Kosten für Schweizer Unternehmen, die Technologien entwickeln und Endprodukte herstellen, sowie auf die Energiewende im Allgemeinen auswirken und den Übergang und damit die Dekarbonisierung des Energiesektors verlangsamen. Aufgrund der Erfahrungen mit der Pandemie, den in letzter Zeit zunehmenden Konflikten und politischen Unsicherheiten hat die Versorgungssicherheit stark an Bedeutung gewonnen und führt zu zunehmenden Bemühungen, die Herstellung von Endprodukten im eigenen Land oder zumindest in Europa zu verbessern. Dies und die zunehmenden Bemühungen um eine Verringerung der ökologischen und sozialen Auswirkungen des Bergbaus könnten die Kosten der Energiewende weiter erhöhen. Auf der anderen Seite stehen die steigende Nachfrage und der Wunsch nach Kostensenkungen der Forderung nach einer Verbesserung der Umwelt- und Sozialstandards im Bergbau entgegen.

Auf der politischen Seite könnte eine zusätzliche Herausforderung darin bestehen, dass es in der Schweiz tradi-

tionell nur wenige industriepolitische Massnahmen zur Steuerung von Sicherungsmassnahmen gibt. Eine derzeit weltweit zu beobachtende Strategie ist, bilaterale Abkommen auszuhandeln oder sogar grosse Netzwerke rohstoffreicher Staaten durch Wirtschaftsdiplomatie aufzubauen, um internationale Schocks aufzufangen und Knappheitsrisiken zu bewältigen. Was die Aussenpolitik angeht, könnte dies den Druck erhöhen, «Partei zu ergreifen» und die traditionelle Neutralitätspolitik teilweise in Frage zu stellen.

2.2 Rolle des Schweizer Rohstoffhandelssektors

Der Rohstoffhandelssektor ist ein wichtiger Wirtschaftszweig in der Schweiz, da er 8% des Schweizer BIP ausmacht. Im Jahr 2020 waren rund 900 Unternehmen in diesem Sektor tätig. Die Schweiz ist der grösste Handelsplatz für Rohstoffe im Allgemeinen. Etwa 60% des internationalen Handels mit Basismetallen wie Zink, Kupfer und Aluminium (Swiss Academy of Sciences 2016) werden in der Schweiz gehandelt. Es gibt eine Reihe von Schweizer Unternehmen (u. a. Glencore, Mercuria, Trafigura), die Metalle abbauen, verarbeiten, verschiffen und verkaufen. Auf Glencore entfallen 19% der weltweiten Produktion von Kobalt, 6% von Kupfer und 4% von Nickel (Leruth et al. 2022).

Aufgrund des hohen Anteils der Schweiz am Handelssektor werden das wachsende Bewusstsein und die Besorgnis über die ökologischen, sozialen und gesundheitlichen Herausforderungen von Bergbauaktivitäten die öffentliche Aufmerksamkeit auf die Rolle des Schweizer Rohstoffhandelssektors lenken (WRF/MRF 2023). Dies wird die Reputationsrisiken für den Sektor erhöhen. Die Schweiz engagiert sich für die Verbesserung der ESG-Aktivitäten auf multilateraler Ebene und setzt sich weiterhin für eine bessere Umweltsouveränität bei Rohstoffen ein. Im Jahr 2022 spielte die Schweiz eine zentrale Rolle bei der Verabschiedung der UNO-Resolution zu Umweltaspekten von Rohstoffen. Diese fordert die Mitgliedsstaaten und Interessensgruppen auf, ihre Praktiken und Investitionen im Bergbausektor an der Agenda 2030 auszurichten. Auf nationaler Ebene wurde kürzlich eine Verpflichtung zur Berichterstattung über einerseits Umweltbelange, Arbeitsbedingungen und die Achtung der Menschenrechte für grosse Unternehmen und Finanzinstitute sowie andererseits spezifische Sorgfalts- und Berichtspflichten im Bereich der sogenannten Konfliktminerale und zur Bekämpfung von Kinderarbeit eingeführt (Bundesrat 2023). Hingegen wurden strengere Vorschriften (Konzernverantwortungsinitiative) in einer sehr knappen Abstimmung im November 2020 von der Schweizer Bevölkerung zurückgewiesen, das heisst vom Stimmvolk insgesamt angenommen, aber von der Mehrheit der Kantone abgelehnt. Ab 2024 besteht in der Schweiz jedoch eine Berichtspflicht zu Klimarisiken für Publikumsgesellschaften, Banken und Versicherungen mit 500 oder mehr Beschäftigten und mindestens 20 Mio. CHF Bilanzsumme oder mehr als 40 Mio. CHF Umsatz. Ähnliche Diskussionen laufen in der EU (z.B. Europäische Kommission 2022) und in den USA. Solche Offenlegungsrichtlinien tragen dazu bei, den Finanzsektor zu Investitionen in umweltfreundlichere Verfahren und Technologien zu bewegen, die zur Aufrechterhaltung sicherer und nachhaltiger Lieferketten beitragen.

2.3 Chancen für Kreislaufwirtschaft und technologische Innovation

Ressourcenknappheit kann auch Innovationen vorantreiben, wie das Beispiel Japan zeigt, das nach der Seltenen-Erden-Krise grosse Fortschritte bei der Substitution und dem Recycling von Seltenen Erden gemacht hat. Obwohl die Schweiz ein kleines Land ist, haben ihre Industrie und Forschung ein hohes Potenzial für die technologische Entwicklung neuer und innovativer Kreislaufprozesse, einschliesslich des Recyclings kritischer Materialien aus Batterien oder Solarpanelen, und könnten entsprechende Anlagen bauen. Die Schweiz hat bereits eine gute Bilanz beim Recycling von Elektroschrott, das durch entsprechende Rücknahme- und Verwertungsvorschriften sichergestellt wird. Diese Aktivitäten könnten durch eine stärkere Fokussierung auf strategische Rohstoffe und insbesondere kritische Metalle, für die es in der Schweiz keine Verarbeitungsanlagen gibt, weiter verstärkt werden (CSS 2023). So könnte zum Beispiel sichergestellt werden, dass bei der Hochskalierung neuer Recyclinganlagen und -einrichtungen die besten Lösungen für die Gewinnung kritischer Mineralien angewandt werden, indem die Entwicklung unterstützt und beispielsweise technische Normen wie ISO-Normen verwendet werden (ISO/DIS 2023).

Weitere wichtige Innovationsziele sind die Senkung der Mineralienintensität neuer Energietechnologien und die Diversifizierung des Technologiespektrums im Hinblick auf die verwendeten Metalle und Mineralien. Gleichzeitig sollten neue Technologien versuchen, den ökologischen Fussabdruck der mineralgewinnenden Tätigkeiten zu verringern, zum Beispiel durch Wasser- und Energieeinsparung. Die Einrichtung von Datenbanken oder Kennzeichnungen bezüglich der Toxizität und anderer ökologischer Fussabdrücke könnte dazu beitragen, solche Bemühungen zu fördern.

All diese Aktivitäten können die Importabhängigkeit verringern. Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt in diesem Sinne ist jedoch die Abfallvermeidung bzw. -verwertung. Dies ist der effektivste Weg, den Energiebedarf und die Umweltauswirkungen von Abbau, Verwendung und Recycling von Materialien zu verringern. Dazu gehören auch Nachfragereduktion und Suffizienz.

3 Empfehlungen

3.1 Politische Optionen und Empfehlungen

Erstens müssen wir erkennen, dass die Versorgung mit kritischen Mineralien sowie die Energiewende insgesamt globale Herausforderungen sind. Das bedeutet, dass selbst wenn die Schweiz, die EU oder die USA die Versorgung zum Beispiel durch bilaterale oder multilaterale Abkommen sicherstellen können, die notwendige globale Dekarbonisierung des Energiesystems nicht funktioniert, wenn es zu einer allgemeinen globalen Verknappung kritischer Mineralien kommt. Parallel zu den Strategien und Anstrengungen zur Sicherung der nationalen Versorgung wird daher die Entwicklung neuer Technologien zur Steigerung der Effizienz in der Produktion, zur Förderung des Recyclings und zur Erhöhung der Vielfalt und Substituierbarkeit von Materialien von zentraler Bedeutung sein.

Zweitens scheinen die Bemühungen um Recycling und Effizienz nicht in der Lage zu sein, den erwarteten schnellen Anstieg der Nachfrage nach Anlagen für erneuerbare Energien, Elektroautos, Batterien und anderen sauberen Energietechnologien auszugleichen (Liang et al. 2023). Dies bedeutet, dass eine weltweite Ausweitung des Abbaus und der Produktion bestimmter Materialien sehr wahrscheinlich ist, insbesondere kurz- und mittelfristig, während der Abbau fossiler Ressourcen zurückgehen soll. Längerfristig könnten Innovationen im Bereich der Ersatz- und Alternativtechnologien die Nachfrage lindern.

Drittens wird die rasch steigende Nachfrage bei gleichzeitig sinkenden Erzgehalten für Kobalt, Lithium und Graphit zu einem steigenden Energieverbrauch für den Abbau und die Aufbereitung und, in Verbindung mit wahrscheinlichen Angebotsverknappungen, zu erheblichen Preissteigerungen führen. Aufgrund des zunehmenden Drucks auf die Lieferketten besteht ein hohes Risiko, dass ökologische und soziale Aspekte des Bergbaus in den Hintergrund treten, auch wenn mehr Bergbau in der EU und anderen Ländern mit hohen Standards und Kontrollen erfolgt. Nichtsdestotrotz ist es wichtig, diese Aspekte bei der Entwicklung von Strategien zur Sicherung der Versorgung zu berücksichtigen.

Zur Bewältigung der zu erwartenden Herausforderungen in kritischen Mineralienlieferketten empfehlen wir die folgenden möglichen Handlungsfelder:

- Reduktion der Nachfrage:
 - Förderung von Forschung und Innovation, um kritische Elemente in Technologien für die Energiewende (z. B. Batterien, Photovoltaik, Windturbinen, Elektrolyseure, Katalysatoren usw.) durch reichlich vorhandene Elemente zu ersetzen oder die erforderlichen Mengen bei gleicher oder sogar besserer Leistung zu verringern;
 - Diversifizierung des Technologiemies im Land, um sich nicht zu sehr auf bestimmte Materialien verlassen zu müssen;
 - Aufbau von Recyclinginfrastrukturen und -ketten;
 - Entwicklung einer Strategie zur Verbesserung der Langlebigkeit: Vermeidung von geplantem Verschleiss, Förderung einer längeren Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnik-Produkten und Kompatibilität verschiedener Komponenten;
 - Förderung der sozialen Innovation, zum Beispiel gemeinsame Nutzung und Wiederverwendung von Produkten;
 - Verbesserung der Abfallvermeidung und -verwertung;
 - Beachtung des Reboundeffektes.
- Zusammenarbeit mit der EU und/oder auf internationaler Ebene bei Innovationen entlang der gesamten Lieferkette.
- Erstellung einer detaillierten Übersicht darüber, welche kritischen Mineralien, Materialien und Produkte die Schweiz für die erwartete Energiewende benötigt, sowie über deren Herkunft und die entsprechenden sozialen und ökologischen Kosten. Identifikation von «Hot Spots» für bestimmte Rohstoffe mit hohen negativen ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen.
- Aufbau sicherer und nachhaltiger Lieferketten für die Schweiz, unter Berücksichtigung europäischer Strategien und internationaler Kooperationen sowie der Tatsache, dass die Schweiz eher fertige Technologien als die Rohstoffe selbst importiert. Dies bedeutet zum Beispiel:
 - zuverlässige Lieferanten und Länder für Lieferverträge auswählen;
 - Unterstützung oder Wahl von Bergbau, Verarbeitung und Produktion in Europa zur Erhöhung der Versorgungssicherheit;
 - Evaluation des Bedarfs bzw. der Möglichkeiten zur Unterstützung der Schweizer Industrie unter Berücksichtigung der starken staatlichen Subventionierung wie in China und den USA.

- Unterstützung bei der Festlegung und Einhaltung von Umwelt-, Sozial- und Gesundheitsstandards im Bergbau:
 - Sicherstellen, dass Bergbau- und Technologieunternehmen die Fortschritte verfolgen und möglicherweise eine Kennzeichnung oder Zertifizierung einschliesslich einer transparenten Kommunikation über die sozioökonomischen und ökologischen Bedingungen entlang der gesamten Lieferkette einführen, zum Beispiel durch digitale Produktpässe oder die Einhaltung der EU-Transparenzanforderungen in Bezug auf soziale, gesundheitliche und ökologische Aspekte.
 - Best Practices und hohe Standards bei der Minerschliessung über die Schweizer Handelsbranche fördern.
 - Händler ermutigen, Finanzprodukte unter Berücksichtigung von ESG-Spezifikationen zu entwickeln und ihr Kapital für die Finanzierung von (sauberen) Bergbauaktivitäten einzusetzen.

Referenzen

- BFE (2023) **Statistik Sonnenenergie Referenzjahr 2022**. Bern, Bundesamt für Energie. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11461>
- Bundesrat (2018) **L'approvisionnement de la Suisse en terres rares**. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/55234.pdf>
- Bundesrat (2023) **Stand der Umsetzung der Empfehlungen aus dem Bericht «Rohstoff-Sektor Schweiz: Standortbestimmung und Perspektiven»**. Bern, Schweiz. (Link, Medienmitteilung).
- CSS (2023) **Mind the E-Waste: A Case for Switzerland**. Politik-Perspektiven 11/3. Zentrum für Sicherheitsstudien (CSS) ETH Zürich. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/PP11-3_2023-EN.pdf
- DOE (2023) **Critical Material Assessment**. US Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf
- Dolan C, Rajak D (Eds.) (2022) **The anthropology of corporate social responsibility**. Berghahn Books.
- EERA (2023) **Securing sustainable critical raw material supply for clean energy in Europe**. European Energy Research Alliance (EERA). ISBN: 978-2-931174-03-6.
- Europäische Kommission (2022) **Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Corporate Sustainability Due Diligence**. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0071>
- Europäische Kommission (2023a) **Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report**. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en
- Europäische Kommission (2023b) **Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study** (Carrara S. et al.). doi:10.2760/386650 <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889>
- Europäische Kommission (2023c) **Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries**. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en
- Europäische Kommission (2023d) **European Critical Raw Materials Act**. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en
- Gaulier G, Zignago S (2010) **BACI: International Trade Database at the Product-Level**. The 1994-2007 Version. CEPII Working Paper N°2010-23. <http://www.cepii.fr/CEPII/fr/publications/wp/abstract.asp?NoDoc=2726>
- Goldmann Sachs (2023) **Electric vehicle battery prices are falling faster than expected**. <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/electric-vehicle-battery-prices-falling.html> (veröffentlicht am 1. Nov. 2023)
- Haller T, Ngutu M, Käser F (2020) **Does Commons Grabbing lead to Resilience Grabbing? The Anti-Politics Machine of Neo-Liberal Agrarian Development and Local Responses**. Land, Special issue. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03943-840-2>. https://www.mdpi.com/journal/land/special_issues/landgrabbing
- Haller T (2019) **The Different Meanings of Land in the Age of Neoliberalism: Theoretical Reflections on Commons and Resilience Grabbing from a Social Anthropological Perspective**. Land, 8(7): 104. <https://doi.org/10.3390/land8070104>
- IEA (2022a) **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. World Energy Outlook Special Report (p. 287). International Energy Agency.
- IEA (2022b) **Critical Minerals Policy Tracker**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/introducing-the-critical-minerals-policy-tracker>
- IEA (2023a) **Critical Minerals Market Review 2023**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>
- IEA (2023b) **Net Zero Roadmap: A global pathway to keep the 1.5C goal in reach**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- IEA (2023c) **Sustainable and Responsible Critical Mineral Supply Chains**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/sustainable-and-responsible-critical-mineral-supply-chains>
- ISO/DIS (2023) **Environmental management and circular economy: sustainability and traceability of secondary materials recovery – principles and requirements**. ISO/DIS 59014 (in development). International Organization for Standardization, 2023: <https://www.iso.org/standard/80694.html>
- Krane J, Idel R (2021) **More transitions, less risk: How renewable energy reduces risks from mining, trade and political dependence**. Energy Research & Social Science, 82, 102311. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102311>
- Larsen PB, Haller T, Kothari A (2022) **Sanctioning Disciplined Grabs (SDGs): From SDGs as Green Anti-Politics Machine to Radical Alternatives?** Geoforum 131: 20-26.
- Lee J, Bazilian M, Sovacool B, Hund K, Jowitt SM, Nguyen TP, Månberger A, Kah M, Greene S, Galeazzi C, Awuah-Offei K, Moats M, Tilton J, Kukoda S (2020) **Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 124: 109789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109789>
- Leruth L, Mazarei A, Régibeau P, Renneboog L (2022) **Green Energy Depends on Critical Minerals. Who Controls the Supply Chains?** (Arbeitspapier 22-12:), Peterson Institute for International Economics.
- Liang Y, Kleijn R, Van Der Voet E (2023) **Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario**. Applied Energy 346: 121400.
- Mancheri NA (2015) **World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications**. Resources Policy 46(2): 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.10.009>
- Mancheri NA (2016) **An Overview of Chinese Rare Earth Export Restrictions and Implications**. In: Borges De Lima I, Leal Filho W (ed.): Rare Earths Industry, Elsevier, S. 21-36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00002-4>
- Meinert LD, Robinson GR, Nassar NT (2016) **Mineral Resources: Reserves, Peak Production and the Future**. Resources 5(1): 14. <https://doi.org/10.3390/resources5010014>
- Mudd GM (2021) **Assessing the Availability of Global Metals and Minerals for the Sustainable Century: From Aluminium to Zirconium**. Sustainability 13(19): 10855. <https://doi.org/10.3390/su131910855>
- Niederberger T, Haller T, Gambon H, Kobi M, Wenk I (eds) (2016) **The Open Cut. Mining, Transnational Corporations and Local Populations**. eBook, ISBN 9781351050982.

Nijnens J, Behrens P, Kraan O, Sprecher B, Kleijn R (2023) **Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system.** *Joule*: 7(11): 2408-2413. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.10.005>

Ragonnaud G (2023) **Securing Europe's supply of critical raw materials** (European Parliamentary Research Services) [Briefing].

Sengupta M (2021) **Environmental Impacts of Mining: Monitoring, Restoration and Control** (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003164012>

Sovacool BK, Ali SH, Bazilian M, Radley B, Nemery B, Okatz J, Mulvaney D (2020) **Sustainable minerals and metals for a low-carbon future.** *Science*: 367(6473): 30–33. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>

Sternberg T, Bolay M, Haller T, Niederberger T (2022) **Der 'open cut' in drylands.** In: Kronenburg Garcia A et al. (eds.) *Drylands Facing Change. Interventionen, Investitionen und Identitäten.* London, Routledge, Taylor & Francis. S. 93-111.

Subramaniam V (2019) **A policy fit to diffuse? Examining the effect of feed-in tariffs on the trade-based diffusion of selected renewable energy technologies.** Master's dissertation, Geneva Graduate Institute.

Swiss Academy of Sciences (2016) **Die Schweiz und der Rohstoffhandel – Was wissen wir? Bilanz und Ausblick.** *Swiss Academies Factsheets* 11(1).

Swissolar (2024) <https://www.swissolar.ch/fr/news/detail/l-electricite-solaire-fournira-10-de-notre-consommation-annuelle-en-2024-51518>

US GAO (2022) **Critical Minerals-Building on Federal Efforts to Advance Recovery and Substitution Could Help Address Supply Risks** (GAO-22-104824). United States Government Accountability Office.

USGS (2019) **Mineral Commodity Summaries 2019.** U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/70202434>
<https://pubs.usgs.gov/publication/70202434>

WRF/RMF (2023) **Extractive commodity trading report 2023.** World Resources Forum and Responsible Mining Foundation.

WTO (2022) **Trading into a bright energy future. The case for open, high-quality solar PV markets.** Report. https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/energyfuture2021_e.pdf

Wer sind wir?

Die **Akademien der Wissenschaften Schweiz** sind ein Verbund der fünf wissenschaftlichen Akademien der Schweiz: der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), der Schweizerischen Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW), der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW), der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) und der Jungen Akademie Schweiz JAS. Sie umfassen nebst den Akademien die Kompetenzzentren TA-SWISS und Science et Cité sowie weitere wissenschaftliche Netzwerke. Die Akademien der Wissenschaften Schweiz vernetzen die Wissenschaften regional, national und international. Sie vertreten die Wissenschaftsgemeinschaften disziplinär, interdisziplinär und unabhängig von Institutionen und Fächern. Ihr Netzwerk ist langfristig orientiert und der wissenschaftlichen Exzellenz verpflichtet. Sie beraten Politik und Gesellschaft in wissenschaftsbasierten und gesellschaftsrelevanten Fragen.

Die **Erweiterte Energiekommission** der Akademien der Wissenschaften Schweiz fördert und koordiniert die Diskussion und den Wissensaustausch zu den Themen Energie und nachhaltige Nutzung von Ressourcen innerhalb der Forschungsgemeinschaft und pflegt den Dialog mit Politik und Gesellschaft. Sie sucht die Zusammenarbeit mit Schweizer Hochschulen und Fachhochschulen und unterhält ein Netzwerk der Schweizer Forschungsgemeinschaft zum Thema Energie.

