

## Bericht

des Ausschusses für Forschung, Technologie, Raumfahrt  
und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)  
gemäß § 56a der Geschäftsordnung

### Technikfolgenabschätzung (TA)

**Seltene Erden – die Versorgungslage unter Berücksichtigung geopolitischer Risiken und der Fortschritte beim Recycling sowie der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft**

#### Inhaltsverzeichnis

|   | Seite |
|---|-------|
| <b>Vorwort des Ausschusses</b> .....  | 3     |
| <b>Das Wichtigste in Kürze</b> .....  | 7     |
| <b>1 Einleitung</b> .....   | 10    |
| <b>2 Charakterisierung und Gewinnung seltener Erden</b> .....                     | 12    |
| 2.1 Eigenschaften .....   | 12    |
| 2.2 Vorkommen.....  | 13    |
| 2.3 Abbau und Weiterverarbeitung.....   | 20    |
| <b>3 Seltene Erden als Basis von Zukunftstechnologien</b> .....                   | 27    |
| 3.1 Transformationstechnologien .....   | 28    |
| 3.2 Voraussichtliche Nachfrageentwicklung .....                                   | 28    |
| 3.3 Substitution.....   | 29    |
| <b>4 Strategische Souveränität: seltene Erden im geopolitischen Kontext</b> ..... | 32    |
| 4.1 Exportbeschränkungen und Handelsbarrieren .....                               | 32    |
| 4.2 CRMA .....  | 33    |
| 4.3 Marktgestaltung .....   | 38    |

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

|     | Seite   |
|-----|---|
| 5   | Recycling von seltenen Erden und Etablierung einer<br>Kreislaufwirtschaft ..... 40  |
| 5.1 | Stand der Technik..... 40   |
| 5.2 | Voraussetzungen und Herausforderungen beim Recyceln ..... 44  |
| 5.3 | Ausblick: Recycling im Jahr 2035..... 45  |
| 6   | Szenarien 2035: Mehr Souveränität bei seltenen Erden? ..... 48  |
| 6.1 | Blockierte Souveränitätswende: Chinas Dominanz und Europas<br>Zögern verhindern Diversifizierung ..... 48   |
| 6.2 | Fragmentierte Souveränitätswende: Neue Bezugsquellen und<br>eigene Verarbeitungsstufen eröffnen begrenzte<br>Handlungsspielräume ..... 50               |
| 6.3 | Proaktive Souveränitätswende: Reserven, Kreislaufstrategien,<br>Substitution und vorausschauendes Handeln stärken die<br>europäische Resilienz ..... 52 |
| 7   | Handlungsperspektiven ..... 54  |
| 8   | Literatur ..... 57  |
| 9   | Anhang ..... 62   |
| 9.1 | Interviewpartner/innen..... 62  |
| 9.2 | Expert/innen Szenarioworkshop..... 62   |
| 9.3 | Abbildungen ..... 63  |
| 9.4 | Tabellen ..... 63   |
| 9.5 | Kästen ..... 63   |

## Vorwort des Ausschusses

Seltene Erden sind unverzichtbar für die zentralen Zukunftstechnologien der sogenannten 3D-Transformation – Digitalisierung, Dekarbonisierung und demografischer Wandel – sowie für moderne Militärausrüstung.

In den 1990er Jahren begann China, die Förderung der Seltenerdminerale bzw. Seltenerdmetalle massiv auszubauen. Heute hat das Land eine marktbeherrschende Position inne: 70 % der seltenen Erd-Oxide stammen aus China, und 90 % der globalen Wertschöpfung bei der Raffination bzw. Weiterverarbeitung finden dort statt. China ist zudem Vorreiter beim Recycling seltener Erden. Erstmals 2010 und erneut seit 2023 setzt China seine Marktmacht in geopolitischen und geoökonomischen Konflikten spürbar als Druckmittel ein.

Vor diesem Hintergrund initiierte der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (20. WP) eine TA-Kompakt-Studie zum Thema „Seltene Erden – die Versorgungslage unter Berücksichtigung geopolitischer Risiken und der Fortschritte beim Recycling sowie der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft“. Die Untersuchung wurde vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) durchgeführt, um eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die parlamentarische Meinungsbildung zu schaffen.

Der vorliegende Bericht bietet einen Überblick über die besonderen Eigenschaften und die Gewinnung seltener Erden, ihre Verwendung in Zukunftstechnologien sowie Substitutionsmöglichkeiten. Zudem beleuchtet er, welche Abhängigkeiten entlang der Wertschöpfungs- und Lieferkette bestehen und welche Ansätze für mehr Roststoffsouveränität angesichts aktueller geopolitischer Entwicklungen möglich sind. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Potenzial von Recycling und der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft. Auf Basis der in der TA-Kompakt-Studie gewonnenen Erkenntnisse wurden zudem drei alternative Szenarien zur Rohstoffsouveränität im Hinblick auf seltene Erden aus EU-Perspektive entwickelt.

Um mittelfristig mehr strategische Souveränität zu erreichen, werden Maßnahmen diskutiert, die an seltenen Erden ansetzen, die sich bereits in der EU befinden (Recycling, Reserve) bzw. die auf eine Verminderung der Nachfrage abzielen (Substitution). Als langfristige Handlungsperspektive wird auch die finanzielle Unterstützung von Bergbauprojekten außerhalb Chinas in Erwägung gezogen.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem Bericht eine aktuelle und fundierte Informationsgrundlage zu einem Themenfeld, das für Wirtschafts- und Handelspolitik, Außen- und Entwicklungspolitik, Verteidigungspolitik, Umweltpolitik und Fragen der Rohstoff- und Technologiesouveränität von strategischer Bedeutung ist.

Berlin, den 22. April 2026

**Prof. Dr. Karl Lauterbach**  
Vorsitzender

**Prof. Dr. Reza Asghari**  
Berichtersteller

**Prof. Dr.-Ing. habil.  
Michael Kaufmann**  
Berichtersteller

**Oliver Kaczmarek**  
Berichtersteller

**Dr. Andrea Lübcke**  
Berichterstellerin

**Sonja Lemke**  
Berichterstellerin

*Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.*

Simone Ehrenberg-Silies  
Tobias Hungerland

unter Mitarbeit von  
Susann Bernhold  
Nikolas Hubel

**Seltene Erden – die Versorgungslage unter  
Berücksichtigung geopolitischer Risiken und  
der Fortschritte beim Recycling sowie  
der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft**

*Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.*

*Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.*

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie dem Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

## Das Wichtigste in Kürze

### Sechs Fragen – sechs Antworten

1. Was sind seltene Erden und was macht sie so besonders?
  - Seltene Erden sind Mineralien bzw. Metalle. 16 Elemente des chemischen Periodensystems werden ihnen zugerechnet. Sie werden in leichte, mittelschwere und schwere seltene Erden unterschieden.
  - Seltene Erden sind – anders, als die Bezeichnung suggeriert – keinesfalls selten. Schätzungen gehen davon aus, dass die weltweiten Reserven in etwa 100 Mio. t betragen. Einzelne Elemente wie Cer kommen sogar häufiger in der Erdkruste vor als Kupfer.
  - Der größte Anteil des weltweiten Verbrauchs seltener Erden geht auf die Magnetherstellung zurück (44,3 %). Hierfür werden die seltenen Erdelemente (SEE) Neodym, Praseodym, Samarium, Lanthan, Terbium und Dysprosium benötigt. Die Magnete werden in der Konstruktion von Motoren und Generatoren für Windräder, Elektro- und Hybridfahrzeuge, in Festplatten, Lautsprechern sowie für Kernspintomografen eingesetzt. Insofern sind SEE vor allem für die Sektoren Erneuerbare Energien und E-Mobilität relevant. Ebenso spielen sie in moderner Militärtechnologie eine wichtige Rolle.
  - Seltene Erden sind für zahlreiche Zukunftstechnologien relevant, die im Umgang mit der 3D-Transformation (Digitalisierung, Dekarbonisierung und demografischer Wandel) unterstützen. Seltene Erden sind auch für moderne Militärtechnik von Bedeutung.
2. Welche Abhängigkeiten bestehen entlang der Wertschöpfungs- und Lieferkette?
  - China hat eine marktbeherrschende Stellung bei seltenen Erden inne. Auch Deutschland ist massiv von chinesischen Importen abhängig insbesondere im Hinblick auf seltene Erdmetalle.
  - Reserven seltener Erden befinden sich überwiegend in China. Auch in Brasilien, Indien und Australien existieren nennenswerte Vorkommen.
  - Heutzutage werden mit 270.000 t seltener Erdoxide (Rare Earth Oxides – REO) 70 % der weltweit abgebauten Menge in China gefördert, wo sich 15 der weltweit etwa 40 aktiven Bergbaustandorte befinden. Mit großem Abstand folgen die USA (45.000 t REO), Myanmar (31.000 t REO), Australien, Nigeria und Thailand (jeweils 13.000 t REO). Kleine Mengen werden auch von Indien (2.900 t REO), Russland (2.500 t REO), Madagaskar (2.000 t REO), Vietnam (300 t REO), Malaysia (130 t REO) und Brasilien (20 t REO) abgebaut.
  - Nur 19 Bergbauprojekte außerhalb Chinas werden als weit fortgeschritten eingestuft. Die Zeitspanne von der Exploration bis zur Produktion einer Mine umfasst typischerweise Jahrzehnte.
  - Die Dominanz Chinas bei der Raffination bzw. Weiterverarbeitung seltener Erden ist noch weitaus größer als beim Abbau. 90 % der weltweiten Wertschöpfung finden diesbezüglich in China statt.
  - Durch gezielte industriepolitische Maßnahmen zur Integration von Rückgewinnungstechnologien in bestehende Produktionsprozesse ist China inzwischen auch beim Recycling international führend.
  - 2010 hat China durch Exportbeschränkungen für seltene Erden erstmals den westlichen Industrienationen seine Marktmacht demonstriert. 2023 verbot es die Ausfuhr von Technologien zur Gewinnung und Trennung seltener Erden und versuchte, dadurch seine Dominanz zu zementieren. Als Reaktion auf US-amerikanische Exportbeschränkungen für Halbleiter sowie die von den USA erhobenen Strafzölle erließ China im April 2025 und im Oktober 2025 weitere Ausfuhrrestriktionen, die auch seltene Erden und daraus gefertigte Magnete sowie Recyclingtechnologien umfassen. Ende Oktober 2025 kündigte China an, die Exportkontrollen für ein Jahr auszusetzen.
3. Welche Ansätze für mehr Rohstoffsouveränität gibt es und wie tragfähig sind diese?
  - Vor dem Hintergrund der angespannten geopolitischen Situation gewinnen politische Maßnahmen zur Erreichung von Rohstoffsouveränität an Bedeutung.

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

- Die EU strebt mit der Verordnung (EU) 2024/1252<sup>1</sup> (Critical Raw Material Act – CRMA) mehr Rohstoffsoveränität an. Richtwerte, die bis 2030 erreicht werden sollen, sind: 10 % des jährlichen EU-Verbrauchs sollen aus eigenem Bergbau stammen und 25 % aus Recycling gedeckt werden. Zudem sollen 40 % des Verbrauchs, bezogen auf Zwischenbearbeitungsschritte, aus eigener Raffination/Verarbeitung kommen. Maximal 65 % des Jahresverbrauchs eines Rohstoffs sollen noch aus einem einzelnen Drittland kommen. Erreicht werden sollen diese Ziele durch strategische Projekte entlang der Wertschöpfungskette, nationale Explorationsprogramme, Monitoring- und Stresstests für die Versorgungssituation, die Verpflichtung großer Unternehmen zur Risikoprävention, die Stärkung der Kreislaufwirtschaft sowie Handelsabkommen und strategische Partnerschaften.
  - Verschiedene Ansätze zur Marktgestaltung sind vorstellbar, mit denen sich außerhalb Chinas primäre und sekundäre Rohstoffe konkurrenzfähig produzieren lassen könnten und mit denen auf Preisvolatilitäten reagiert werden könnte, etwa die Bildung eines garantierten Referenzpreises mit Gewinnabschöpfung oder eine staatliche Rohstoffreserve.
  - Substitution, bezogen auf Material, Technologie und Funktionalität, kann ebenfalls einen Beitrag zur Rohstoffsoveränität leisten. Zur Verminderung des Bedarfs an schweren SEE in Permanentmagneten wird an nanotechnologischen Möglichkeiten zur besseren Verteilung von Dysprosium und Terbium in Neodym-Eisen-Bor-Magneten sowie an nicht auf SEE basierenden Magnetmaterialien geforscht. In der Anwendung sind bisher vor allem Lösungen relevant, die auf Mengenreduzierung von SEE und die Substituierung von Technologien zielen.
4. Welches Potenzial haben Recycling und die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für mehr Rohstoffsoveränität?
- Eine Wiederverwertung von SEE erfolgt durch Wiederverwendung (Re-Use) oder Recycling, wobei letzteres in rohstoffliche und werkstoffliche Verfahren unterteilt wird. Während Re-Use große, gut zugängliche Magnete erfordert, sind Recyclingprozesse oft energie- und umweltintensiv. Werkstoffliches Recycling kann zudem die Eigenschaften der Magnete verändern. Aktuell ist das Recycling wirtschaftlich nur bei Permanentmagneten rentabel, nicht jedoch bei anderen SEE-haltigen Komponenten.
  - Recyclingunternehmen stehen vor der Herausforderung, mit Primärrohstoffen preislich konkurrieren zu müssen. Rezyklate sind derzeit meist teurer. Zusätzlich erschweren geringe Mengen an Altmagneten und die Heterogenität der Stoffströme die Rückgewinnung. Viele SEE-haltige Produkte, wie Windkraftanlagen oder E-Auto-Motoren, haben das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht. Zudem fehlt in der EU ein geschlossenes Verwertungssystem. Ohne eigene Weiterverarbeitung müssen recycelte SEE oder Oxide, Legierungen und Komponenten wieder nach China exportiert werden.
  - China ist bereits Vorreiter bei der Integration von Rückgewinnungstechnologien in bestehende Produktionsprozesse. Auch in Europa könnten gezielte industriepolitische Maßnahmen und die erwartete Zunahme an End-of-Life-Materialien das Recycling voranbringen. Prognosen zufolge ließe sich in etwa 10 Jahren bis zu einem Drittel der SEE-Nachfrage durch Recycling decken, vorausgesetzt, die wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen entwickeln sich entsprechend.
5. Wie könnten sich Liefer- und Wertschöpfungsketten bei seltenen Erden in den nächsten 10 Jahren entwickeln? Welche Szenarien sind wahrscheinlich?
- Entwicklungen in den Bereichen Bergbau, Verarbeitung/Raffination, Recycling/Kreislaufwirtschaft, Substitution, Handels- und Zollpolitik, Nachfrage sowie Marktgestaltung werden Liefer- und Wertschöpfungsketten – und damit den Grad der Rohstoffsoveränität – maßgeblich beeinflussen. Diese Faktoren stellen zentrale Stellgrößen für die Versorgung mit seltenen Erden dar: Es sind Schlüsselfaktoren. Für jeden von ihnen sind unterschiedliche Entwicklungsmöglichkeiten (Projektionen) plausibel, die auf Basis der Unterkapitel erarbeitet wurden. Im Rahmen eines schlüsselfaktorbasierten Szenarioansatzes lassen sich diese Projektionen zu drei konsistenten Szenarien bündeln.
  - *Szenario „Blockierte Souveränitätswende“*: Die globale Ordnung im Jahr 2035 hat sich in zwei Blöcke aufgespalten – China und Russland auf der einen Seite, die USA und die EU auf der anderen Seite, wobei die USA und China teilweise als eigenständige Supermächte agieren. Sicherheit hat Vorrang vor

<sup>1</sup> Verordnung (EU) 2024/1252 vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020

Nachhaltigkeit. Die Nachfrage nach seltenen Erden verschiebt sich deshalb von grünen Technologien hin zum militärischen Bereich und steigt nur verhalten an. Afrikanische und asiatische Länder schließen lieber mit den USA und China Rohstoffpartnerschaften als mit der EU. Investitionen in den Rohstoffabbau stagnieren aufgrund der schwachen Nachfrage, geopolitischer Unsicherheiten und chinesischer Gegenstrategien, die die Souveränitätsbestrebungen der EU torpedieren sollen. Chinas bereits gefestigte Stellung im Bergbau und in der Raffination ermöglicht es dem Land, seine Dominanz nachhaltig zu verteidigen. Recycling und Substitution bleiben Randthemen ohne signifikanten Einfluss auf die Versorgungslage. Chinas Marktmacht und Europas Zögerlichkeit verhindern eine relevante Rohstoffunabhängigkeit.

- *Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“*: Die EU sieht sich mit einer multipolaren Weltordnung konfrontiert, in der Länder Klima- und Umweltthemen sehr unterschiedlich priorisieren. Die Nachfrage nach SEE steigt daher nur moderat an. Die EU konkurriert mit vielen Ländern um Rohstoffpartnerschaften, manche kann sie abschließen. China setzt seine Exportkontrollen fort: Mit Förderprogrammen und der Einführung eines Referenzpreismodells wird ein Investitionsklima geschaffen, das Bergbauprojekte außerhalb Chinas ermöglicht. Hiervon profitiert direkt wie indirekt auch die EU. Die Weiterverarbeitungskapazitäten in Europa werden ausgebaut. Durch gezielte politische Maßnahmen entsteht eine europäische Recycling- und Vorproduktinfrastruktur. Stoffströme enden aber häufig noch außerhalb Europas. Es können teilweise Fortschritte in der Substitutionsforschung erzielt werden. Durch neue Bezugsquellen und eigene Verarbeitungsstufen kann die EU ihre Handlungsspielräume bedingt erweitern.
  - *Szenario „Proaktive Souveränitätswende“*: Handels- und Zollkonflikte flauen ab. Die Rückkehr von Klima- und Umweltfragen auf die politischen Agenden lässt die Nachfrage nach SEE beträchtlich zunehmen. Die EU schließt Rohstoffpartnerschaften ab und investiert mittels Public Partnerships in aussichtsreiche Bergbauprojekte. Dies wird dazu beitragen, ihre Versorgung in den 2040er und 2050er Jahren zu sichern. Dass es bis 2035 kaum Fortschritte im Bergbau außerhalb Chinas gegeben hat, verursacht inzwischen kaum Probleme. Denn die EU hatte Mitte der 2020er Jahre noch rechtzeitig ihre Souveränitätsstrategie nachjustiert und konsequent auf Recycling und Substitutionsforschung gesetzt. Als Brückeninstrument zur Dämpfung damaliger, durch China erzeugter Preisvolatilitäten diente die EU-Reserve für SEE. Inzwischen ist die EU gegen die Störung und Unterbrechung von Lieferketten gewappnet: Ein beträchtlicher Teil seltener Erden, die sie benötigt, befindet sich in Art von Reserven und recyclingfähigen Produkten in ihrem Hoheitsgebiet.
6. Welche Handlungsperspektiven lassen sich ableiten?
- Durch Recycling, Kreislaufstrategien, Substitution und den Aufbau einer SEE-Reserve kann mittelfristig die strategische Souveränität der EU bei seltenen Erden erhöht werden. Der Vorteil ist, dass diese Maßnahmen an SEE ansetzen, die sich bereits in der EU befinden bzw. – im Fall von Substitution – auf die Verminderung der Nachfrage abzielen.
  - Die finanzielle Unterstützung von Bergbauprojekten außerhalb Chinas kann langfristig zur Diversifizierung von Bezugsquellen beitragen und ist sinnvoll, sofern in der EU auch Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Primärrohstoffe geschaffen werden.

## 1 Einleitung

- China hat eine marktbeherrschende Stellung bei seltenen Erden inne. Auch Deutschland ist massiv von chinesischen Importen abhängig, insbesondere im Hinblick auf seltene Erdmetalle.
- Vor dem Hintergrund der angespannten geopolitischen Situation gewinnen politische Maßnahmen zur Erreichung von Rohstoffsoveränität an Bedeutung.

Seltene Erden sind für Deutschland zentral, um die Energie- und Mobilitätswende umzusetzen sowie die Digitalisierung weiter voranzutreiben. Ihr Vorkommen ist weltweit verteilt, die größten Reserven befinden sich allerdings in wenigen Ländern. Auch der Abbau und die Weiterverarbeitung werden in nur wenigen Staaten durchgeführt, wobei China diesbezüglich eine marktbeherrschende Stellung einnimmt. 49 % der frühen Gewinnungs- oder Verarbeitungsstufen seltener Erden (Seltenerdchemikalien mit relativ niedriger Seltenerdoxidkonzentration) und 84 % der weiterverarbeiteten Zwischenprodukte (Seltenerdmetalle) führt Deutschland aus China ein (Bähr et al. 2024, S. 43). Ende 2023 verschärfte China seine Exportgesetze und untersagte die Ausfuhr von Technologien zur Verarbeitung von seltenen Erden. Expert/innen vermuten, dass diese Maßnahme mit dem Ziel verbunden sein könnte, weiterhin die gesamte Wertschöpfungskette zu kontrollieren.

Seltene Erden werden bisher von Deutschland ausschließlich als weiterverarbeitete Produkte importiert, für die eine Lagerhaltung aufgrund chemischer Eigenschaften wie chemische Instabilität und Toxizität herausfordernd und daher kaum verbreitet ist, sodass kurzfristige Verknappungen bisher nicht ausgeglichen werden können. Vor dem Hintergrund der aktuellen geopolitischen Situation ist es deshalb umso dringlicher, dass sich Deutschland und Europa im Sinne der Risikominimierung aus der Abhängigkeit von einem einzelnen Anbieterstaat befreien. Aufgrund weniger alternativer Anbieter wird dies jedoch nicht durch Diversifizierung allein möglich sein. Im Themenkurzprofil Nr. 69 „Seltene Erden: Rohstoffsicherung und Potenziale der Gewinnung in Europa“ (TAB 2024) wurden hierzu verschiedene Strategien überblicksartig beschrieben: die Erschließung heimischer Lagerstätten, das Recycling seltener Erden und der Aufbau einer europäischen Kreislaufwirtschaft.

### Zielstellung

Zur Weiterbearbeitung und Vertiefung der Inhalte des Themenkurzprofils wird in dieser TA-Kompakt-Studie das Thema der Rohstoffsoveränität mit Fokus auf Recycling und Kreislaufwirtschaft von seltenen Erden analysiert:

Die Auseinandersetzung erfolgt anhand von sechs Leitfragen:

- Was sind seltene Erden und was macht sie so besonders?
- Welche Abhängigkeiten bestehen entlang der Wertschöpfungs- und Lieferkette?
- Welche Ansätze für mehr Rohstoffsoveränität gibt es und wie tragfähig sind diese?
- Welches Potenzial haben Recycling und die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für mehr Rohstoffsoveränität?
- Wie könnten sich Liefer- und Wertschöpfungsketten bei seltenen Erden in den nächsten 10 Jahren entwickeln? Welche Szenarien sind wahrscheinlich?
- Welche Handlungsperspektiven lassen sich ableiten?

### Vorgehensweise

Die vorliegende TA-Kompakt-Studie wurde in vier aufeinander aufbauenden methodischen Schritten bearbeitet:

Im ersten Schritt erfolgten eine umfassende Literaturrecherche und Literaturanalyse. Hierzu wurden Berichte, Studien und wissenschaftliche Publikationen zu seltenen Erden zu den zuvor genannten Leitfragen ausgewertet.

Im zweiten Schritt wurden sechs Interviews mit relevanten Expert/innen aus Wissenschaft, Industrie und Verbänden aus den Bereichen Geopolitik, Herstellung und Produktion, Kreislaufwirtschaft und Recycling geführt.

Auf Grundlage der aus der Desktoprecherche und den Experteninterviews gewonnenen Informationen wurden mithilfe eines schlüsselfaktorbasierten Szenarioansatzes drei alternative Szenarien zur Rohstoffsoveränität in Bezug auf seltene Erden aus EU-Perspektive entwickelt. Hierfür wurden unterschiedliche Projektionen, also wahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeiten, für sieben Schlüsselfaktoren entworfen. *Als Schlüsselfaktoren, also maßgebliche Einflussfaktoren, für die SEE-Souveränität konnten Bergbau, Raffination/Verarbeitung, Recycling/Kreislaufwirtschaft, Substitution, Handels- und Zollpolitik, Nachfrage sowie Marktgestaltung identifiziert*

werden. Die drei Projektionen pro Schlüsselfaktor wurden aus den Inhalten der Unterkapitel dieser Studie abgeleitet und werden am Ende der einschlägigen Unterkapitel in den Kästen 2.1, 2.2, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2 und 5.1 dargestellt. Für jede Projektion wird eine plausible Entwicklungsmöglichkeit (Ausprägung) genannt und in einigen Sätzen beschrieben. Zur Entwicklung der Szenarien wurden die einzelnen Projektionen in einem morphologischen Kasten abgetragen und zu konsistenten Projektionsbündeln kombiniert. Dabei wurden diejenigen Projektionen zu einem Projektionsbündel zusammengefasst, die in Kombination miteinander möglichst kaum oder gar keine immanenten Widersprüche aufweisen. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit sind die Projektionen in den Kästen bereits denjenigen Szenarien zugeordnet, in denen sie in Kapitel 6 aufgegriffen werden.

Wie viele andere Szenarien basieren auch die drei in dieser TA-Kompakt-Studie entwickelten Szenarien sowohl auf Daten als auch auf Erfahrungswissen und subjektiven Annahmen des Autorenteam. Ihre Erstellung ist Konstruktionsarbeit (Kosow/Gaßner 2008, S. 10). Mit Szenarien wird nicht die Absicht verfolgt, Ereignisse genau vorherzusagen: Sie sind keine Prognosen (Pillkahn 2007, S. 170). Es handelt sich bei ihnen vielmehr um hypothetische Zukunftsbilder (Pillkahn 2007, S. 168), die Entscheidungsträger/innen aufzeigen sollen, welche Chancen und Risiken in Zukunft entstehen könnten und welche Weichenstellungen und Rahmensetzungen vorgenommen werden können, um wünschenswerte Entwicklungen zu fördern (Opiela et al. 2018, S. 4 f.). Dadurch können sie als Grundlage für die Beschreibung von Handlungsperspektiven und die Entwicklung von Handlungsoptionen genutzt werden.

Die vorliegenden Szenarien wurden in ihrer Rohform in einem Workshop mit neun Expert/innen diskutiert, validiert und weiterentwickelt.

Die Ergebnisse der vier Arbeitsschritte wurden abschließend für die Berichterstellung aufbereitet.

### **Aufbau des Berichts**

In Kapitel 2 werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften und Unterscheidungsmerkmale seltener Erden vorgestellt. Anschließend erfolgt eine geografische Einordnung der weltweit verfügbaren Reserven, der aktuellen Bergbauförderung sowie geplanter Projekte und der Weiterverarbeitung. Besonderes Augenmerk gilt dabei den bestehenden Abhängigkeiten und möglichen Diversifikationspotenzialen.

Darauf aufbauend wird die Bedeutung seltener Erden für Zukunftstechnologien analysiert. Zudem wird eine Einschätzung zur zukünftigen Nachfragentwicklung vorgenommen, ergänzt um einen Blick auf Substitutionsmöglichkeiten (Kapitel 3). Es folgt die Betrachtung der geopolitischen Rolle seltener Erden sowie der strategischen Ansätze der EU zur Stärkung der Rohstoffsouveränität (Kapitel 4).

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Bedeutung von Recycling und Kreislaufwirtschaft für mehr Unabhängigkeit (Kapitel 5). Im Anschluss werden drei Szenarien entwickelt, die unterschiedliche Souveränitätsniveaus Europas im Umgang mit seltenen Erden bis 2035 sowie die möglichen Entwicklungspfade dorthin aufzeigen (Kapitel 6).

In Kapitel 7 werden aufbauend auf den Szenarien Handlungsperspektiven zur Erreichung von mehr strategischer Souveränität bei seltenen Erden diskutiert.

### **Danksagung**

Wir bedanken uns sehr herzlich bei den Expert/innen, die mit ihrem Engagement für Interviews und den Workshop zur Verfügung standen. Ein ebenso herzlicher Dank geht an Reinhard Grünwald und Arnold Sauter für die Durchsicht des Berichtsentwurfs und hilfreiche Verbesserungsvorschläge sowie Ulrike Goelsdorf für die Durchsicht und Gestaltung der Endfassung des Manuskripts, außerdem Jost Lüddecke für das Lektorat sowie Anne-Sophie Piehl für die Grafikgestaltung.

## 2 Charakterisierung und Gewinnung seltener Erden

- Seltene Erden sind Mineralien bzw. Metalle. 16 Elemente des chemischen Periodensystems werden ihnen zugerechnet. Sie werden in leichte, mittelschwere und schwere seltene Erden unterschieden.
- Seltene Erden sind – anders als die Bezeichnung suggeriert – keinesfalls selten. Schätzungen gehen davon aus, dass die weltweiten Reserven etwa 100 Mio. t betragen. Einzelne Elemente wie Cer kommen sogar häufiger in der Erdkruste vor als Kupfer.
- Reserven seltener Erden befinden sich überwiegend in China. Auch in Brasilien, Indien und Australien existieren nennenswerte Vorkommen.
- Heutzutage werden mit 270.000 t seltener Erdoxide (REO) 70 % der weltweit abgebauten Menge seltener Erden in China gefördert, wo sich 15 der weltweit etwa 40 aktiven Bergbaustandorte befinden. Mit großem Abstand folgen die USA (45.000 t REO), Myanmar (31.000 t REO), Australien, Nigeria und Thailand (jeweils 13.000 t REO). Kleine Mengen werden auch von Indien (2.900 t REO), Russland (2.500 t REO), Madagaskar (2.000 t REO), Vietnam (300 t REO), Malaysia (130 t REO) und Brasilien (20 t REO) abgebaut.
- Nur 19 Bergbauprojekte außerhalb Chinas werden als weit fortgeschritten eingestuft. Die Zeitspanne von der Exploration bis zur Produktion einer Mine umfasst typischerweise Jahrzehnte.
- Die Dominanz Chinas bei der Raffination bzw. Weiterverarbeitung seltener Erden ist noch weitaus größer als beim Abbau: 90 % der weltweiten Wertschöpfung finden dort statt.

Die seltenen Erden (Rare Earths) sind Mineralien bzw. Metalle, die aus bestimmten chemischen Elementen bestehen (ISE 2023; TAB 2024, S. 1; Tradium GmbH o. J.; WD 2022, S. 4 ff.). Der Begriff seltene Erden ist insofern irreführend, da die Elemente insgesamt relativ häufig in der Erdkruste vorkommen und der Begriff Erden während des 18. Jahrhunderts, als seltene Erden zuerst entdeckt wurden, für die Bezeichnung von Oxiden genutzt wurde (WD 2022, S. 4). Als selten gelten die Elemente deswegen, weil ihr Abbau aufgrund der jeweiligen Vorkommnisse in der Regel nur in wenigen Fällen wirtschaftlich rentabel möglich ist (TAB 2024, S. 1; WD 2022, S. 4). Seit mehr als 30 Jahren werden seltene Erden in Hochtechnologieprodukten verwendet (Bhattacharai et al. 2024, S. 2).

### 2.1 Eigenschaften

Zu den seltenen Erden werden üblicherweise 16 Elemente des chemischen Periodensystems gezählt (Abbildung 2.1), mitunter auch das Element Scandium (Sc). Da es aber andere chemische und geologische Eigenschaften und Verwendungsbereiche (insbesondere Legierungen) hat und weil dessen Vorkommen keine anderen seltenen Erden enthält (DERA 2025, S. 12, 14), wird es gelegentlich bei der Aufzählung weggelassen. Die seltenen Erdelemente (SEE) können ihrerseits unterteilt werden in leichte, mittelschwere und schwere SEE.<sup>2</sup> Die Unterteilung basiert unter anderem auf der Häufigkeit des Vorkommens (leichte SEE kommen häufiger vor als mittelschwere und schwere SEE), den chemischen Eigenschaften (unter anderem Ordnungszahl) sowie den potenziellen Anwendungen.

<sup>2</sup> Häufig wird nur eine Einteilung in leichte und schwere SEE vorgenommen. Die Untergruppe der mittelschweren SEE wird dabei den schweren SEE zugeordnet. Diese Zweiteilung wird daher auch im weiteren Berichtsverlauf übernommen.

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Abbildung 2.1 Seltene Erden im Periodensystem der Elemente

The periodic table shows the following classification of rare earth elements (REE) based on color coding:

- Leichte seltene Erden (Light REE):** Elements 57 (La) to 71 (Lu), highlighted in light blue.
- Mittelschwere seltenen Erden (Medium-heavy REE):** Elements 58 (Ce) to 63 (Eu), highlighted in dark blue.
- Schwere seltene Erden (Heavy REE):** Elements 64 (Gd) to 71 (Lu), highlighted in grey.

Legend:

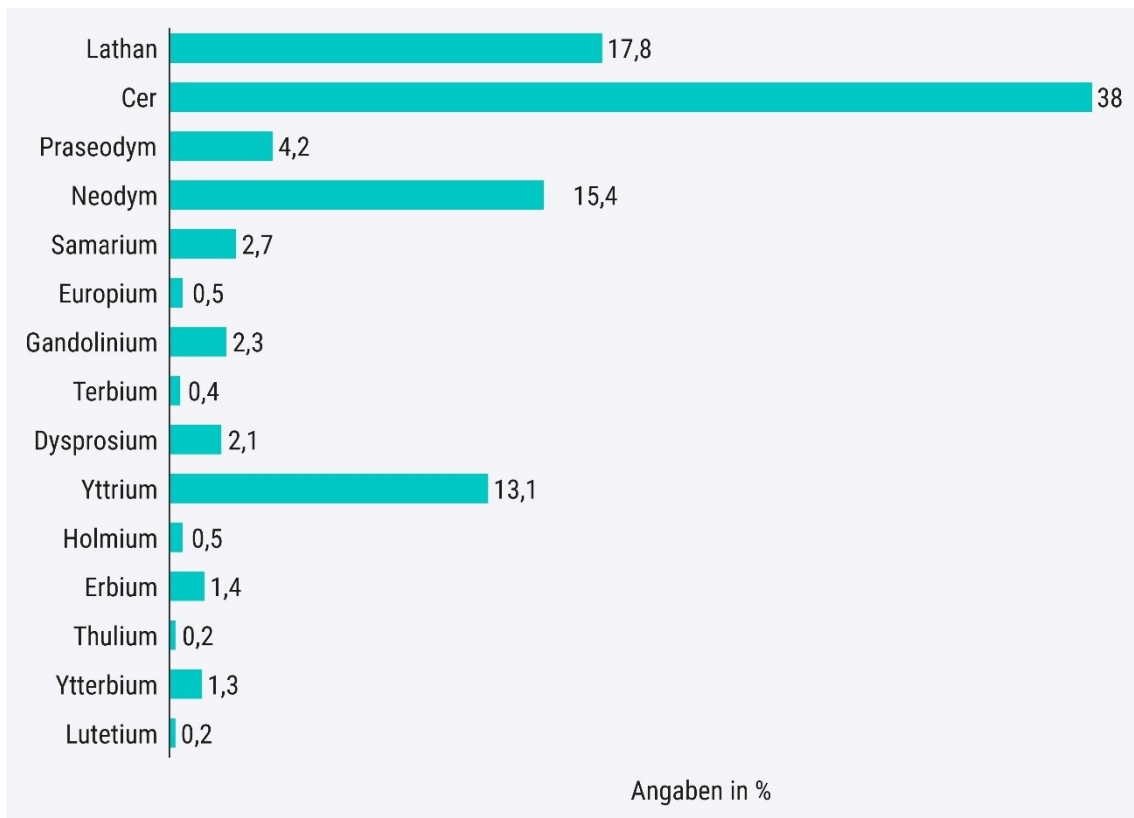
- leichte seltene Erden
- mittelschwere seltenen Erden
- schwere seltene Erden

Eigene Darstellung nach DERA (2025, S. 15)

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften seltener Erden variieren von Element zu Element. Mit Ausnahme von Promethium (Pm) treten alle Elemente in der Natur auf. Promethium kann nur durch eine Kernreaktion erzeugt werden und ist radioaktiv, kurzlebig und praktisch von geringer ökonomischer Relevanz (Brückner 2021, S. 5 f.; DERA 2025, S. 14). In elementarer Form erscheinen die SEE eisengrau bis silbrig glänzend; je reiner die einzelnen Elemente sind, desto elastischer sind sie (DERA 2021, S. 302). Europium (Eu) ist das einzige SEE, das unter allen Bedingungen leicht oxidiert, während die anderen Elemente vor allem bei Raumtemperatur oxidieren. Die Geschwindigkeit der Oxidation ist abhängig von der Luftfeuchtigkeit und nimmt mit steigender Luftfeuchtigkeit zu (Brückner 2021, S. 7). In Pulverform können SEE viel Wasserstoff aufnehmen und bei Einwirkung schwacher Säuren lösen sie sich schnell auf (DERA 2021, S. 302). Bei erhöhten Temperaturen entzünden sich SEE und reagieren mit anderen nichtmetallischen Elementen. Die Spanne der Schmelzpunkte ist recht hoch: Sie reicht von 798° C bei Cer bis zu 1.633° C bei Lutetium (DERA 2021, S. 302; ISE 2023). SEE-Metalle sind insbesondere in Pulverform brennbar und explosiv (DERA 2025, S. 15). Ihre spezifischen Eigenschaften haben dazu geführt, dass SEE in verschiedenen Anwendungen genutzt werden, zum Beispiel in Elektromotoren, Permanentmagneten, Lautsprechern oder elektrischen Sensoren (ISE 2023). Eine detaillierte Übersicht folgt in Kapitel 3.

## 2.2 Vorkommen

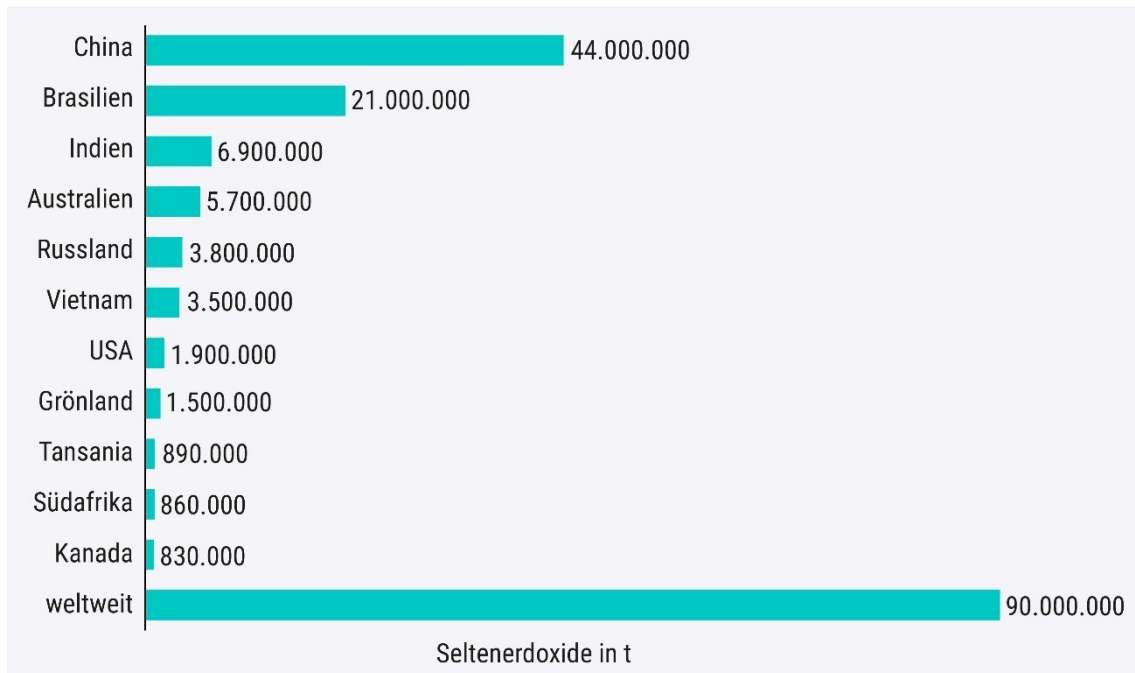
Seltene Erden kommen relativ häufig in der Erdkruste vor (Abbildung 2.2), leichte SEE dabei noch häufiger als schwere SEE (ISE 2023). Einzelne Elemente wie Cer liegen sogar in höherer Konzentration vor als beispielsweise Kupfer (DERA 2025, S. 16).

**Abbildung 2.2** Anteile unterschiedlicher SEE in der Zusammensetzung der oberen Erdkruste

Quelle: nach Bhattarai et al. (2024, S. 2)

SEE sind überall auf der Welt zu finden (Abbildung 2.3), insbesondere in China, den USA, Australien und Russland sowie Kanada, Indien, Südafrika und Südostasien (ISE 2023). Schätzungen gehen davon aus, dass die weltweiten Reserven von SEE, also nachgewiesene Vorkommen, über 100 Mio. t betragen (U.S. Geological Survey 2025, S. 145), wobei der größte Teil davon (ca. 44 Mio. t) in China vermutet wird. Weitere nennenswerte Reserven konnten in Brasilien (ca. 21 Mio. t), Indien (ca. 6,9 Mio. t) und Australien (ca. 5,7 Mio. t) nachgewiesen werden (U.S. Geological Survey 2025, S. 145). Allerdings können sich je nach Abbaudynamik (Ausbeutung bestehender sowie Erschließung neuer Lagerstätten) und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Rohstoffpreise, Nachfrage sowie Erschließungskosten) die bilanzierten Mengen der Reserven verändern (U.S. Geological Survey 2025, S. 207).

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

**Abbildung 2.3 Reserven an seltenen Erden in ausgewählten Ländern 2023**

Quelle: nach U.S. Geological Survey (2025, S. 145)

In Deutschland werden mehrere Forschungs- und Explorationsvorhaben zu SEE durchgeführt, etwa in Sachsen (Storkwitz und Eichigt), Bayern (zum Beispiel Fichtelgebirge), Baden-Württemberg (Kaiserstuhl), Niedersachsen (Harz) und in Mecklenburg-Vorpommern (Ostseesande). Nach bisherigen Erkenntnissen scheint die Gewinnung von seltenen Erden aus diesen Vorkommen jedoch nicht wirtschaftlich zu sein (Henning et al. 2024, S. 12 f.; DERA 2025, S. 110 f.).

Der Abbau von seltenen Erden setzt voraus, dass die jeweiligen Lagerstätten bestimmten Anforderungen genügen (Tabelle 2.1). Dazu gehören nicht nur betriebswirtschaftliche Kriterien, sondern auch klimatische und infrastrukturelle Bedingungen. Das wesentliche Kriterium ist aber der wirtschaftliche Mindestabbauehalt. Hier hat sich aufgrund der Dominanz chinesischer Vorhaben und Bergbauunternehmen die dort genutzte Einteilung durchgesetzt bzw. kann auf andere Lagerstätten weltweit übertragen werden. Damit sich ein Abbau lohnt, sollte der Mindestgehalt seltener Erden 1 % betragen sowie der Inhalt der Lagerstätte mindestens 100.000 t (DERA 2025, S. 39 ff.).

Von der Exploration bis zur Herstellung von SEE-Produkten vergehen zumeist mehrere Jahrzehnte. Die Ankündigungen von Produktionsstarts durch Bergbauunternehmen sind bisher häufig zu optimistisch und können nicht eingehalten werden, etwa weil Investitionen ausbleiben und/oder kein Zugang zu chinesischem Know-how besteht (DERA 2025, S. 43).

**Tabelle 2.1 Kriterien für die Lagerstättenwahl**

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| betriebswirtschaftliche Kriterien | Aufwand und Kosten für die Ausbeutung der Lagerstätte, Zugang zu Finanzmitteln, etwas als Kredite oder Zuschüsse, Vorkommen weiterer Wertminerale, Transportkosten für Material, Maschinen und Menschen, Konzept und Finanzierung: Welche Wertschöpfungstiefe wird angestrebt und welche Kosten sind damit verbunden?  |
| klimatische Kriterien             | Gemäßigte klimatische Bedingungen sind (sub)arktischen oder (sub)tropischen Klimaten vorzuziehen, da dort extreme Anforderungen an Menschen und Material bzw. Maschinen gestellt werden.   |
| infrastrukturelle Kriterien       | Erreichbarkeit: fehlende bzw. erst einzurichtende Zufahrtswege, notwendiger Aufbau von Strom- und Wasserversorgung   |
| geologische Kriterien             | Aufwand für die Gewinnung und Weiterverarbeitung, Mindestabbaugehalt, der einen Abbau wirtschaftlich rentabel macht  |
| sonstige Kriterien                | Know-how, insbesondere bezogen auf die chemische Aufbereitung des SEE-Mineralkonzentrats und Separation, Länderrisiko: Regierungsführung im Produktionsland, Bergbaugesetzgebung, Umwelt- und Sozialrisiken, zum Beispiel potenziell negative Auswirkungen auf Ökosysteme, radioaktive oder chemische Kontamination und fehlende Akzeptanz von Abbauaktivitäten durch die lokale Bevölkerung |

Quelle: nach DERA (2025, S. 41 ff.)

Auf Grundlage der zuvor genannten Kriterien können zurzeit lediglich 19 Bergbauprojekte außerhalb Chinas als weit fortgeschritten betrachtet werden (DERA 2025, S. 12). Selbst für sechs dieser weit fortgeschrittenen Projekte wird der Produktionsbeginn jedoch als unrealistisch eingeschätzt (Zeile „Projektstand“ Tabelle 2.2): Dies sind Elk Creek (USA), Kringlerne (Grönland), Dong Pao (Vietnam), Kvanefjeld (Grönland), Tomtor (Russland) und Lofdal (Namibia). Bei vier der am weitesten fortgeschrittenen Bergbauprojekte sind zudem chinesische Unternehmen Lizenzinhaber bzw. an Unternehmen beteiligt, die die Lizenz für den Abbau erworben haben (chinesische Anteile im Folgenden in Klammern):

- Phaxay (Laos): (86 %) (DERA 2025, S. 193 f.)
- Ngualla (Tansania): (42 %) (DERA 2025, S. 189 f.)
- Nechalecho (Kanada): zwei Abbauzonen: Basal Zone (0 %); Upper Zone (9,9 %) (DERA 2025, S. 187 f.)
- Kvanefjeld (Grönland): Gesamtanteil unklar, chinesische Anteile bei einem von zwei Lizenzinhabern 10,5 % (DERA 2025, S. 181 f.)

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

**Tabelle 2.2      Übersichtsdarstellung und Ranking der am weitesten fortgeschrittenen Bergbauprojekte außerhalb Chinas nach 20 Kriterien**

|   | Eneabba – Australien | Dubbo – Australien | Toliara – Madagsakar | Bear Lodge – USA | Phaxay – Laos <sup>24)</sup> | Ngualla – Tansania | Lofdal – Namibia <sup>24)</sup> | Nolans – Australien | Tomtor – Russland | Zandkopsdrift – Südafrika | Browns Range – Australien <sup>24)</sup> | Longonjo – Angola | Nechalecho – Kanada <sup>24)</sup> | Kvanefjeld – Grönland | Yangibana – Australien | Dong Pao – Vietnam | Kringlerne – Grönland <sup>24)</sup> | Strange Lake – Kanada <sup>24)</sup> | Elk Creek – USA |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|--|-------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| SE-Endprodukt <sup>1)</sup>               | ++                   | ++                 | --                   | +                | +                            | --                 | +                               | +                   | +                 | +                         | --                                       | +                 | ++                                 | +                     | +                      | ++                 | --                                   | ++                                   | --              |
| Infrastruktur Vorkommen <sup>2)</sup>     | +                    | +                  | --                   | o                | --                           | --                 | --                              | --                  | --                | --                        | --                                       | -                 | --                                 | --                    | --                     | --                 | --                                   | --                                   | +               |
| Konzept <sup>3)</sup>                     | ++                   | ++                 | +                    | ++               | o                            | +                  | +                               | +                   | -                 | +                         | +  | +                 | -                                  | +                     | +                      | --                 | --                                   | -                                    | --              |
| Klima <sup>4)</sup>                       | ++                   | ++                 | +                    | ++               | o                            | o                  | -                               | -                   | --                | -                         | -  | o                 | --                                 | --                    | -                      | o                  | --                                   | --                                   | ++              |
| Länderrisiko <sup>5)</sup>                | ++                   | ++                 | -                    | +                | -                            | o                  | o                               | ++                  | --                | o                         | ++                                       | -                 | ++                                 | ++                    | ++                     | o                  | ++                                   | ++                                   | +               |
| Aufwand Gewinnung <sup>6), 7)</sup>       | ++                   | o                  | ++                   | -                | ++                           | +                  | o                               | o                   | -                 | o                         | --                                       | o                 | --                                 | o                     | --                     | o                  | o                                    | -                                    | --              |
| Aufwand Aufbereitung <sup>8), 9)</sup>    | ++                   | o                  | ++                   | +                | ++                           | -                  | -                               | o                   | -                 | +                         | +  | o                 | -                                  | -                     | o                      | --                 | +                                    | -                                    | o               |
| Aufwand Separation <sup>10), 11)</sup>    | -                    | o                  | -                    | -                | o                            | o                  | -                               | o                   | o                 | -                         | -  | o                 | -                                  | -                     | o                      | o                  | o                                    | -                                    | o               |
| Radioaktivität <sup>12)</sup>             | --                   | --                 | --                   | +                | ++                           | ++                 | ++                              | --                  | o                 | +                         | ++                                       | -                 | +                                  | --                    | --                     | -                  | ++                                   | +                                    | -               |
| Umwelt-/ Sozialrisiken <sup>13)</sup>     | ++                   | ++                 | ++                   | ++               | -                            | ++                 | ++                              | o                   | --                | ++                        | ++                                       | +                 | ++                                 | --                    | ++                     | o                  | --                                   | --                                   | ++              |
| Größe <sup>14)</sup>                      | --                   | -                  | -                    | o                | o                            | ++                 | o                               | +                   | ++                | o                         | o  | ++                | ++                                 | ++                    | --                     | o                  | ++                                   | ++                                   | --              |
| Gehalt <sup>15)</sup>                     | ++                   | -                  | ++                   | +                | --                           | +                  | +                               | +                   | ++                | +                         | ++                                       | o                 | ++                                 | o                     | -                      | ++                 | ++                                   | ++                                   | --              |
| Wertminerale <sup>16)</sup>               | o                    | ++                 | ++                   | ++               | --                           | ++                 | --                              | +                   | ++                | -                         | --                                       | --                | +                                  | +                     | --                     | o                  | ++                                   | +                                    | +               |
| Projektstand <sup>17)</sup>               | ++                   | o                  | +                    | o                | ++                           | o                  | --                              | o                   | --                | o                         | o  | -                 | o                                  | --                    | o                      | --                 | --                                   | -                                    | --              |
| Investitionskosten <sup>18)</sup>         | --                   | --                 | -                    | o                | o                            | o                  | o                               | --                  | --                | -                         | o  | o                 | --                                 | -                     | o                      | o                  | +                                    | --                                   | --              |
| Finanzierung <sup>19)</sup>               | ++                   | +                  | ++                   | +                | ++                           | +                  | -                               | +                   | -                 | -                         | -  | +                 | --                                 | +                     | +                      | --                 | --                                   | -                                    | --              |
| Bergbauerfahrung <sup>6), 20)</sup>       | ++                   | +                  | ++                   | --               | ++                           | --                 | ++                              | --                  | ++                | --                        | --                                       | --                | --                                 | --                    | --                     | +                  | --                                   | --                                   | --              |
| Aufbereitungserfahrung <sup>7), 21)</sup> | ++                   | +                  | ++                   | o                | ++                           | o                  | +                               | o                   | ++                | --                        | -  | --                | -                                  | o                     | --                     | --                 | --                                   | -                                    | --              |

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

|   |                             |                           |                             |                         |                                    |                           |                                       |                            |                          |                                  |  |                          |  |                             |                               |                           |  |  |                        |   |
|---|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|--|--------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|--|------------------------|---|
|   | <b>Eneabba – Australien</b> | <b>Dubbo – Australien</b> | <b>Toliara – Madagsakar</b> | <b>Bear Lodge – USA</b> | <b>Phaxay – Laos<sup>24)</sup></b> | <b>Ngualla – Tansania</b> | <b>Lofdal – Namibia<sup>24)</sup></b> | <b>Nolans – Australien</b> | <b>Tomtor – Russland</b> | <b>Zandkopsdrift – Südafrika</b> | <b>Browns Range – Australien<sup>24)</sup></b> | <b>Longonjo – Angola</b> | <b>Nechalecho – Kanada<sup>24)</sup></b> | <b>Kvanefeld – Grönland</b> | <b>Yangibana – Australien</b> | <b>Dong Pao – Vietnam</b> | <b>Kringlerne – Grönland<sup>24)</sup></b> | <b>Strange Lake – Kanada<sup>24)</sup></b> | <b>Elk Creek – USA</b> |   |
| Separationserfahrung <sup>8), 22)</sup> | ++                          | +                         | ++ <sup>27)</sup>           | o                       | ++                                 | ++ <sup>25)</sup>         | +                                     | o                          | +                        | --                               | --   | --                       | --                                       | ++ <sup>25)</sup>           | ++ <sup>26)</sup>             | --                        | --   | --   | --                     |   |
| Anmerkungen <sup>23)</sup>              | ++                          | +                         | o                           | o                       | o                                  | -                         | -                                     | -                          | o                        | +                                | o  | -                        | --                                       | --                          | -                             | o                         | --   | --   | --                     | + |
| gesamt                                  | +22                         | +12                       | +11                         | +10                     | +9                                 | +6                        | 0                                     | -2                         | -4                       | -5                               | -6   | -7                       | -7                                       | -7                          | -8                            | -10                       | -12  | -12  | -15                    |   |

Auf einer Skala von -40 bis +40 (Summe der 20 Einzelbewertungen); --- = -2 = sehr schlecht, - = -1, o = 0, + = +1 und ++ = +2 = sehr gut)

Quelle: DERA (2025, S. 242)

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

## Erläuterungen zu Tabelle 2.2

- 1) SE-Mineralkonzentrat bzw. keine Information: --, SE-Mischkonzentrat unbekannter Art: -, verschiedene SE-Mischkonzentrate: o, SE-Mischkarbonat, SE-Mischoxalat, nur einige separierte Oxide (leichte SEO) oder Ähnliches: +, separierte SEO oder Ähnliches: ++
- 2) keinerlei Infrastruktur: --, geringe Infrastruktur: -, zum Teil vorhandene Infrastruktur: o, größtenteils vorhandene Infrastruktur: +, ausgezeichnete Infrastruktur: ++
- 3) unlogisches oder fehlendes Konzept: --, aufwändiges Konzept: -, Teilkonzept: o, gut durchdachtes Teilkonzept: +, schlüssiges, vollständiges, gut durchdachtes Konzept: ++
- 4) arktisches bzw. subarktisches Klima: --, arides bzw. semiarides Klima: -, tropisches bzw. subtropisches Klima: o, kühles bzw. heißes Klima: +, mediterranes bzw. temperiertes Klima: ++
- 5) nach (World Bank Group 2024)
- 6) Gewinnung in dieser Studie: bergmännische Förderung des SE-Erzes oder anderen Gesteins
- 7) Untertagebergbau: --, selektiver Festgesteinsabbau: -, Festgesteinsabbau: o, Lockergesteinsabbau: +, Seifenabbau: ++
- 8) Aufbereitung in dieser Studie: physikalische oder physikalisch-chemische Abtrennung der SE-Mineralerale aus dem Erz und Herstellung eines möglichst hoch angereicherten SE-Mineralkonzentrats zur besseren Separation
- 9) sehr hoch bzw. Versuche eingestellt: --, hoch bzw. vermutlich hoch: -, mittel bzw. Versuche ausstehend: o, gering bzw. vermutlich gering: +, sehr gering: ++
- 10) Separation in dieser Studie: chemische Aufbereitung des SE-Mineralkonzentrats zum Teil auch des gesamten Erzes zur Abtrennung der SE-Fraktion und gegebenenfalls auch Fraktionierung in einzelne SE, SEO oder SE-Verbindungen
- 11) sehr hoch bzw. Versuche eingestellt: --, hoch bzw. vermutlich hoch: -, mittel bzw. Versuche ausstehend: o, gering bzw. vermutlich gering: +, sehr gering: ++
- 12)  $U_3O_8 > 100$  ppm und  $ThO_2 > 400$  ppm: --,  $U_3O_8 > 100$  ppm und  $ThO_2 < 400$  ppm oder  $U_3O_8 < 100$  ppm und  $ThO_2 > 400$  ppm: -,  $U_3O_8 \gg 100$  ppm und  $ThO_2$  unbekannt oder  $U_3O_8$  unbekannt und  $ThO_2 > 400$  ppm: o,  $U_3O_8 < 100$  ppm und  $ThO_2 < 400$  ppm: +,  $U_3O_8 \ll 100$  ppm und  $ThO_2 \ll 400$  ppm: ++
- 13) voraussehbare gravierende Umwelt-/Sozialrisiken: --, mögliche Umwelt-/Sozialrisiken: -, Umwelt-/Sozialrisiken nicht bewertbar: o, nur unbedeutende Umwelt-/Sozialrisiken: +, keine erkennbaren Umwelt-/Sozialrisiken: ++
- 14) leichte SEO-dominierte Lagerstätten: < 500.000 t SEO-Inhalt: --, 501.000 – 900.000 t SEO-Inhalt: -, 901.000 – 1.100.000 t SEO-Inhalt: o, 1.101.000 – 1.500.000 t SEO-Inhalt: +, > 1.500.000 t SEO-Inhalt: ++, schwere SEO-reiche Lagerstätten: < 10.000 t SEO-Inhalt: --, 10.001 – 50.000 t SEO-Inhalt: -, 50.001 – 100.000 t SEO-Inhalt: o, 100.001 – 250.000 t SEO-Inhalt: +, > 250.000 t SEO-Inhalt: ++
- 15) leichte SEO-dominierte Lagerstätten: < 0,50 % SEO: --, 0,51 – 0,99 % SEO: -, 1,00 – 2,00 % SEO: o, 2,01 – 5,00 % SEO: +, > 5,01 % SEO: ++, schwere SE-reiche Lagerstätten: < 0,05 % SEO: --, 0,05 – 0,08 % SEO: -, 0,08 – 0,1 % SEO: o, 0,1 – 0,5 % SEO: +, > 0,5 % SEO: ++
- 16) kein weiteres Wertmineral: --, ein weiteres Wertmineral: -, zwei weitere Wertminerale: o, drei weitere Wertminerale: +, vier und mehr weitere Wertminerale: ++
- 17) kein realistischer Produktionsbeginn: --, Produktionsbeginn von mehreren Faktoren abhängig: -, Produktionsbeginn finanzierungsabhängig: o, Produktionsbeginn absehbar: +, Projekt in Umsetzung: ++
- 18) > 1 Mrd. US-Dollar: --, 1.000 – 500 Mio. US-Dollar: -, 500 – 250 Mio. US-Dollar bzw. keine Angaben: o, 250 – 100 Mio. US-Dollar: +, < 100 Mio. US-Dollar: ++ [erfolgte keine Aufschlüsselung nach Bergbau/Aufbereitung und Separation wurden die Kosten 1/5 zu 4/5 verteilt]
- 19) Finanzierung ausstehend: --, Finanzierung fraglich: -, Finanzierung nicht bewertbar: o, Finanzierung teilweise gesichert: +, Finanzierung vollständig gesichert: ++
- 20) keinerlei Bergbauerfahrung: --, sehr geringe Bergbauerfahrung: -, Bergbauerfahrung: o, große Bergbauerfahrung: +, sehr große Bergbauerfahrung: ++
- 21) keinerlei Aufbereitungserfahrung: --, sehr geringe Aufbereitungserfahrung: -, Aufbereitungserfahrung: o, große Aufbereitungserfahrung: +, sehr große Aufbereitungserfahrung: ++ (Anm.: auch durch Versuche in großen Pilotanlagen)
- 22) keinerlei Separationserfahrung: --, sehr geringe Separationserfahrung: -, Separationserfahrung: o, große Separationserfahrung: +, sehr große Separationserfahrung: ++ (Anm.: auch durch Versuche in großen Pilotanlagen)
- 23) keinerlei Pluspunkte/zahlreiche Minuspunkte: --, wenige Pluspunkte/Minuspunkte: -, mehrere, aber nicht ausschlaggebende Pluspunkte/Minuspunkte: o, zahlreiche, aber nicht ausschlaggebende Pluspunkte/keine Minuspunkte: +, zahlreiche und ausschlaggebende Pluspunkte/keinerlei Minuspunkte: ++
- 24) erhöhter bzw. stark erhöhter Anteil an schweren SEO
- 25) durch Projektpartner Shenghe Resources
- 26) durch Anteilseigner Neo Performance Materials Inc.
- 27) durch Mutterunternehmen Energy Fuels Inc.“

Quelle: DERA (2025, S. 243)

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

**Kasten 2.1 Projektionen Bergbau****Szenario „Blockierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.1)**

*Projektion: Bis 2035 geht kein neuer Bergbaustandort in die Produktion.*

Aufgrund der vielfältigen Hürden und Investitionsrisiken wird keines der aktuellen Bergbauprojekte in den nächsten 10 Jahren in die Produktion gehen.

**Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2)**

*Projektion: 13 der 19 weltweit am weitesten fortgeschrittenen Bergbauprojekte gehen bis 2035 tatsächlich in die Produktion.*

Von den 19 weltweit am meisten fortgeschrittenen Projekte gehen diejenigen in die Produktion, deren Produktionsbeginn aktuell nicht als unrealistisch eingestuft wird (Zeile „Projektstand“ Tabelle 2.2).

Diese 13 neuen Bergbaustandorte befinden sich schwerpunktmäßig in Australien (5) und Kanada (2). Jeweils ein Bergbauprojekt liegt in Angola, Laos, Madagaskar, Südafrika, Tansania und den USA.

Die beiden Bergbauprojekte in Kanada, Phaxay in Laos und Browns Range in Australien können Erze mit einem erhöhten bzw. stark erhöhten Anteil an schweren seltenen Erden fördern (gekennzeichnet mit Ziffer 24 in Tabelle 2.2).

Die Bergbaustandorte in Laos und Tansania sind von chinesischen Investoren abhängig. Ihre Produkte werden im Wesentlichen auch nach China exportiert (DERA 2025, S. 189, 193). Nechalecho in Kanada ist ebenfalls teilweise von einem chinesischen Investor abhängig. Die Mine exportiert in die USA, Frankreich und Norwegen (DERA 2025, S. 187), die angolansische Mine nach UK (DERA 2025, S. 185) und die australische Mine Yangibana nach Estland (DERA 2025, S. 200).

**Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3)**

*Projektion: Drei der aktuell am weitesten fortgeschrittenen 19 Bergbauprojekte gehen in die Produktion.*

Bis 2035 gehen nur Bergbauprojekte in die Produktion, die bereits 2025 in die Umsetzungsphase eingetreten sind bzw. deren Produktionsbeginn absehbar ist und die zentrale Anforderungen an Lagerstätten erfüllen: günstige klimatische Bedingungen, funktionierende Infrastruktur, geringe Transportkosten, förderliche Bergbaugesetzgebung, begleitende Wertminerale und gesicherte Finanzierung. Das sind die Bergbauprojekte Eneabba (Australien), Toliara (Madagaskar) und Phaxay in Laos (Zeile „Projektstand“ Tabelle 2.2).

Keines dieser drei Bergbauprojekte verfügt über Erze mit einem erhöhten bzw. stark erhöhten Anteil schwerer seltener Erden (Tabelle 2.2).

Der Bergbaustandort in Laos ist von chinesischen Investoren abhängig. Seine Produkte werden im Wesentlichen auch nach China exportiert (DERA 2025, S. 193). Toliara exportiert sein Monazitkonzentrat wesentlich zur Weiterverarbeitung nach White Mesa Mill in Utah/USA (DERA 2025, S. 197).

**2.3 Abbau und Weiterverarbeitung**

SEE sind Bestandteil von Mineralien (Silikate, Oxide, Karbonate oder Phosphate). Sie können nur zusammen abgebaut werden und ihre Konzentration ist davon abhängig, wie die jeweilige Lagerstätte<sup>3</sup> zusammengesetzt ist. Grundsätzlich sind die abbaubaren Konzentrationen seltener Erden geringer als bei den meisten anderen mineralischen Rohstoffen (U.S. Geological Survey 2023, S. 143).

Zu den bedeutendsten Mineralien, in denen seltene Erden enthalten sind, zählen Bastnäsit, Monazit, Loparit, Xenotim sowie Synchisit und Parisit (DERA 2025, S. 17). Nur die ersten vier Genannten wurden bisher im großen Maßstab aufbereitet, während Synchisit und Parisit untergeordnet neben Bastnäsit vorkommen und somit mitgewonnen werden können (DERA 2025, S. 17 f.).

Obwohl der Abbau seltener Erden historisch betrachtet im 19. Jahrhundert in Brasilien begonnen hat, findet er gegenwärtig vor allem in China statt (DERA 2025, S. 44 f.). Hier wurden 2024 ca. 270.000 t REO abgebaut (Abbildung 2.4). Das entspricht rund 70 % der weltweit abgebauten Menge von 390.000 t REO. An zweiter Stelle folgen die USA, wo 2024 ca. 45.000 t REO abgebaut wurden. Bis in die 1980er Jahre waren die USA führend

<sup>3</sup> Bereiche der Erdkruste, in denen sich der Abbau von Rohstoffen wirtschaftlich lohnt.

beim Abbau von SEE. Seitdem hat China bis 2017 seinen Anteil stetig gesteigert (DERA o. J. S. 3). Obschon mittlerweile auch in anderen Ländern wie Myanmar, Australien, Nigeria und Thailand signifikante Mengen SEE abgebaut werden (U.S. Geological Survey 2025, S. 145), ist China weiterhin größter Erzeuger von SEE. Dort befinden sich 15 der weltweit etwa 40 aktiven Bergbaustandorte (DERA 2025, S. 124).

**Abbildung 2.4** Minenproduktion von seltenen Erden wichtiger Erzeugerländer 2024



Quelle: nach U.S. Geological Survey (2025, S. 145)

Der Abbau seltener Erden (Abbildung 2.5) erfolgt durch Gewinnung von Erzen mittels bergbautechnischer Verfahren wie Bohrungen, Sprengungen und Verladung, je nachdem, ob die Erze über- oder untertage gefördert werden. Im Wesentlichen lassen sich vier unterschiedliche Typen von Lagerstätten unterscheiden (DERA 2025, S. 18 ff.):

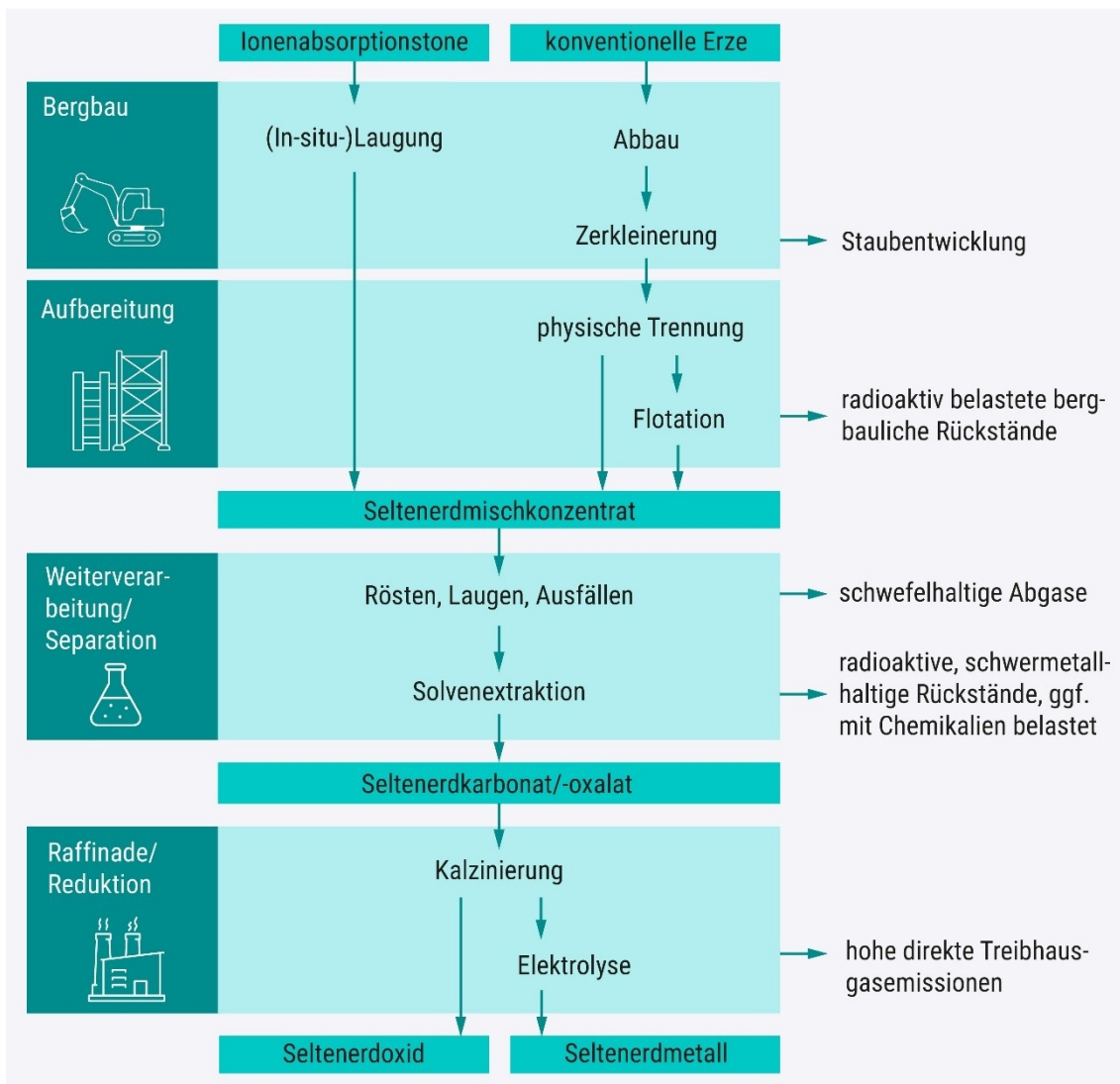
- Karbonatite: Festgesteinlagerstätten, die durch magmatische Aktivität entstanden sind und vor allem Monazit und Bastnäsit enthalten. Typisch ist ein relativ hoher SEE-Gehalt (bis zu 9 %) und eine Dominanz von leichten seltenen Erden.
- Ionenadsorptionstone: Verwitterungsböden, die in tropisch-subtropischem Feuchtklima entstehen und Mineralien in granitischen Gesteinen durch chemische Verwitterung an der Oberfläche anreichern. Üblicherweise ist der SEE-Gehalt gering (bis 0,2 %) und der Inhalt liegt häufig unter 100.000 t; allerdings sind sie teilweise mit schweren seltenen Erden angereichert und somit eine Hauptquelle dieser Elemente.
- Seifen- oder Schwermineralsandlagerstätten: In Strand-, Dünen-, Fluss- und küstennahen Regionen werden in derartigen Lagerstätten vor allem Wertminerale abgebaut, unter anderem Gold. Auch Monazit findet sich hier, und insbesondere durch den Aufbereitungsprozess ist eine Anreicherung von Monazit<sup>4</sup> mittlerweile wirtschaftlich möglich.
- Peralkaline Gesteine: Ablagerungen, die aus alkalischen Gesteinsschmelzen in der Erdkruste entstehen und komplexe Natriumsilikate enthalten, die teilweise einen erhöhten Anteil an schweren seltenen Erden aufweisen. Allerdings ist die Aufbereitung bislang nicht etabliert.

Erheblicher Aufwand entsteht in der anschließenden Aufbereitung, in der die SEE-Mineralien vom übrigen Gestein getrennt werden müssen, um weiterverarbeitbare Konzentrate zu erhalten. Aufgrund der vielfältigen möglichen Zusammensetzung der abbaubaren Minerale gibt es keinen standardisierten Prozess, der die wesentlichen

<sup>4</sup> Monazit enthält radioaktives Thorium, was die Aufbereitung aufwendig macht.

mechanischen und physikalisch-chemischen Schritte zur Aufbereitung umfasst. Vielmehr werden je nach Ausgangsmaterial die einzelnen Schritte in Pilotanlagen abgestimmt (DERA 2025, S. 34).

Abbildung 2.5 Gewinnung seltener Erden



Quelle: nach BGR (2021, S. 2)

Die Weiterverarbeitung führt in den einzelnen Schritten zu unterschiedlichen verkaufsfähigen Zwischenprodukten. Zu unterscheiden sind im Wesentlichen SEE-Mineralkonzentrate sowie SEE-Karbonate, -Oxalate, -Oxide und -Chloride. Für die Herstellung von Permanentmagneten gelten besondere Anforderungen an die Reinheit, sodass die SEE-Oxide noch einmal mittels Schmelzflusselektrolyse zu hochreinen Metallen raffiniert werden (DERA 2025, S. 38).

Wie der Abbau erfolgt auch die Weiterverarbeitung zu großen Teilen in China. Der Anteil ist sogar noch höher, sodass gegenwärtig mehr als 90 % der weltweiten Wertschöpfung – also die Summe des wirtschaftlichen Mehrwerts, der entlang der internationalen Produktions- und Lieferketten entsteht – mit SEE in China stattfindet (Interview Bender; IEA 2024a, S. 42). Darüber hinaus findet eine Refinement bzw. Weiterverarbeitung zu SEE-Zwischenprodukten in Malaysia, Vietnam, Russland, Estland, Indien, Kasachstan und den USA statt (DERA 2025, S. 86 ff.). 19 Raffinationsprojekte befinden sich aktuell in Planungszustand (Tabelle 2.3). Selbst wenn der Abbau beispielsweise in den USA oder in afrikanischen Ländern stattfindet, werden die Minerale zur Aufbereitung nach China transportiert. So sind in China nicht nur über Jahre hinweg Weiterverarbeitungskapazitäten entstanden, sondern dort ist auch erhebliches Know-how konzentriert.

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

**Tabelle 2.3 Raffinationsprojekte**

| Land       | Projekt                                    | Inhaber                                       | Verfahren  | Produktionsbeginn | Lieferkette                       | Firmenabnehmer/ Invests  |
|------------|--|---|--|-------------------|-----------------------------------|--|
| Australien | Kalgoorlie Rare Earths Processing Facility | Lynas Rare Earths Ltd.                        | Hydrometallurgie   | 2024              | Malaysia/ USA                     |  |
| Australien | Eneabba Rare Earths Refinery               | Iluka Resources Ltd.                          | Hydrometallurgie und Separation (SX)   | 2027              | teilweise Weiterexport nach China |  |
| Australien | Nolans Bore                                | Arafura Resources Ltd.                        | Hydrometallurgie und Separation  | 2026/ 2028        | Kanada                            | Siemens Gamesa Renewable Energy, und Hyundai Motor Company/Kia   |
| Australien | Dubbo/Toongi                               | Australian Strategic Materials (Holding) Ltd. | Hydrometallurgie und Separation  | 2028              | Südkorea                          |  |
| Frankreich | Caremag                                    | Carester SAS                                  | Recycling, Separation  | 2026/ 2027        | Japan                             | strategische Partnerschaft mit Solvay S.A; Joint Venture „Japan France Rare Earth“ von Japan Organization for Metals and Energy Security (JOG-MEC) und Iwatani Corporation_ langfristiger Liefervertrag zur Versorgung Japans  |
| Frankreich | La Rochelle                                | Solvay S. A.                                  | Separation, Metallproduktion und Magnetherstellung                               | 2025?             | Kanada, Deutschland, Australien   | Abnahmevertrag mit dem Yangibana-Projekt von Hastings in Australien über 2.500 t/J. SE-Mischkarbonat (Hastings hat unter anderem auch Abnahmeverträge für SE-Mischkarbonat mit Schaeffler Technologies AG & Co. KG und Thyssenkrupp Materials Trading GmbH geschlossen). Außerdem gibt es eine Ankündigung der Avalon Advanced Materials Inc. zur Lieferung von SE-Mischkarbonat (Menge unbekannt) von deren kanadischem Nechalecho-Projekt. |
| Kanada     | Saskatoon                                  | Saskatchewan Research Council, SRC            | Hydrometallurgie und Separation (per Rapid SX® Verfahren) sowie Metallproduktion | 2024              | Australien, Vietnam, Japan        | Abnahmeverträge von Zulieferer Arafura unter anderem an Hyundai, Kia und Siemens Gamesa.   |

Vorbereitung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

| Land      | Projekt                            | Inhaber  | Verfahren   | Produktionsbeginn | Lieferkette  | Firmenabnehmer/<br>Invests   |
|-----------|------------------------------------|--|---|-------------------|--|--|
| Malaysia  | Gebeng                             | Lynas Rare Earths Ltd  | Hydrometallurgie und Separation   | 2025              | Australien   |  |
| Norwegen  | Herøya                             | REEtec A.S.  | Separation per Hochleistungsflüssigkeitschromatografie                          | 2024?             | Deutschland  | Es besteht ein Abnahmevertrag mit der Schaeffler AG.   |
| Polen     | Puławy Rare Earth Separation Plant | Mkango Resources Ltd. und Azoty Zakłady Azotowe Puławy, The Grupa Azoty Group)   | Separation  | offen             | Malawi   | Songwe Hill-Projekt (Malawi), technische Unterstützung von Carester                              |
| Russland  | Solikamsk                          | OOO Lovozersky GOK, 100 % ROSA-TOM   | Separation  | 2026              |  |  |
| Schweden  | Luleå                              | LKAB   | Hydrometallurgie  | 2029/<br>2030     | gegebenenfalls Norwegen                            |  |
| Südafrika | Phalaborwa Phosphogipshalden       | Rainbow Rare Earths Ltd.   | Hydrometallurgie und Separation mittels Ionenaustauschs und Ionenchromatografie | offen             | USA  | US International Development Finance Corporation   |
| USA       | Seadrift                           | U.S. Rare Earths Processing Facility der Lynas USA, LLC, eine US-amerikanische Tochter des australischen Unternehmens Lynas Rare Earths Ltd. | Separation (SX)   | 2025/<br>2026     | Australien und Malaysia                            |  |
| USA       | Mountain Pass                      | MP HREE Facility   | Separationsanlage (für schwere seltene Erden)                                   | offen             |  | Mit der General Motors Company besteht ein Abnahmevertrag für die produzierten Permanentmagnete. |
| USA       | Alexandria                         | Louisiana Strategic Metals Complex (LA-SMC) der Ucore Rare Metals Inc.   | Separation  | 2025              | USA, Brasilien, Kanada, Australien                 |  |
| USA       | Upton                              | Bear Lodge Pilotanlage der Rare Element Resources Ltd.   | Erzaufbereitung, Hydrometallurgie, Separation                                   | 2025              | Aufbereitungsplanung erfolgt durch die Umwelt- und |  |

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Vorbereitung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

| Land | Projekt    | Inhaber               | Verfahren                                      | Produktionsbeginn     | Lieferkette                                | Firmenabnehmer/ Invests   |
|------|------------|-----------------------|--|-----------------------|--|---|
|      |            |                       |  |                       | Ingenieur-technik GmbH, Dresden            |   |
| USA  | Burlington | Phoenix Tailings Inc. | Hydrometallurgie, Separation, Metallproduktion | seit 2023 Pilotanlage |  | Zu den Geldgebern gehören unter anderem BMW und Yamaha. Das Unternehmen hatte zuvor 30 Mio. US-Dollar an Finanzmitteln und weitere 5 Mio. US-Dollar an Zuschüssen von US-Regierungsstellen, darunter dem Energie- und dem Verteidigungsministerium, erhalten. |
| UK   | Saltend    | Pensana plc.          | Separation                                     | 2025/2026?            | abhängig vom SEE-Longojo-Projekt in Kanada |   |

Quelle: nach DERA (2025, S. 94 ff.)

Der Abbau und die Weiterverarbeitung seltener Erden gehen mit erheblichen Folgen einher: Vor allem die radioaktiven Elemente Uran und Thorium, die – in unterschiedlichen Anteilen – häufig in den SEE-Mineralien vorkommen und bislang nicht als Rohstoffe weiterverarbeitet werden, müssen abgetrennt und gelagert werden. Hinzu kommt ein erheblicher Bedarf an Chemikalien, die in den einzelnen Prozessschritten der Weiterverarbeitung zum Einsatz kommen.

Die Folgen für die Umwelt durch Abbau und Weiterverarbeitung sind zum Teil erheblich, unterscheiden sich aber auch in Abhängigkeit vom Typ der Lagerstätte. Vor allem Karbonatite werden in großen Bergwerken gewonnen, aber auch Schwermineralsand und Ionenadsorptionstonlagerstätten (Tagebau) sind für die Gewinnung leichter und schwerer seltener Erden relevant. Dementsprechend unterschiedlich fällt der Flächenverbrauch aus, der beim Abbau, insbesondere bei der In-Situ-Laugung, und der Weiterverarbeitung entsteht (BGR 2021, S. 9 f.). Weitere Umweltfolgen sind der Wasserbedarf, die zum Teil unzureichende Entsorgung radioaktiven Abwassers und anderer bergbaulicher Rückstände sowie der Energiebedarf bzw. die damit verbundenen Treibhausgasemissionen, wobei diese für den Abbau geringer ausfallen als für die Weiterverarbeitung (BGR 2021, S. 11 f.).

Neben den ökologischen Folgen ist vor allem auch der illegale Abbau problematisch. Insgesamt betrachtet geht dieser zwar zurück, stellt aber dennoch in Ländern wie Myanmar ein erhebliches Problem dar (Interview Erdmann). Nicht nur werden negative gesundheitliche Folgen hervorgerufen, etwa durch radioaktive Strahlung, sondern auch die Finanzierung bewaffneter Gruppen in Myanmar wird durch den illegalen Abbau begünstigt (BGR 2021, S. 12).

Aktuell wird durch ein technisches Komitee der Internationalen Organisation für Normung ein einheitlicher Standard für Nachhaltigkeit spezifisch für seltene Erden entwickelt, wobei davon auszugehen ist, dass dieser aufgrund der Beteiligung der wichtigsten Erzeuger- und Abnehmerstaaten auch tatsächlich verbindlichen Charakter entfalten kann (DERA 2025, S. 103).

**Kasten 2.2      Projektionen Raffination****Szenario „Blockierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.1)**

*Projektion: Bis 2035 bleibt die Raffination chinesisch dominiert.*

Zwar geht der chinesische Marktanteil leicht zurück, China bleibt jedoch nach wie vor der dominante Player im Bereich Raffination. Der Aufbau nennenswerter Raffinationskapazitäten anderswo scheitert an hohen Investitionshürden, langwierigen Genehmigungsprozessen, vergleichsweise hohen Umweltschutzauflagen und Fachkräftemangel. Zudem ist die Raffination außerhalb Chinas nicht wettbewerbsfähig: China kann zu deutlich geringeren Kosten raffinieren.

**Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2)**

*Projektion: Bis 2035 entstehen ausreichend Raffinationskapazitäten in der EU.*

In der EU entstehen ausreichend Raffinationskapazitäten durch die strategischen Projekte Pulawy Rare Earths Separation Plant in Polen, CAREMAG (Frankreich) und im schwedischen Luleå (Tabelle 4.1). Das Ziel des CRMA, 40 % des jährlichen Bedarfs an Raffinationskapazitäten selbst abzudecken, wird damit bei weitem übertroffen (Kapitel 4, S. 28 ff.). Darüber hinaus entstehen weitere Raffinationskapazitäten in La Rochelle (Frankreich) (Tabelle 2.3).

**Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3)**

*Projektion: Bis 2035 geht der chinesische Anteil an der Raffination durch den Aufbau von Raffinationskapazitäten innerhalb und außerhalb der EU zurück.*

Infolge von Diversifizierungsstrategien nehmen bis Mitte der 2030er Jahre zusätzlich zu den Raffinationsprojekten in der EU weltweit weitere Raffinationen ihren Betrieb auf, im Wesentlichen in den USA und Australien. Europäische Unternehmen können mit den Raffinerien teilweise langfristige Lieferverträge abschließen (Spalte Firmenabnehmer/Invests Tabelle 2.3).

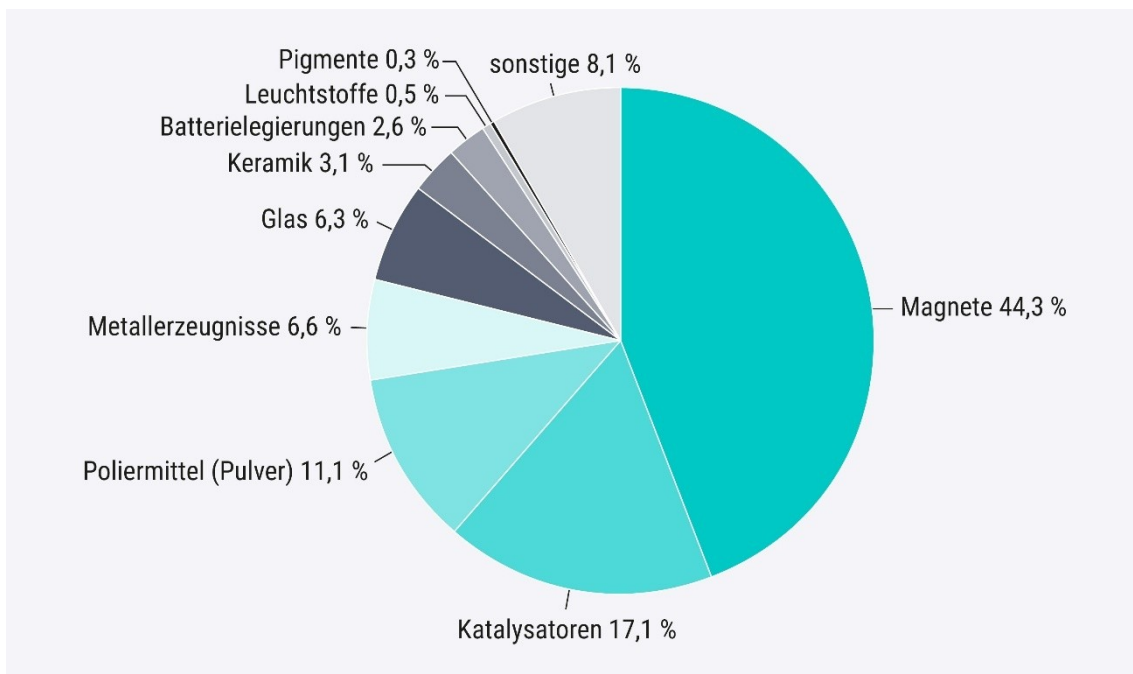
Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

### 3 Seltene Erden als Basis von Zukunftstechnologien

- Seltene Erden sind für zahlreiche Zukunftstechnologien relevant, die im Umgang mit der 3D-Transformation (Digitalisierung, Dekarbonisierung und Demografischer Wandel) unterstützen. Seltene Erden sind auch für moderne Militärtechnik von Bedeutung.
- Der größte Anteil des weltweiten Verbrauchs seltener Erden geht auf die Magnetherstellung zurück (44,3 %). Hierfür werden die seltenen Erdelemente (SEE) Neodym, Praseodym, Samarium, Lanthan, Terbium und Dysprosium benötigt. Die Magnete werden bei der Konstruktion von Motoren und Generatoren für Windräder, Elektro- und Hybridfahrzeuge, in Festplatten, Lautsprechern sowie für Kernspintomografen eingesetzt. Insofern sind SEE vor allem für die Sektoren Erneuerbare Energien und E-Mobilität relevant. Ebenso spielen sie in moderner Militärtechnologie eine wichtige Rolle.
- Zur Verminderung des Bedarfs an schweren SEE in Permanentmagneten wird an nanotechnologischen Möglichkeiten zur besseren Verteilung von Dysprosium und Terbium in Neodym-Eisen-Bor-Magneten sowie an nicht auf SEE basierenden Magnetmaterialien geforscht. In der Anwendung sind bisher vor allem Lösungen relevant, die auf Mengenreduzierung von SEE und Substituierung von Technologien zielen.

Seltene Erden spielen eine zentrale Rolle in zahlreichen Hochtechnologieanwendungen. Von der insgesamt erzeugten Menge an SEE werden mehr als zwei Drittel für die Herstellung von Magneten (44,3 %), Katalysatoren (17,1 %) und Poliermitteln (11,1 %) genutzt. Darüber hinaus werden SEE in Metalllegierungen bzw. -erzeugnissen (6,6 %) sowie für die Herstellung von Glas (6,3 %), Keramik (3,1 %), Batterien (2,6 %), Leuchtstoffen (0,5 %) und Pigmenten (0,3 %) verwendet (Abbildung 3.1).

**Abbildung 3.1 Verbrauchsanteile von seltenen Erden weltweit nach Verwendungszweck (Stand 2022)**



Quelle: nach NRCan (2024)

Die SEE Neodym, Dysprosium und Praseodym sind als Legierungen beispielsweise essenziell für starke Permanentmagneten – teilweise auch als Neodym-Eisen-Bor-Magneten bezeichnet –, die in kleinen, leistungsfähigen Elektromotoren und Generatoren verwendet werden. Die Magnete wiederum werden für die Konstruktion von Motoren und Generatoren für Windräder, Elektro- und Hybridfahrzeuge, in Festplatten, Lautsprechern sowie für Kernspintomografen eingesetzt. In chemischen Katalysatoren sind überwiegend die leichten SEE Cer, Lanthan, Praseodym, Neodym und das schwere SEE Yttrium enthalten, und die Katalysatoren werden in Autos, zum Beispiel als Dieselmittelzusatz, sowie in Raffinerie- und chemischen Prozessen sowie als Dieselmittelzusatz genutzt. Bei Poliermitteln werden die SEE Cer, Lanthan, Yttrium, Praseodym und Neodym genutzt (Schüler 2011, S. 5). Auch bei

der Produktion von Displays, in der Lasertechnologie, in medizinischen Geräten sowie in der Luft- und Raumfahrttechnik kommen SEE zum Einsatz (DERA 2025, S. 22 f.).

### 3.1 Transformationstechnologien

Einige dieser Anwendungsgebiete gelten als zukünftige Schlüsseltechnologien.<sup>5</sup> Diese Zukunftstechnologien, also Technologien, von denen heute erwartet wird, dass sie künftig Eigenschaften von Schlüsseltechnologien aufweisen werden (EFI 2025, S. 29), können in ganz unterschiedlichen Bereichen des modernen Lebens zu Veränderungen führen. Als besonders relevant werden Technologien erachtet, die eine dreifache Transformation unterstützen, indem sie helfen, den Herausforderungen durch den demografischen Wandel, durch den Klimawandel sowie die Digitalisierung zu begegnen.

Für den Umgang mit den Herausforderungen des demografischen Wandels kommen vor allem Robotik für Assistenz und Pflege sowie Exoskelette infrage, aber auch digitale Technologien, die telemedizinische und weitere Anwendungen für die digitalisierte Gesundheitsversorgung ermöglichen (Interviews Erdmann, Faulstich). Voraussetzung dafür sind Komponenten wie Elektromotoren, Generatoren, Displays, Lautsprecher und Laufwerke.

Die Dekarbonisierung als zentrale Herausforderung für den Umgang mit dem menschengemachten Klimawandel wird durch Zukunftstechnologien wie die Elektromobilität sowie erneuerbare Energien wie Windkraft und Photovoltaik getragen (Interview Oehlmann). In Elektroautos sorgen seltene Erden wie Neodym und Dysprosium für die Effizienz und Kompaktheit der Motoren. Auch in Windkraftanlagen – vor allem bei leistungsstarken Offshore-Anlagen – ermöglichen Permanentmagnetgeneratoren auf Basis seltener Erden eine wartungsarme und energieeffiziente Stromerzeugung (DERA 2021, S. 209 ff.). Hinzu kommt die Verwendung von Katalysatoren bei der Herstellung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyseverfahren (Interview Erdmann).

Die Digitalisierung ist ein tiefgehender Veränderungsprozess, der alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens durchdringt. Dementsprechend zahlreich sind Zukunftstechnologien, die eine digitale Transformation unterstützen. SEE sind unter anderem in Rechenzentren (Festplatten mit Magneten, die Neodym, Praseodym und Dysprosium enthalten) und Kommunikationstechnologien (Glasfasertechnik, Laserkommunikation, Lautsprecher, Leuchtstoffe, Bildschirme, Displays etc. in Smartphones, AR/VR-Brillen) verbaut (Interviews Bender, Oehlmann).

Darüber hinaus sind seltene Erden ein wichtiger Bestandteil moderner Militärtechnik (Kasten 3.1).

#### Kasten 3.1 Militärtechnik als Zukunftstechnologie

Rund 4 t SEE stecken im US-amerikanischen Unterseeboot der Virginia-Klasse, mehr als 2 t im Zerstörer der Arleigh-Burke-Klasse und 400 kg im Kampffjet F-35 (BAKS 2019, S. 1). Sie werden auch in unbemannten Luftfahrtsystemen, Präzisionslenk Waffen, Zielerfassungslasern, in der Satellitenkommunikation (EK 2020a, S. 69), in präzisionsgelenkter Munition, Lasersystemen, Radarsystemen, Sonarwandlern und elektronischen Störsystemen verwendet (GAO 2024).

Zwar werden für den militärischen Sektor in absoluten Zahlen nicht die gleichen Mengen seltener Erden benötigt wie für die Bereiche E-Mobilität und Erneuerbare Energien (Interview Erdmann), jedoch haben Exportbeschränkungen hier gerade in der angespannten geopolitischen Lage sicherheitsrelevante Auswirkungen. Das U.S. Department of Defense (DoD/US-amerikanisches Verteidigungsministerium) beispielsweise hat sich deshalb 2023 das Ziel gesetzt, bis 2027 eine Mine-zu-Magnet-Lieferkette in den USA zu etablieren – mit der Unterstützung internationaler Partner und mittels massiver Förderung von SEE-Projekten über den Defence Production Act (Baskaran/Schwartz 2025).

### 3.2 Voraussichtliche Nachfrageentwicklung

Der künftige Bedarf an seltenen Erden in den jeweiligen Zukunftstechnologien lässt sich grundsätzlich nur schätzen, da die Bedarfsentwicklung von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird, wie beispielsweise der Nachfrage nach einzelnen Zukunftstechnologien, dem Anteil SEE in unterschiedlichen Komponenten von Zukunftstechnologien, aber auch der Möglichkeit, SEE durch andere Rohstoffe zu substituieren. Dennoch kommen verschiedene Quellen

<sup>5</sup> Als Schlüsseltechnologien werden Technologien bezeichnet, die in einer Vielzahl von Branchen breite Anwendungspotenziale bieten und oft ohne gleichwertige technologische Alternative sind (EFI 2025, S. 29).

übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass künftig mit einem steigenden Bedarf an SEE gerechnet werden muss (DERA 2021; BMWK 2024; IEA 2024a; WD 2022).

Unterschieden werden kann zwischen Quellen, die den Bedarf entlang unterschiedlicher Szenarien schätzen, und solchen, die den Bedarf nach den unterschiedlichen Anwendungsfeldern aufschlüsseln. Die erstgenannte Gruppe von Quellen umfasst häufig Szenarien, deren Schlüsselfaktoren den Klimawandel bzw. den Ausbau erneuerbarer Energien beinhalten. Insofern spielen Zukunftstechnologien, insbesondere solche, die Dekarbonisierung unterstützen, in den Szenarien eine zentrale Rolle. Gemeinsam ist den unterschiedlichen Szenarien, die in DERA (2021, S. 305 ff.) und IEA (2024a, S. 178 f.) dargestellt werden, dass der Bedarf für SEE in denjenigen Szenarien ansteigt, in denen eine Dekarbonisierung weiter vorangetrieben wird, sowohl bis 2040 als auch darüber hinaus bis 2050. Den steigenden Bedarf treiben der Ausbau erneuerbarer Energien, insbesondere Windkraftanlagen, sowie die steigende Zahl an E-Autos und die vermehrte Nutzung von Hochleistungspermanentmagneten (DERA 2021, S. 305; Statista 2025, S. 31). In Szenarien, die als fossil orientiert charakterisiert werden können, geht der Bedarf an SEE jedoch zurück bzw. stagniert (DERA 2021, S. 305).

Quellen, die insgesamt einen steigenden Bedarf bis 2030 annehmen und diesen nach Anwendungsgebieten unterteilen, zeigen übereinstimmend, dass der Bedarf an SEE vor allem für Magnete zunimmt, während er für Poliermittel und Katalysatoren leicht und bei Leuchtmitteln sogar stark zurückgeht (BGR 2021, S. 3; DERA 2025, S. 24).

### **Kasten 3.2 Projektionen Nachfrageentwicklung<sup>6</sup>**

#### **Szenario „Blockierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.1)**

*Projektion: Bis 2035 steigt die Nachfrage nach SEE nur schwach an.*

Die Nachfrage nach seltenen Erdelementen (SEE) entwickelt sich bis 2035 deutlich schwächer als noch zu Beginn des Jahrzehnts erwartet. Der Bedarf an SEE für grüne Technologien wie Windkraft oder Elektromobilität nimmt ab, während gleichzeitig die Nachfrage für militärische Anwendungen steigt. Insgesamt ergibt sich dadurch nur ein geringer Anstieg der Gesamtnachfrage – rund 1 % pro Jahr. Dazu trägt auch bei, dass durch Anpassungen in den Produktionsprozessen der SEE-Materialeinsatz reduziert werden kann. Das Nachfrageniveau im Jahr 2035 liegt somit mit rund 10 % nur geringfügig über dem Stand von 2025.

#### **Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2)**

*Projektion: Bis 2035 steigt die Nachfrage nach SEE nur moderat an.*

Die Nachfrage nach seltenen Erden erfährt einen moderaten Anstieg um 4 % pro Jahr. 2035 liegt die nachgefragte Menge ca. 48 % über dem Niveau von 2025. Grund dafür ist ein mäßiger Ausbau erneuerbarer Energien und eine nur schleppend verlaufende Ausweitung der Elektromobilität.

#### **Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3)**

*Projektion: Bis 2035 steigt die Nachfrage nach SEE deutlich an.*

Die Nachfrage nach seltenen Erden steigt in Deutschland jährlich um ca. 8 %. Damit hat sich die Nachfrage bis 2035 mehr als verdoppelt (aktuell ca. 5.000 t SE-Verbindungen pro Jahr). Getrieben wird die steigende Nachfrage von politisch und gesellschaftlich unterstützten Klimaschutzmaßnahmen. Dazu zählen die Förderung klimaneutraler Zukunftstechnologien (Elektromotoren, Windkraftanlagen, Katalysatoren) sowie ein massiver Ausbau von Schlüsselindustrien (chemische Industrie, Motoren- und Batterieproduktion etc.) für eine klimaneutrale Transformation.

### **3.3 Substitution**

Letztlich hängt der zukünftige Bedarf an SEE auch davon ab, wie die Komponenten, in denen SEE verwendet werden, weiterentwickelt werden. So ist beispielsweise vorstellbar, dass der Bedarf nicht weiter steigt oder sogar zurückgeht, wenn der Anteil an SEE in einzelnen Komponenten, wie etwa Elektromotoren oder Permanentmagneten, durch Substitute oder andere technische Innovationen zurückgeht (EK 2020a, S. 91). Substituiert werden

<sup>6</sup> In der Literatur finden sich sehr unterschiedliche Szenarien zur künftigen Nachfrageentwicklung, die mit verschiedenen Parametern arbeiten und zu abweichenden Ergebnissen kommen. Für die drei Szenarien in diesem TA-Kompakt wurden auf Basis der Szenarien aus der Literatur plausible Werte geschätzt.

kann entweder das Material, also das SEE, die Technologie, also einzelne Komponenten durch andere Komponenten mit gleicher Funktionsweise, sowie die Funktionalität (Buchert et al. 2019, S. 17 f.).

Um den SEE-Bedarf zu vermindern, werden bezogen auf Permanentmagnete im Wesentlichen zwei Forschungsstränge verfolgt: Der erste zielt auf die Reduzierung von Dysprosium und Terbium durch eine verbesserte Verteilung der beiden schweren SEE in Neodym-Eisen-Bor-Magneten. Mit aktuellen Nanostrukturierungstechnologien lassen sich jedoch noch keine ausreichenden magnetischen Eigenschaften erreichen, vor allem mit Blick auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber Entmagnetisierung. Der zweite Forschungsstrang fokussiert auf neue, nicht-SEE-basierte Magnetmaterialien (Islam et al. 2024).

Für SEE-basierte Magnete wie Neodym-Eisen-Bor-Magnete existieren einige Alternative, die jedoch verschiedene Nachteile aufweisen. Zu nennen sind hier auf Barium- und Strontiumferriten basierende Magnete, die jedoch ein geringeres Leistungsniveau zeigen und nur eingesetzt werden können, wenn die Größe des Magnets nicht zentral ist, oder Magnete basierend auf Mangan-Aluminium- oder Mangan-Bismut-Legierungen. Letztere haben Nachteile bei Leistung, Stabilität und Verarbeitung (Campos 2024). Zudem wird an mittelstarken, kostengünstigeren und nachhaltigen Magneten für Nischenanwendungen geforscht. Herkömmliche Magnete für kleine Elektromotoren und Sensoren in Autos mit Verbrennungsmotor könnten in Zukunft beispielsweise durch Magneten des Lanthan-Neodym-Typs ersetzt werden, herkömmliche Magnete für magnetische Kupplungen in Industrie- und Energieanwendungen durch Magneten des Cer-Kobalt-Typs (Severson et al. 2022).

2022 konnte in der Forschung zur Materialsubstitution ein Durchbruch erzielt werden: Forscher/innen im EU-finanzierten ExtendGlass-Projekt gelang es, die Eisen-Nickel-Legierung Tetrataenit auf neuartigem Wege mithilfe von Phosphor herzustellen. Bis zu diesem Zeitpunkt war eine künstliche Herstellung von Tetrataenit im Labor nur durch die Bestrahlung von Eisen-Nickel-Legierungen mit Neutronen möglich, was in der Industrie nicht umsetzbar ist. Auf natürlichem Weg entsteht Tetrataenit bei der Abkühlung von Eisenmeteoriten im Welt- raum, was mehrere Millionen Jahre dauert. Mit Tetrataenit können Magnete mit SEE-ähnlichen Eigenschaften hergestellt werden. Gemeinsam mit industriellen Partnern muss allerdings noch erforscht werden, ob der im Labor gewählte Ansatz für die industrielle Fertigung geeignet ist (EK o. J.e).

Zurzeit finanziert die EU im Rahmen ihres Forschungsprogramms HORIZON mit rund 6,8 Mio. Euro das Magnetsubstitutionsprojekt BEETHOVEN. Ziel des Projektes mit deutscher Beteiligung ist es, magnetische Materialien zu entwickeln, die SEE im Energie- und Verkehrssektor ersetzen können. Das Projekt soll dazu beitragen, dass die EU ihre Magnetimporte bis 2033 um 2.200 bis 4.900 t vermindern kann (EK o. J.d).

Bei sämtlichen Substitutionsanstrengungen müssen zusätzlich zur Leistungsfähigkeit der neuen Magnettypen Aspekte wie stabile Lieferketten für die benötigten alternativen Materialien und die Recyclingfähigkeit berücksichtigt werden (Islam et al. 2024).

In der Anwendung zeigt sich, dass vor allem Mengenreduzierung von SEE und die Substituierung von Technologien eine Rolle spielen.

So kann auf SEE in den Permanentmagneten für Elektromotoren bisher nicht komplett verzichtet werden, wohingegen eine Mengenreduzierung bei vollelektrischen und Plug-in-Hybrid-Pkw möglich ist. Für beide Antriebsvarianten können bereits Motoren mit geringerem SEE-Gehalt erworben werden. Für vollelektrische Pkw sind zudem bereits SEE-freie Asynchronmotoren und extern erregte Synchronmotoren auf dem Markt, die allerdings eine geringere Leistungsdichte aufweisen (Buchert et al. 2019, S. 93 f.). Diese beiden Motoren funktionieren komplett ohne Permanentmagnete. Stattdessen wird bei ihnen das Magnetfeld elektrisch erzeugt – beim Asynchronmotor über Induktion und beim extern erregten Synchronmotor über elektrische Wicklungen im Rotor (Hochwarth 2025).

Auch bei Permanentmagneten für Windkraftanlagen zeichnet sich allenfalls eine SEE-Reduzierung durch veränderte Produktionsmethoden ab, jedoch keine komplette Substituierung. Außerhalb des Offshorebereichs könnten fremderregte Generatoren, die durch Gleichstrom das Läufer-Magnetfeld erzeugen (BWE o. J.), eine Alternative zum Einsatz von Permanentmagneten sein. Durch sie wächst allerdings die Gondelgröße.<sup>7</sup> Dies spricht gegen einen Einsatz in Anlagen mit sehr hohen Nennleistungen vor allem offshore (Buchert et al. 2019, S. 96 ff.), da die höheren Installationskosten für größere Gondeln in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum erzielbaren Energieertrag stehen. Hohes Potenzial wird dem Einsatz von Hochtemperatursupraleitern in Generatoren zugeschrieben,

<sup>7</sup> Die Gondel ist das Maschinenhaus einer Windkraftanlage (Deutsche Windindustrie o. J.). Sie umfasst den Generator, das Getriebe und die Steuerung (enercity Erneuerbare GmbH o. J.).

die allerdings weiter erforscht werden müssen. Durch Supraleiter können in diesen Generatoren starke Magnetfelder erzeugt werden. Das Generatorengewicht kann im Vergleich zu permanenterrregten Generatoren deutlich reduziert werden (Buchert et al. 2019, S. 96 ff.).

Im Hinblick auf Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie zeigt sich hinsichtlich der Material- und Technologiesubstitution ein ähnliches Bild: Für Nischenanwendungen stehen der Drehstrom-Asynchronmotor und der Reluktanzmotor – Rotor ohne Wicklungen und Magnete, Nutzung des Prinzips des geringsten magnetischen Widerstands (Hochwarth 2025) – zur Verfügung. In der Breite wird jedoch stark auf Materialeffizienz bei Permanentmagneten gesetzt. Durch einen weniger konzentrierten Einsatz seltener Erden könnte jedoch das Recycling erschwert und/oder unwirtschaftlich werden (Buchert et al. 2019, S. 94 ff.).

### **Kasten 3.3      Projektionen Substitution**

#### **Szenario „Blockierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.1)**

*Projektion: Bis 2035 gibt es kaum Fortschritte in der Substitutionsforschung.*

In der Substitutionsforschung bezogen auf Permanentmagnete können kaum Fortschritte erzielt werden, was vor allem an noch unbeantworteten Forschungsfragen und technischen Hürden liegt. Mit SEE-freien Magneten und Neodym-Eisen-Bor-Magneten mit geringerem Dysprosium- und Terbiumgehalt kann nach wie vor noch nicht die gleiche Leistungsfähigkeit wie mit herkömmlichen Magneten erreicht werden. Tetrataenit ist nicht im industriellen Maßstab verfügbar. Erfolge zeigen sich allenfalls bei der Reduzierung des SEE-Einsatzes, beispielsweise bei vollelektrischen und Plug-in-Hybrid-Pkw, bei Permanentmagneten für Windkraftanlagen und in der Industrie.

#### **Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2)**

*Projektion: Bis 2035 gib es teilweise Fortschritte bei der Substitutionsforschung.*

In einem ersten EU-Pilotprojekt gelingt die Herstellung von Tetrataenit für die industrielle Fertigung. Für Nischenanwendungen, etwa im Automobilbereich oder in Industrie- und Energieanwendungen, werden mittelstarke Magnete ohne die schweren SEE Dysprosium und Terbium eingesetzt.

#### **Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3)**

*Projektion: Bis 2035 kann die Substitutionsforschung deutliche Fortschritte erzielen.*

Langjährig geförderte Forschungsinitiativen ermöglichen die Entwicklung neuer magnetischer Materialien. Europa kann seine Importe von Magneten aus SEE bis 2035 deutlich vermindern. Gleichzeitig gibt es Fortschritte bei der künstlichen Herstellung von Tetrataenit im industriellen Maßstab, die in mehreren Pilotprojekten erprobt wurde.

Durch Fortschritte bei der Nanostrukturierungstechnologie können inzwischen leistungsstarke Neodym-Eisen-Bor-Magnete hergestellt werden, für die deutlich weniger Dysprosium und Terbium als in herkömmlichen Permanentmagneten benötigt wird. Inzwischen werden auch Windkraftanlagen mit Hochtemperatursupraleitern in den Generatoren als Alternative zu permanenterrregten Generatoren gebaut.

#### 4 Strategische Souveränität: seltene Erden im geopolitischen Kontext

- 2010 hat China durch Exportbeschränkungen für seltene Erden erstmals den westlichen Industrienationen seine Marktmacht demonstriert. 2023 verbot es die Ausfuhr von Technologien zur Gewinnung und Trennung seltener Erden und versuchte, dadurch seine Dominanz zu zementieren. Als Reaktion auf US-amerikanische Exportbeschränkungen für Halbleiter sowie die von den USA erhobenen Strafzölle erließ China im April 2025 und im Oktober 2025 weitere Ausfuhrrestriktionen, die auch seltene Erden und daraus gefertigte Magnete sowie Recyclingtechnologien umfassen. Ende Oktober 2025 kündigte China an, die Exportkontrollen für ein Jahr auszusetzen.
- Die EU strebt mit dem Critical Raw Materials Act (CRMA) von 2024 mehr Rohstoffsouveränität an. Richtwerte, die bis 2030 erreicht werden sollen, sind: 10 % des jährlichen EU-Verbrauchs sollen aus eigenem Bergbau stammen, 25 % aus Recycling gedeckt werden. Zudem sollen 40 % ihres Verbrauchs bezogen auf Zwischenbearbeitungsschritte aus eigener Raffination/Verarbeitung stammen. Maximal 65 % des Jahresverbrauchs eines Rohstoffs sollen noch aus einem einzelnen Drittland kommen. Erreicht werden sollen diese Ziele durch strategische Projekte entlang der Wertschöpfungskette, nationale Explorationsprogramme, Monitoring- und Stresstests für die Versorgungssituation, die Verpflichtung großer Unternehmen zur Risikoprävention, die Stärkung der Kreislaufwirtschaft sowie Handelsabkommen und strategische Partnerschaften.
- Verschiedene Ansätze zur Marktgestaltung sind vorstellbar, mit denen sich außerhalb Chinas primäre und sekundäre Rohstoffe konkurrenzfähig produzieren lassen könnten und mit denen auf Preisvolatilitäten reagiert werden könnte: etwa die Bildung eines garantierten Referenzpreises mit Gewinnabschöpfung oder eine staatliche Rohstoffreserve.

Die strategische Bedeutung der Verfügbarkeit seltener Erden ist aus Sicht der Industrie und der Politik mittlerweile anerkannt, was sich beispielsweise in Förderprogrammen zur Rohstoffsicherung und Recyclinginitiativen zeigt (EK 2023).

##### 4.1 Exportbeschränkungen und Handelsbarrieren

2010 spürten die westlichen Industrienationen erstmals massiv die Auswirkungen der Abhängigkeit von chinesischen SEE-Importen.

China verhängte damals Exportbeschränkungen auf seltene Erden, indem es seine Exportmenge um 40 % reduzierte, also von 50.145 t im Jahr 2009 auf 30.258 t im Jahr 2010. Da diese Exportreduktion auf eine nach der Finanzkrise anziehende Weltwirtschaft stieß, explodierten daraufhin die Preise für seltene Erden (DERA 2025, S. 105 f.). China begründete die Exportbeschränkungen seinerzeit mit Umweltbelastungen und der Notwendigkeit, die Versorgung der heimischen Wirtschaft mit diesen Rohstoffen zu sichern (Die Zeit 2010).

Auf dem Höhepunkt der Preisexplosion im Jahr 2011 kam es zu Produktionsstopps außerhalb Chinas sowie zu einer massiven Intensivierung von Substitutions- und Recyclinganstrengungen (DERA 2025, S. 107). Nachdem 2014 die WTO wegen der Exportrestriktionen, Ausfuhrzöllen und unterschiedlicher Preise für seltene Erden gegen China urteilte und die Rohstoffpreise wieder sanken, verloren Aspekte der Rohstoffsicherheit an politischer Aufmerksamkeit und die Bemühungen zur Reduzierung chinesischer Marktdominanz wurden schwächer (Kullik 2020, S. 4 f.).

Seit Ende 2023 erlebt die Weltwirtschaft ein Déjà-vu, wenngleich unter veränderten Rahmenbedingungen, denn die WTO und die regelbasierte internationale Ordnung sind inzwischen geschwächt. Zunächst verkündete China im Dezember 2023 ein Ausfuhrverbot von Technologien zur Gewinnung und Trennung seltener Erden (Handelsblatt 2023). Im April 2025 verkündete es im Gegenzug zu den US-amerikanischen Exportbeschränkungen für Halbleiter sowie den von den USA erhobenen Strafzöllen weitere Ausfuhrrestriktionen, die auch SEE und daraus gefertigte Magnete umfassen (IHK Region Stuttgart o. J.b). Die Exportrestriktionen betreffen Samarium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Lutetium, Scandium und Yttrium und darauf basierende Verbindungen, Legierungen und Produkte (Miningscout 2025). China stuft diese Rohstoffe nun als Dual-Use-Güter ein (IHK Region Stuttgart o. J.b). Für den Erhalt einer Ausfuhrgenehmigung sind chinesische Exporteure in einem zweistufigen Verfahren verpflichtet, bei den zuständigen Provinzbehörden und dem chinesischen Wirtschaftsministerium einen entsprechenden Antrag zu stellen. Dieser umfasst eine Endverbleibserklärung des Käufers. Darin hat der Käufer in den meisten Fällen nachzuweisen, dass eine Weitergabe an das US-Militär ausgeschlossen ist. Falschangaben

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

sind sanktionsbewehrt und können zur Folge haben, dass der betreffende Käufer künftig von weiteren Rohstofflieferungen ausgeschlossen wird (IHK Region Stuttgart o. J.b). Wie auch schon 2010 wirkten sich die Exportbeschränkungen auf die Preise der betroffenen Rohstoffe aus, die vor allem bei Terbium und Gadolinium deutlich anstiegen (Tagesschau.de 2025b). Anfang Oktober 2025 reagierte China im Handelskonflikt mit den USA mit einer weiteren Verschärfung der Exportkontrollen: Die Liste der von Exportkontrollen betroffenen SEE wurde um Holmium, Erbium, Thulium, Europium und Ytterbium ergänzt und auf Anlagen zum Recycling von SEE erweitert. Zudem dehnt China das Erfordernis, eine Exportlizenz zu beantragen, auf den Weitertransport von Produkten aus, die in Drittländern mit chinesischen SEE hergestellt wurden. Dies gilt bereits ab einem Wertanteil der SEE im Haben von 0,1 % im Produkt und führt dazu, dass Unternehmen Geschäftsgeheimnisse preisgeben müssen und China dadurch nicht nur SEE-Bedarfe einzelner Unternehmen erfährt, sondern auch Kenntnisse über deren Kundenstruktur erhält. Über Exportanträge zur Verwendung von SEE in fortschrittlichen Halbleitern soll sogar im Einzelfall entschieden werden. Die Verwendung chinesischer SEE in Militärgütern soll nun komplett verboten werden (Pape et al. 2025). Ende Oktober 2025 vereinbarten US-Präsident Donald Trump und der chinesische Staatschef Xi die Aussetzung der Exportkontrollen für chinesische SEE um ein Jahr (Tagesschau.de 2025a), die auch für die EU gelten sollen (Krempf 2025). Wie verlässlich die Vereinbarung ist und was in einem Jahr passiert, ist unklar.

Umso wichtiger sind politische Maßnahmen, die mittel- bis langfristig mehr Rohstoffsouveränität anstreben. Zentral für die EU ist diesbezüglich der CRMA, der 2024 verabschiedet wurde.

#### 4.2 CRMA

Der CRMA zielt darauf ab, die Versorgung der EU mit kritischen und strategischen Rohstoffen zu verbessern und sie strategisch unabhängiger von aktuell marktdominierenden Ländern zu machen. Hierfür sollen alle Stufen der europäischen Wertschöpfungskette – Abbau, Weiterverarbeitung, Recycling – gestärkt und Importe diversifiziert werden. Zudem sollen die Fähigkeiten der EU für die Überwachung von Versorgungsrisiken und ihre Minderung ausgebaut und die Kreislaufwirtschaft gestärkt werden (EK o. J.b).

Bis 2030 hat die EU die folgenden Richtwerte festgesetzt:

- 10 % des jährlichen Verbrauchs der EU an strategischen Rohstoffen sollen aus EU-Bergbau (Erze, Minerale oder Konzentrate) gedeckt werden.
- 40 % des jährlichen Verbrauchs der EU für alle Zwischenverarbeitungsschritte sollen durch Verarbeitung/Raffination in der EU bereitgestellt werden können.
- 25 % des Verbrauchs an strategischen Rohstoffen der EU sollen durch Recycling bedient werden.
- Die Importabhängigkeit von einem Drittland soll 65 % des Jahresverbrauchs der EU nicht überschreiten (BMWE 2025a; EK o. J.b).

Einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung dieser Richtwerte sollen strategische Projekte in und außerhalb der EU leisten. Sie erhalten einen leichteren Zugang zu Finanzierungsmöglichkeiten auf europäischer und nationaler Ebene und profitieren von kürzeren Genehmigungsverfahren: Innerhalb von 27 Monaten sollen Bergbauprojekte ihre Abbaugenehmigungen erhalten. Verarbeitungs- und Recyclinggenehmigungen sollen innerhalb von 15 Monaten erteilt werden (EK o. J.b).

Im März 2025 hat die Europäische Kommission (EK 2025a und 2025b) die ersten 47 strategischen Projekte innerhalb der EU bekannt gegeben. Im Juni 2025 folgten die ersten 13 strategischen Projekte außerhalb der EU

Sieben der bisher ausgewählten Projekte adressieren die Verbesserung der Versorgungssicherheit mit seltenen Erden (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1 Ausgewählte strategische SEE-Projekte (Stand März/Juni 2025)

| Name   | Typ   | Projekträger<br>Land                                    | Aktivität  | Nutzen EU   | voraus-<br>sichtli-<br>cher<br>Produkti-<br>onsstart |
|--|---|---|--|---|--|
| CAREMAG  | Verarbeit-<br>ung   | CAREMAG<br>SAS<br>Frankreich                            | Produktion von SEE-Oxiden (Neodym, Praseodym, Terbium, Dysprosium) aus Produktionsaus-<br>schuss (unter anderem Mag-<br>netherstellung), End-of-Life und<br>aus SEE-Konzentraten aus Minen                         | Deckung von 50 % des<br>Bedarfs an schweren sel-<br>tenen Erden und 3 % des<br>Bedarfs an leichten sel-<br>tenen Erden der EU bis<br>2030   | Q4 2026  |
| LIFE-22-<br>ENV-IT-IN-<br>SPIREE   | Recyc-<br>ling  | Itelyum Rege-<br>neration SpA<br>Italien                | Recycling von NdFeB-Perma-<br>nentmagneten aus Festplatten und<br>Elektromotoren durch Zerlegung<br>(Level I) und Hydrometallurgie<br>(Level II); Produkte: SEE-Oxide,<br>Oxalate, Konzentrate und andere<br>Salze | Beitrag zum 25 %-Richt-<br>wert bezogen auf Recyc-<br>ling (nicht weiter spezifi-<br>ziert)   | 2027   |
| MagFactory   | Recyc-<br>ling  | Mag-<br>REEsource<br>Frankreich                         | Zirkulärer Ansatz: Recycling von<br>SEE-Magnetschrott und daraus<br>Herstellung von neuen SEE-Mag-<br>neten  | 1,25 % Nachfragede-<br>ckung bis 2029, 5 % Bei-<br>trag zum Recyclingricht-<br>wert bis 2029; 2031 Ver-<br>dopplung der Produktion<br>möglich   | 2028   |
| Pulawy Rare<br>Earths Separation<br>Plant  | Verarbeit-<br>ung   | Mkango Re-<br>sources Ltd.<br>Polen                     | Trennung SEE: Verarbeitung von<br>SEE-Karbonaten zu zentralen<br>SEE-Oxiden (Neodym, Praseo-<br>dym) und schweren SEE-Kon-<br>zentraten  | beträchtlicher Beitrag<br>zum 40 %-Richtwert be-<br>zogen auf Zwischenpro-<br>dukte; jährliche Produkti-<br>onsmenge 1.018 t NdPr-<br>Oxide, 805 t separierte<br>Nd-Oxide, 212 t separi-<br>erte Pr-Oxide | 2027   |
| ReeMAP Pro-<br>ject: Malm-<br>berget, Luleå<br>Industrial<br>Park, Per Gei-<br>jer | inte-<br>griert:<br>Gewin-<br>nung und<br>Verarbeit-<br>ung | LKAB (Lu-<br>ossavaara-Ki-<br>runavaara AB)<br>Schweden | Gewinnung von SEE-Konzentra-<br>ten als Nebenprodukte des Ab-<br>baus von Eisenerzen; Verarbeit-<br>ung zu kommerzialisierbaren<br>SEE-Oxiden (EK 2025h)   | Beitrag nicht spezifiziert  | 2026   |
| Songwe Hill<br>Rare Earths   | Gewin-<br>nung  | Mkango Re-<br>sources Ltd.<br>Malawi                    | Produktion eines gereinigten ge-<br>mischten Seltenerdkarbonats aus<br>einer karbonatitgebundenen La-<br>gerstätte   | Versorgung der Aufbe-<br>reitungsanlage von<br>Mkango Resources in<br>Polen   | 2028   |
| Zandkopsdrift  | Gewin-<br>nung  | Frontier Rare<br>Earths Ltd.<br>Südafrika               | Gewinnung und Verarbeitung von<br>SEE für Magneten und gleichzei-<br>tig von batterietauglichem Man-<br>gan  | nicht näher spezifiziert  | 2029   |

Ergänzte Zusammenstellung nach EK (2025b) um Inhalte der einzelnen Projektdarstellungen (EK 2025d, 2025e, 2025f, 2025g, 2025i, 2025j).

Vorbereitung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Die bis Juni 2025 bewilligten strategischen Projekte werden nach Einschätzung der Europäischen Kommission dazu beitragen, den Richtwert für die Verarbeitung/Raffination zu übertreffen und etwa die Hälfte des Wegs zum Erreichen des Recyclingziels zurückzulegen. Die Beiträge zum Bergbau-Richtwert fallen hingegen gering aus (EK 2025c).

Die Bewertung der Europäischen Kommission hinsichtlich des Beitrags der Projekte zu den einzelnen Richtwerten dürfte unter anderem auf Selbsteinschätzungen der Projektkonsortien beruhen. Diese Einschätzungen sind – sofern verfügbar – auch in der Spalte „Nutzen EU“ in der vorhergehenden Tabelle dargestellt.

Zentrale einzurichtende Anlaufstellen in den einzelnen Mitgliedstaaten haben die Aufgabe, die „Genehmigungsverfahren für Projekte im Bereich kritische Rohstoffe zu erleichtern und zu koordinieren und Informationen [...]“, etwa zu Finanzierungs- und Investitionsfragen sowie Dienstleistungen zur Unterstützung von Unternehmen, zur Verfügung zu stellen (CRMA, S. 25 u. 30) (EK o. J.b). In Deutschland wurden zentrale Anlaufstellen<sup>8</sup> in jedem Bundesland eingerichtet.

Bis zum 24. Mai 2025 mussten die Mitgliedstaaten zudem nationale Explorationsprogramme vorlegen, die alle 5 Jahre gegebenenfalls aktualisiert werden müssen, sollten sich Veränderungen ergeben haben. Die Nationalen Explorationsprogramme haben zum Ziel, die Informationslage zu kritischen Rohstoffen in der EU zu verbessern, etwa durch Kartierung, Erhebung und/oder Neuauswertung geowissenschaftlicher Daten (CRMA, S. 30). Im Nationalen Explorationsprogramm der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des CRMA liegt der Fokus zunächst auf Kupfer und Lithium. Seltene Erden werden nicht erwähnt (BMWE 2025b), womöglich da eine wirtschaftliche Gewinnung in Deutschland bisher als unwahrscheinlich gilt (Kapitel 2).

Des Weiteren setzt der CRMA auf Monitoring und Stresstests, bezogen auf die Versorgungssituation, und verpflichtet die Hersteller strategischer Technologien zur Risikoprävention, etwa durch Lieferkettendiversifizierung und/oder durch Substitution der strategischen<sup>9</sup> Rohstoffe, sofern sie eine hohe Anfälligkeit gegenüber Versorgungsunterbrechungen aufweisen sollten. Die gesetzliche Vorgabe zielt auf große Unternehmen aus folgenden Bereichen ab: Herstellung von Batterien für die Energiespeicherung und Elektromobilität, Ausrüstung für die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Ausrüstung für die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Quellen, Luftfahrzeuge, Antriebsmotoren, Wärmepumpen, Ausrüstung für die Datenübertragung und -speicherung, mobile elektronische Geräte, Ausrüstung für die additive Fertigung, Ausrüstung für Robotik, Drohnen, Raketenwerfer, Satelliten oder fortgeschrittene Chips (CRMA, S. 34 f.) (EK o. J.b).

Die Kreislaufwirtschaft soll unter anderem durch eine bessere Sammlung von Produktabfällen, die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe aus Abfällen, die bei der Rohstoffgewinnung anfallen, und durch das Recycling von Permanentmagneten gestärkt werden (EK o. J.b). 2 Jahre nach Inkrafttreten eines Durchführungsrechtsakts, der spätestens bis zum 24. November 2026 durch die Europäische Kommission angenommen werden soll, müssen beispielsweise „Angaben über Gewicht, Lage und chemische Zusammensetzung aller einzelnen im Produkt enthaltenen Dauermagnete sowie über das Vorhandensein und die Art der Magnetbeschichtungen, Klebstoffe und eventuell verwendeten Zusatzstoffe“ auf einem Datenträger mit dem Produkt mitgeliefert werden. Dies gilt für Magnettypen wie Neodym-Eisen-Bor-Magnete und alle Produkte, die nicht primär für Verteidigungs- oder Raumfahrtanwendungen gedacht sind (CRMA, S. 39 f.). Bis spätestens 31. Dezember 2031 wird die Europäische Kommission Vorgaben für den Einsatz von Rezyklaten in Dauermagneten festsetzen, die Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium, Bor, Samarium, Nickel und Kobalt enthalten. Diese Vorgaben gelten für Dauermagnete, die in Magnetresonanztomografen, Windenergiegeneratoren, Industrierobotern, Kraftfahrzeugen, leichten Verkehrsmitteln,<sup>10</sup> Kühlgeneratoren, Wärmepumpen, Elektromotoren, Waschautomaten, Wäschetrocknern, Mikrowellengeräten, Staubsaugern und Geschirrspülern verwendet werden (CRMA, S. 39 f.)

Zur Verbesserung der Versorgungssicherheit mit kritischen Rohstoffen sollen Handelsabkommen und strategische Partnerschaften der EU ausgebaut werden (EK o. J.b). Bereits 2011 hatte die Europäische Kommission (EK 2011, S. 2, 16) eine „aktive ‚Rohstoffdiplomatie‘“ unter anderem durch strategische Partnerschaften als zentrales

<sup>8</sup> <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/critical-raw-materials-act.html>

<sup>9</sup> Strategische Rohstoffe sind eine Teilmenge der kritischen Rohstoffe. Während kritische Rohstoffe für die Wirtschaft der gesamten EU relevant sind und „ein hohes Risiko einer Versorgungsunterbrechung“ aufweisen, „die zu Wettbewerbsverzerrungen und einer Fragmentierung des Binnenmarktes führen könnte“, zeichnen sich strategische Rohstoffe zusätzlich durch ihre Bedeutung für grüne und digitale Technologien, Verteidigung sowie Luft- und Raumfahrt aus. Zudem ist für sie charakteristisch, dass sich ihre Produktion nicht in kurzer Zeit steigern lässt; Ebd., S. 2.

<sup>10</sup> „Leichtes Verkehrsmittel“ bezeichnet ein leichtes Fahrzeug auf Rädern, das allein durch einen Elektromotor oder durch eine Kombination aus Motor und menschlicher Kraft angetrieben werden kann, einschließlich Elektroroller, Elektrofahräder und typpengehmigte Fahrzeuge der Klasse L nach Artikel 4 der Verordnung (EU) Nr. 168/2013;“ siehe CRMA, S. 19.

Instrument ihrer Rohstoffinitiative definiert, um auf zunehmende Preisschwankungen auf den Grundstoffmärkten seit 2007 reagieren zu können. Im Aktionsplan zu kritischen Rohstoffen von 2020 werden „Strategische internationale Partnerschaften [...] zur Sicherung einer diversifizierten und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen“ ebenfalls erwähnt (EK 2020b, S. 18).

Inzwischen bestehen unterzeichnete Absichtserklärungen (Memorandum of Understanding – MoU) bzw. politische Vereinbarungen mit den in Tabelle 4.2 aufgeführten Ländern, die auch für den Zugang zu seltenen Erden relevant werden könnten. In der vierten Spalte „SEE-Relevanz“ wird aufgeführt, inwiefern in den betreffenden Ländern bereits SEE gefördert werden, fortgeschrittene Bergbauprojekte gemäß den Kriterien für Lagerstätten (Tabelle 2.1) vorangetrieben werden oder SEE-Ressourcen (nachgewiesene Rohstoffe) bzw. SEE-Reserven (dem Stand der Technik von heute nach wirtschaftlich förderbare Rohstoffe) vorhanden sind.

**Tabelle 4.2 Rohstoffpartnerschaften der EU und SEE-Relevanz in den Partnerländern**

| Land                         | Vereinbarungsform          | Unterzeichnungsdatum | SEE-Relevanz  |
|------------------------------|----------------------------|----------------------|---|
| Serbien                      | MoU                        | 19. Juli 2024        | keine Angaben in DERA 2025, sekundäre mineralische Quellen seltener Erden zum Beispiel aus Abraumhalden (Šajin et al. 2024)   |
| Australien                   | MoU                        | 28. Mai 2024         | Bergwerksförderung, fortgeschrittene Bergbauprojekte  |
| Usbekistan                   | MoU                        | 5. April 2024        | keine Angaben in DERA 2025, verstärkt Investitionen in Erkundung und Gewinnung (Strohbach 2023)   |
| Norwegen                     | MoU                        | 21. März 2024        | 1,78 % Ressourcenanteil, 0,00 % Reservenanteil  |
| Ruanda                       | MoU                        | 19. Februar 2024     | keine Angaben in DERA 2025, „Potenzial“ für seltene Erden (EK 2024)   |
| Grönland                     | MoU                        | 30. November 2023    | fortgeschrittene Bergbauprojekte  |
| Demokratische Republik Kongo | MoU                        | 26. Oktober 2023     | Bergwerksförderung  |
| Sambia                       | MoU                        | 26. Oktober 2023     | 0,05 % Ressourcenanteil, 0,00 % Reservenanteil  |
| Chile                        | MoU                        | 18. Juli 2023        | 0,01 % Ressourcenanteil, 0,00 % Reservenanteil  |
| Argentinien                  | MoU                        | 13. Juni 2023        | 0,02 % Ressourcenanteil, 0,00 % Reservenanteil  |
| Namibia                      | MoU                        | 8. November 2022     | fortgeschrittenes Bergbauprojekt  |
| Kasachstan                   | MoU                        | 7. November 2022     | Bergwerksförderung  |
| Ukraine                      | MoU                        | 13. Juli 2021        | keine Angaben in DERA 2025, Vorkommen von SEE werden aufgrund inzwischen veralteter Daten aus der Sowjetzeit angenommen, vermutlich größtenteils nicht wirtschaftlich abbaubar, EU in Konkurrenzsituation um Zugang zu SEE mit den USA (van Wieringen 2025) |
| Kanada                       | strategische Partnerschaft | 15. Juni 2021        | fortgeschrittene Bergbauprojekte  |

unterstrichene Länder = Memorandum of Understanding (MoU) im Rahmen der „Belt and Road Initiative“ mit China

Quelle: nach DERA (2025, S. 56 ff.; 67 f.; 242); EK (o. J.c)

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Die prozentualen Angaben beziehen sich auf den weltweiten Ressourcen- und Reserveanteil des jeweiligen Landes auf Grundlage von (DERA 2025) und ergänzenden Quellen. Die unterstrichenen Länder gehören zu dem 138 Ländern weltweit, die mit China ein MoU im Rahmen der Belt and Road Initiative unterschrieben haben (Green BRI Center o. J.). Bei der Belt and Road Initiative, auch bekannt als „Neue Seidenstraße“, handelt es sich um ein chinesisches außen- und entwicklungspolitisches Paradigma, in dessen Rahmen durch umfangreiche Investitionen die Vernetzung, der Handel und die Kommunikation zwischen Eurasien, Afrika und Lateinamerika gestärkt werden sollen und das von westlicher Seite häufig als Strategie zur Ausweitung von Chinas geopolitischem Einfluss interpretiert wird (Tsuji 2025). In den Bemühungen der EU und Chinas um Kooperationen mit ähnlichen Ländern deutet sich bereits an, dass noch unklar ist, ob und in welchem Ausmaß sich die Rohstoffpartnerschaften der EU letzten Endes auszahlen werden. Auch die USA ist ein Konkurrent im Zugang zu SEE: Ende Oktober 2025 wurde beispielsweise bekannt, dass das Land stärker mit Australien bei der Förderung und der Aufbereitung von SEE zusammenarbeiten will (Tagesschau.de 2025c).

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

#### **Kasten 4.1      Projektionen Handels- und Zollpolitik**

##### **Szenario „Blockierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.1)**

*Projektion: Bis 2035 kann die EU ihren Zugang zu SEE in Drittländern kaum verbessern. Chinesische Exportkontrollen werden immer wieder eingeführt und aufgehoben.*

Die EU bemüht sich weiterhin um Rohstoffpartnerschaften mit Ländern, die über SEE-Reserven verfügen. In vielen afrikanischen und asiatischen Ländern konkurriert sie dabei allerdings immer konfliktreicher mit China und den USA. Aus Sicht dieser afrikanischen und asiatischen Länder, mit denen Kooperationen angestrebt werden, machen die USA und China die besseren Angebote – die EU gerät ins Hintertreffen. Selbst wenn die EU erfolgreich Rohstoffpartnerschaften abschließen kann, werden diese erst in den 2040er Jahren zur Versorgung mit seltenen Erden beitragen können. China nutzt Exportkontrollen als geopolitisches und preispolitisches Druckmittel. Sie werden gezielt eingeführt und wieder aufgehoben, was zu volatilen Preisen führt und zu instabilen Produktionsbedingungen für Bergbauprojekte.

##### **Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2)**

*Projektion: Bis 2035 kann die EU teilweise ihren Zugang zu SEE in Drittländern ausbauen. Die chinesischen Exportkontrollen bleiben bestehen.*

Die EU kann den Zugang zu SEE in Drittländern teilweise ausbauen. Die Zielländer für Rohstoffpartnerschaften wägen gründlich ab, wessen Angebot sie annehmen, und verhandeln strategisch mit den USA, China, der EU und anderen Ländern. Als größter Binnenmarkt der Welt kann die EU für manche Zielländer den besseren Deal anbieten. Des Weiteren profitiert sie von den zwei außereuropäischen Projekten im Rahmen des CRMA für SEE: Zandkopsdrift in Südafrika von Frontier Rare Earths und Songwe Hill in Malawi von Mkango Resources. Da Songwe Hill seine Produktion in Mkangos Separationsanlage Pulawy in Polen vornimmt, ist hier eine Blaupause für eine integrierte Lieferkette zugunsten der EU entstanden. Allerdings leidet Malawi extrem unter den Auswirkungen des Klimawandels, sodass ein verlässlicher Export aus seinen Minen nicht immer gewährleistet ist. Das Land ist zudem abhängig von China, das dort unter anderem in den Abbau von Titan investiert.

Die Exportkontrollen für SEE werden fortgesetzt: Mal kommt es zu minimalen Erleichterungen (beispielsweise werden bürokratische Aufwände abgebaut), mal zu Verschärfungen, dann müssen Unternehmen weitreichende Informationen über ihre Lieferketten offenlegen und die Antragsbearbeitung wird verzögert.

##### **Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3)**

*Projektion: Bis 2035 kann die EU erfolgreich ihren Zugang zu SEE in Drittländern ausbauen. Es kommt zu einer handels- und zollpolitischen Entspannung.*

Nachdem Handels- und Zollkonflikte sowie Kriege das wirtschaftliche Wachstum in den USA, China und der EU deutlich ausgebremst haben, kommt es zu einer handelspolitischen Entspannung zwischen den drei Weltregionen. Zwar ist die regelbasierte Ordnung von einst nach wie vor Vergangenheit, jedoch werden seltene Erden und Chips kaum mehr als Druckmittel eingesetzt. Die politische Weltlage entschärft sich insgesamt und damit auch der vehemente Kampf um Einflussphären. Vor diesem Hintergrund gelingt es der EU, Rohstoffpartnerschaften zu schließen, die für die Versorgung mit seltenen Erden in den 2040er und 2050er Jahren wirksam werden.

### 4.3 Marktgestaltung

Das Erreichen strategischer Souveränität wird durch den Kostenvorteil Chinas bei primären und sekundären Rohstoffen und der Preisvolatilität bei SEE erschwert. Von staatlicher und privatwirtschaftlicher Seite werden deshalb verschiedene Ansätze diskutiert, mit welchen Mechanismen der Marktgestaltung Kostenvorteile und etwaige Preisvolatilitäten adressiert werden könnten.

Bezogen auf den Kostenvorteil könnten beispielsweise Regulierungsansätze wie der WTO-konforme Carbon-Border-Adjustment-Mechanismus der EU den – teils aufgrund von Arbeitsschutzregulierungen – höheren Lohnkosten und den höheren Umweltstandards in der EU entgegenwirken. Der CO<sub>2</sub>-Grenzausgleichsmechanismus der EU sorgt ab 2026 dafür, dass beim Import CO<sub>2</sub>-intensiver Güter Emissionszertifikate (CBAM-Zertifikate) erworben werden müssen, die mit dem CO<sub>2</sub>-Preis im Ursprungsland verrechnet werden, sofern dort CO<sub>2</sub>-Emissionen bepreist werden (IHK Region Stuttgart o. J.a). Der CO<sub>2</sub>-Grenzmechanismus soll dazu beitragen, dass eine etwaige Verlagerung der Produktion in Länder mit geringeren Klima- und Umweltstandards keinen Vorteil gegenüber einer Herstellung in der EU bringt, wo Hersteller ihrerseits Emissionszertifikate erwerben müssen (EK o. J.a; IHK Region Stuttgart o. J.a). CBAM gilt zunächst nur für den Import von „Eisen, Stahl, Zement, Aluminium, Elektrizität, Düngemittel und Wasserstoffe sowie bestimmte Vor- und nachgelagerte Produkte in reiner oder verarbeiteter Form aus Nicht-EU-Staaten“ (IHK Region Stuttgart o. J.a).

#### Kasten 4.2 Projektionen Marktgestaltung

##### Szenario „Blockierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.1)

*Projektion: Bis 2035 werden keine Maßnahmen zur Marktgestaltung umgesetzt.*

Preise ergeben sich aus Angebot und Nachfrage. China erhöht seine Produktions- und Weiterverarbeitungsquoten weiterhin, wenn es aus strategischen Gründen ausreichend SEE auf den Markt bringen möchte. Preisanstiege werden durch Verknappung (Exportbeschränkungen durch China), klimawandelbedingte Extremwetterereignisse, Pandemien und Spekulationen verursacht. Es existieren keine Preisgarantien für europäische Anbieter für primäre und sekundäre Rohstoffe.

##### Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2)

*Projektion: Bis 2035 wird ein staatlich garantierter Referenzpreis für SEE eingeführt.*

Produzenten aus der EU und Produzenten aus Rohstoffpartnerländern erhalten einen Garantiepreis für Primärrohstoffe, wenn der Preis unter eine vereinbarte Schwelle fällt. Steigt der Marktpreis hingegen über eine vereinbarte Schwelle, wird der Staat an den Gewinnen beteiligt.

##### Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3)

*Projektion: Bis 2035 wird eine EU-Reserve für SEE aufgebaut, die EU geht Public Private Partnerships ein und es werden Level-Playing-Field-Ausgleichsmechanismen umgesetzt.*

Wie bei den strategischen Reserven für Öl und Gas baut die EU eine gemeinsame Reserve für seltene Erden auf. EU-finanzierte Public Private Partnerships investieren in aussichtsreiche Bergbauprojekte und sichern sich über die Beteiligung Abnahmequoten. Ausgleichsmechanismen sorgen für konkurrenzfähige Produktionsbedingungen (Level Playing Field).

Mit der strategisch eingesetzten Erhöhung von Produktions- und Weiterverarbeitungskapazitäten (Erweiterung des Angebots und damit bei gleichbleibender Nachfrage Preisrückgang) bzw. mit Exportbeschränkungen (Verknappung des Angebots und damit bei gleichbleibender Nachfrage Preisanstieg) trägt China selbst zur Preisvolatilität bei. Investitionsbedingungen sind angesichts von Preisvolatilitäten sehr dynamisch – und damit die verlässliche Kalkulation der zukünftigen Erträge, etwa von Bergbauprojekten oder Recyclinganlagen, schwierig.

Ein mögliches Modell, dies auszugleichen, ist der staatlich garantierte Referenzpreis mit Gewinnabschöpfung. Bei diesem Modell würde die EU an Produzenten die Differenz zahlen, wenn der Marktpreis unterhalb des Referenzpreises liegt. Im Gegenzug würden Produzenten die Differenz an die EU zahlen, wenn der Marktpreis über dem Referenzpreis liegt.

Ein anderes Modell ist der staatliche Interventionsmarkt. Bei diesem Modell könnte sich die EU als Public Private Partnership an aussichtsreichen Bergbauprojekten beteiligen und Investitionsrisiken finanziell mittragen.

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Zudem könnte sie eine strategische Rohstoffreserve schaffen. Diese mindert Preisrisiken zwar nicht für Investoren, aber für Branchen ab, die seltene Erden für ihre Produkte benötigen.

Zurzeit erarbeitet die Europäische Kommission ein Konzept für den Aufbau strategischer Rohstoffreserven und folgt dabei den Vorbildern Japan, Südkorea und den USA. Japan hat nach einem Konflikt mit China 2010 Reserven für seltene Erden angelegt. Südkorea verfügt über ein Lager mit 35 kritischen Rohstoffen zur Sicherstellung der Versorgung der Industrie für mindestens 100 Tage und die USA haben eine staatliche Reserve für die Produktion von Rüstungsgütern eingerichtet (Vela 2025).

*Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.*

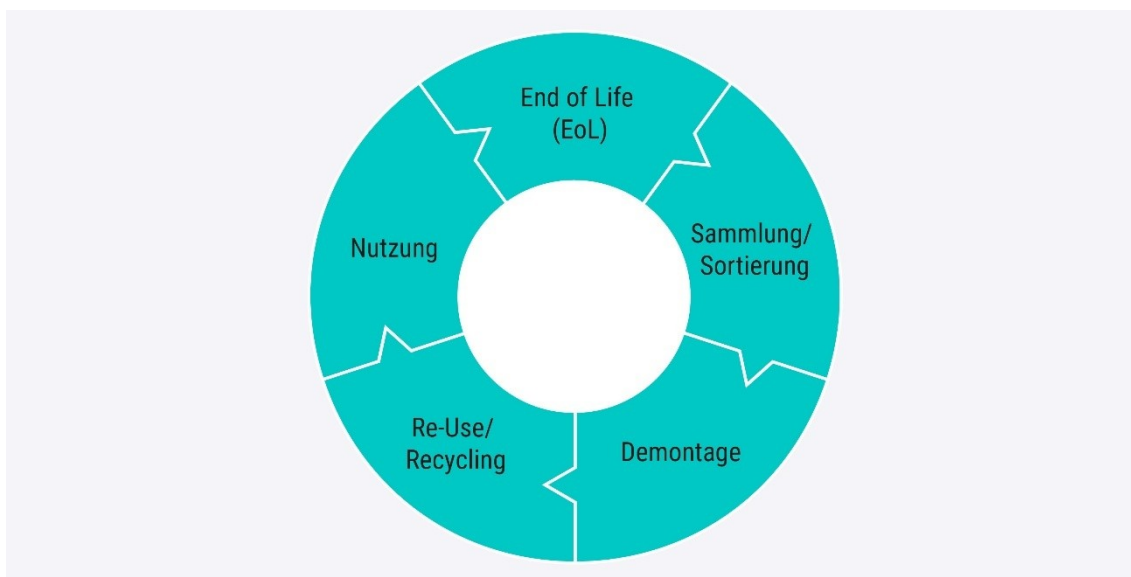
## 5 Recycling von seltenen Erden und Etablierung einer Kreislaufwirtschaft

- Eine Wiederverwertung von SEE erfolgt durch Wiederverwendung (Re-Use) von Komponenten oder Recycling, wobei letzteres in rohstoffliche und werkstoffliche Verfahren unterteilt wird. Während Re-Use große, gut zugängliche Magnete erfordert, sind Recyclingprozesse oft energie- und umweltintensiv. Werkstoffliches Recycling kann zudem die Eigenschaften der Magnete verändern. Aktuell ist das Recycling wirtschaftlich nur bei Permanentmagneten rentabel, nicht jedoch bei anderen SEE-haltigen Komponenten.
- Recyclingunternehmen stehen vor der Herausforderung, mit Primärrohstoffen preislich konkurrieren zu müssen. Rezyklate sind derzeit meist teurer. Zusätzlich erschweren geringe Mengen an Altmagneten und die Heterogenität der Stoffströme die Rückgewinnung. Viele SEE-haltige Produkte, wie Windkraftanlagen oder E-Auto-Motoren, haben das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht. Zudem fehlt in der EU ein geschlossenes Verwertungssystem. Ohne eigene Weiterverarbeitung müssen recycelte SEE oder Oxide, Legierungen und Komponenten wieder nach China exportiert werden.
- China ist bereits Vorreiter bei der Integration von Rückgewinnungstechnologien in bestehende Produktionsprozesse. Auch in Europa könnten gezielte industriepolitische Maßnahmen und die erwartete Zunahme an End-of-Life(EoL)-Materialien das Recycling voranbringen. Prognosen zufolge ließe sich in etwa 10 Jahren bis zu einem Drittel der SEE-Nachfrage durch Recycling decken, vorausgesetzt, die wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen entwickeln sich entsprechend.

### 5.1 Stand der Technik

Eine Wiederverwertung von seltenen Erden kann im Wesentlichen durch zwei unterschiedliche Vorgehensweisen erfolgen: Recycling und Re-Use. Insbesondere bestimmte Arten von Magneten können wiederverwendet werden, wenn die Stoffströme hinreichend groß und sortenrein sind, also Magnete weitestgehend frei von anderen Materialien und Komponenten sind. Die Magnete werden dabei nicht zerstört, sofern sie für Anwendungen mit gleichen magnetischen Eigenschaften infrage kommen. Dennoch müssen sie entmagnetisiert und gereinigt und gegebenenfalls in eine neue Form gebracht werden (DERA 2024, S. 12).

Abbildung 5.1 Phasen der Wiederverwertung



Quelle: nach Schönfeldt (2025, S. 8)

Unabhängig vom angewandten Recyclingverfahren muss die zu recycelnde Komponente, beispielsweise der Permanentmagnet, aus dem Endprodukt, beispielsweise einem Elektromotor, einer Windkraftanlage oder einem Smartphone, entnommen werden. Zunächst erfolgt also eine Sammlung von recyclefähigen Komponenten und

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Produkten, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Diese Produkte werden anschließend demontiert, in den Rückgewinnungsprozess überführt und nach der erfolgten Rückgewinnung wieder genutzt (Abbildung 5.1).

Um ein Recycling von SEE durchzuführen, gibt es zwei unterschiedliche Verfahrensgruppen: das werkstoffliche und das rohstoffliche Recycling (DERA 2024, S. 11). Die Verfahren sind mit ihren Vor- und Nachteilen in Tabelle 5.1 aufgeführt.

**Tabelle 5.1 Vor- und Nachteile von Recyclingmethoden**

| Recycling-methode         | Prozess  | Vorteile  | Nachteile  |
|---------------------------|--|---|--|
| Wiederverwendung (Re-Use) |  | geringer Energieverbrauch (vergleiche mit anderen Recyclingmethoden), wenige bis keine Chemikalien nötig, geringe bis keine Produktion von Abfällen   | nur für große und leicht zugängliche Magnete geeignet (Windturbinen, große Motoren), aktuell noch zu geringe Materialströme, Anforderungen von Altmagnet und Neuanwendung müssen passen, händische Demontage notwendig   |
| rohstoffliches Recycling  | Ein- bzw. Umschmelzen, HDDR-Verfahren, Schmelzspinnverfahren | Kontaminationen und Verunreinigungen sind weniger kritisch, mehr Freiheitsgrade im Hinblick auf Zusammensetzung und Eigenschaften, theoretisch beste magnetische Eigenschaften erzielbar, anwendbar bei geschredderten Stoffströmen oder kleinen Anwendungen, anwendbar auf alle Magnetzusammensetzungen (teilweise auch oxidierte Magnete) | im Vergleich zu werkstofflichem Recycling mehr Prozessschritte und größere Mengen an Energie (0,7 bis 1,0 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent mehr), Wasser und Chemikalien notwendig, allerdings weniger als bei Produktion von Magneten aus Primärmaterial                        |
|                           | Wasserstoffversprödung                                       | geringer Energiebedarf, kein Abfall, gut geeignet für Magnete aus Festplatten   | keine Variationen in den Abfallströmen möglich, nicht anwendbar bei oxidierten Magneten  |
| werkstoffliches Recycling |  | geringerer Energieverbrauch als rohstoffliche Recyclingmethoden, geringe bis keine Produktion von Abfällen, ähnliche Prozesse wie in der Primärproduktion und daher integrierbar, höhere Nachhaltigkeit als bei rohstofflichen Recyclingmethoden erzielbar  | Demontage- und Sortierprozesse notwendig, magnetische Eigenschaften abhängig von Qualität der Altmagnete (Oxidation), durch Zugabe von SEE Reduktion der Restmagnetisierung um 2 bis 10 %, nicht anwendbar bei geschredderten oder inhomogenen Stoffströmen                    |
|                           | hydrometallurgische Verfahren                                | etablierte Methode der Erzaufbereitung, anwendbar für alle Magnetzusammensetzungen, geeignet für oxidierte und nicht oxidierte Legierungen  | hoher Bedarf an Chemikalien und Wasser, hoher Aufwand aufgrund der Vielzahl an Prozessschritten, große Abwassermenge, Verunreinigung durch Schwermetalle   |
|                           | pyrometallurgische Verfahren                                 | weniger Prozessschritte als bei der Hydrometallurgie, kein Abwasser, anwendbar für alle Magnetzusammensetzungen, Direktschmelzverfahren zur Erzeugung von Vorlegierungen, Erzeugung von SEE-Metallen mittels Flüssigmetallextraktion  | sehr hoher Energiebedarf, Direktschmelzverfahren und Flüssigmetallextraktion nicht bei oxidierten Magneten anwendbar, Elektroschlack-Umschmelzverfahren verursacht große Mengen fester Abfälle, hohe Umweltbelastung (Dioxinproduktion, Freisetzung gefährlicher Verbindungen) |

Eigene Zusammenstellung nach BGR (2021, S. 9); Bhattarai et al. (2024); Danouche et al. (2024); DERA (2024, S. 15 f., und 2025, S. 98 ff.)

Beim werkstofflichen Recycling – auch als funktionales oder Short-Loop-Recycling bezeichnet – wird das Ziel verfolgt, aus alten Materialien (zum Beispiel Magneten, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben) neue Komponenten herzustellen. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials verändert, um etwa eine neue Legierung zu erzeugen, aus der wiederum Magnete gefertigt werden können (IEA 2024b, S. 89). Im Unterschied zur direkten Wiederverwendung entsteht also ein neues Materialprodukt. Allerdings sind die daraus hergestellten Magnete in der Regel von geringerer Qualität als das ursprüngliche Ausgangsprodukt. Daher spricht man häufig von Downcycling (Interviews Erdmann, Burkhard).

Es gibt unterschiedliche Prozesse, um das werkstoffliche Recycling durchzuführen (DERA 2025, S. 98 f.):

- Ein- bzw. Umschmelzverfahren: Es wird eingesetzt, um Sintermagnete herzustellen. Dazu werden EoL-Magnete und Produktionsabfälle aus der Magnetherstellung in Induktionsöfen geschmolzen. Die entstehenden Bandgussflocken<sup>11</sup> können zur Fertigung von gesinterten Magneten verwendet werden (DERA 2024, S. 14).
- Wasserstoffversprödung (Hydrogen Decrepitation – HD): Dabei werden Permanentmagnete unter Verwendung von Wasserstoff in ein grobes Pulver aufgespalten. Durch die chemische Reaktion zwischen Wasserstoff und den Magnetwerkstoffen vergrößert sich das Volumen des Magneten und der Werkstoff versprödet. Aus dem zunächst entstehenden groben Pulver kann ein feines Pulver gemahlen werden, das wiederum für die Herstellung von gesinterten oder kunststoffgebundenen Magneten verwendet werden kann (DERA 2024, S. 12 f.).
- HDDR-Verfahren (Hydrogenation Disproportionation Desorption and Recombination): Dieses Verfahren ist ähnlich der Wasserstoffversprödung, allerdings werden höhere Temperaturen sowie höherer Druck der Wasserstoffatmosphäre in den einzelnen Prozessschritten genutzt. Dadurch entsteht im Endergebnis ein feineres Pulver, das zur Herstellung von kunststoffgebundenen Magneten genutzt wird (DERA 2024, S. 13 f.).
- Schmelzspinnverfahren: Dieses beginnt ebenfalls mit dem Aufschmelzen von EoL-Magneten oder Produktionsabfällen. Die Schmelze wird auf einem rotierenden Metallrad abgekühlt, wodurch nanokristalline Bänder entstehen, die anschließend in ein feines Magnetpulver gemahlen werden. Auch hieraus können kunststoffgebundene Magnete hergestellt werden (DERA 2024, S. 14, und 2025, S. 99).

Obwohl werkstoffliches Recycling vor allem für Magnete eingesetzt wird, eignen sich nicht alle Magnete im selben Maße für die genannten Recyclingprozesse. Bei der Wahl des spezifischen Prozesses kommt es daher unter anderem auf den Verunreinigungsgehalt, das Ausgangsmaterial sowie das beabsichtigte Endprodukt an.

Beim rohstofflichen Recycling (elementares oder Long-Loop-Recycling) ist das übergeordnete Ziel, EoL-Stoffströme derart aufzubereiten, dass die enthaltenen SEE getrennt voneinander zurückgewonnen werden können. Die auf diese Weise gewonnenen SEE oder SEE-Oxide können als Vorprodukte dadurch deutlich früher wieder in die Wertschöpfung eingebracht werden. Zudem kann eine größere Bandbreite an Inputmaterial rückgewonnen werden (DERA 2025, S. 99 f.). Beim rohstofflichen Recycling können zwei Gruppen von Prozessen unterschieden werden: das hydrometallurgische und das pyrometallurgische Recycling (Bhattacharai et al. 2024; DERA 2024, S. 14 ff., und 2025, S. 99 f.).

Erstgenanntes lässt sich in zwei unterschiedlichen Prozessen durchführen, bei denen die SEE-Magnete chemisch ausgewaschen werden. Dies geschieht entweder mit der Flüssig-flüssig-Extraktion oder dem selektiven Fällern. Die Magnete werden in Salz- oder Schwefelsäure aufgelöst und die einzelnen SEE abgetrennt. Anschließend werden die SEE in SEE-Oxide oder SEE-Fluoride überführt (Bhattacharai et al. 2024; DERA 2024, S. 14). Hydrometallurgische Verfahren eignen sich für unterschiedliche Arten elektronischer Abfälle: von Batterien und Katalysatoren über Leuchtmittel bis hin zu Permanentmagneten, wie sie in Motoren und Generatoren enthalten sind (Jyothei et al. 2020).

Pyrometallurgische Verfahren basieren auf dem Prinzip der Umwandlung in eine Phase (zum Beispiel Schlacke), die eine selektive Abtrennung vom übrigen verwendeten Material (zum Beispiel Kunststoff, andere Metalle etc.) ermöglicht. Die pyrometallurgischen Verfahren ähneln den Raffinations-Prozessen bei der Weiterverarbeitung (IEA 2024b, S. 89) (Kapitel 2), sodass die unterschiedlichen Zwischenprodukte an verschiedenen Stellen in die Primärwertschöpfung einfließen können (Abbildung 2.5). Pyrometallurgische Verfahren werden beispielsweise angewandt, um die in wiederaufladbaren Batterien enthaltenen SEE zu recyceln (Assefi et al. 2020).

Viele der genannten Verfahren werden bereits in der Praxis eingesetzt, einige biohydrometallurgische Verfahren sind noch Gegenstand von Forschungsarbeiten (Interview Burkhard; Danouche et al. 2024).

<sup>11</sup> spezielle Form von Metallgussgranulat

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Die für das Recycling von SEE erforderlichen Akteursgruppen lassen sich unterscheiden in Sammler, Recycler und Produzenten (zum Beispiel von Magneten). Ein Merkmal der relevanten Akteure ist, dass es sich bei Unternehmen, die insbesondere das Recycling von Magneten betreiben, häufig um Start-ups handelt, die ihrerseits aus Aktivitäten von Forschungsinstitutionen hervorgegangen sind (DERA 2024, S. 27). Es gibt weltweit ca. 17 Unternehmen, die Recyclingverfahren für Magnete anwenden (wollen), die in Tabelle 5.2 aufgeführt sind. Nicht alle dieser Unternehmen betreiben bereits aktiv ein Recycling, manche haben dies aber für das Jahr 2025 oder die Folgejahre angekündigt (DERA 2024, S. 27 ff.; IEA 2024b, S. 95 f.). Das jeweilige Geschäftsmodell lässt sich entweder als Primärmaterialhersteller, die ihren Recyclingbetrieb integrieren, oder Lohnverwerter bezeichnen, die Materialien im Auftrag von Kunden gegen eine Gebühr verarbeiten (IEA 2024b, S. 26 f.).

**Tabelle 5.2 Übersicht über Recyclingunternehmen**

| Name                      | Standort                         | Recyclingverfahren                                  |
|---------------------------|----------------------------------|---|
| Apple                     | USA, Niederlande                 | Sortierung  |
| CAREMAG                   | Frankreich                       | rohstofflich  |
| Cyclic Materials          | Kanada                           | Sammlung, Long Loop, hydrometallurgisches Verfahren |
| GeoMega Resource          | Kanada                           | hydrometallurgisches Verfahren                      |
| HyProMag GmbH             | Deutschland, Großbritannien, USA | werkstofflich, Wasserstoffversprödung               |
| Ionic Rare Earths         | Großbritannien                   | rohstofflich  |
| MagREESource              | Frankreich                       | werkstofflich, Wasserstoffversprödung               |
| Neo Performance Materials | Estland                          | Magnetherstellung                                   |
| Noveon Magnetics          | USA                              | Magnetherstellung, werkstofflich                    |
| Orano                     | Frankreich                       | werkstofflich, Wasserstoffversprödung               |
| ReElement                 | USA                              | rohstofflich  |
| Shenghe Resources         | China                            |   |
| Heraeus REMLOY GmbH       | Deutschland                      | Schmelzspinnverfahren                               |
| RockLink GmbH             | Deutschland                      | Sammlung  |
| Lars Walch GmbH & Co. KG  | Deutschland                      | Demontage   |
| Carester                  | Frankreich                       | Flüssig-flüssig-Extraktion                          |
| REECycle                  | USA                              | Sammlung, Wasserstoffversprödung                    |

Eigene Zusammenstellung nach DERA (2024, S. 28 ff.); IEA (2024b, S. 95 f.)

Als zentrale Herausforderung für die Unternehmen gilt dabei die Wirtschaftlichkeit. Das heißt, Recyclingunternehmen müssen preislich mit der Förderung und Weiterverarbeitung von Primärrohstoffen konkurrieren können. Dabei kommt es auf die Entwicklung der Zusammensetzung der EoL-Materialströme an: Gegenwärtig wird beispielsweise mit einem bestimmten Anteil schwerer seltener Erden gerechnet, der zurückgewonnen werden kann und der dadurch begrenzt ist, wie hoch der Anteil zum Beispiel in einem Magneten ist. Wenn künftig Magneten einen anderen, beispielsweise geringeren Anteil schwerer seltener Erden beinhalten, dann ändert sich auch der EoL-Materialstrom, der für das Recycling zur Verfügung steht (IEA 2024b, S. 90 f.). Dadurch wird die Entwicklung der Abfallpreise beeinflusst, die im Vergleich zum Preis von Neuprodukten bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung eine zentrale Rolle spielen.

## 5.2 Voraussetzungen und Herausforderungen beim Recyceln

Obwohl das Interesse an Recyclingverfahren für SEE spätestens im Zuge der Rohstoffkrise im Jahr 2011 (Kapitel 4) stark zugenommen hat (DERA 2024, S. 11), sind die EoL-Inputmengen, die für die unterschiedlichen Recyclingmethoden zur Verfügung stehen, bislang noch sehr gering (DERA 2025, S. 98). Das lässt sich unter anderem damit erklären, dass es beispielsweise in Deutschland keinen eigenen Abfallschlüssel<sup>12</sup> für EoL-Magnete gibt und deshalb Magnetabfälle in unterschiedlichen Warengruppen gehandelt werden. Dadurch können EoL-Magnete je nach Recyclingverfahren als Abfall oder als Vorprodukt gehandelt werden (Interview Oehlmann; DERA 2024, S. 20). In Deutschland gibt es daher noch keinen relevanten Handel mit EoL-Magneten, allenfalls bilaterale Preisabsprachen zwischen Recyclingunternehmen und Verwertern. Weitere Gründe für die geringen Rücklaufmengen bestehen darin, dass Komponenten wie Permanentmagnete in Windkraftanlagen oder Akkus und Elektromotoren in E-Autos, in denen SEE enthalten sind, das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht haben. Außerdem sind die Stoffströme, die vor allem durch Elektroschrott entstehen, sehr heterogen und werden nicht unbedingt mit dem Ziel gesammelt, SEE zu recyceln. So ist beispielsweise das Recycling von NiMH-Akkumulatoren darauf ausgelegt, Nickel, Eisen und Kobalt zurückzugewinnen. Die auch enthaltenen SEE werden bei dem Recyclingprozess nicht getrennt und gehen somit für eine erneute Verwendung verloren (BGR 2021, S. 8). Auch die Rückgewinnung von SEE aus Leuchtstoffen hat sich bislang nicht als wirtschaftlich erwiesen (BGR 2021, S. 8).

Die geringen Inputmengen haben bislang dazu geführt, dass die Wirtschaftlichkeit von Recyclingverfahren vor allem bei Magneten, nicht aber bei anderen Komponenten mit SEE gegeben ist (Interviews Burkhardt, Bender; BGR 2021, S. 8; Bhattarai et al. 2024). Darüber hinaus sind die zuvor genannten Recyclingverfahren technisch aufwendig. Der Grund dafür ist wiederum die Heterogenität der Stoffströme, die für das Recycling infrage kommen und die jeweils unterschiedliche Verfahren erfordern. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass Verunreinigungen den Recyclingprozess beeinflussen. Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn möglichst reine SEE zurückgewonnen werden sollen, um daraus wiederum spezifische Komponenten herstellen zu können. Letztlich ist bei den Recyclingverfahren – ähnlich wie bei der zuvor geschilderten Weiterverarbeitung von Primärrohstoffen (Kapitel 2) – die Abtrennung unterschiedlicher SEE, zum Beispiel Neodym, Dysprosium und Praseodym, aufwendig (Bhattarai et al. 2024).

Bislang sind Kapazitäten und Know-how für das Recycling vor allem in China entstanden (BGR 2021, S. 8). Recycelte SEE oder Oxide, Legierungen sowie Komponenten müssen also nach China transportiert werden, um in die dort etablierten Wertschöpfungsketten für Weiterverarbeitung sowie der Herstellung von Zwischenprodukten und Komponenten aus SEE eingebracht zu werden. Daraus resultiert ein erheblicher logistischer Aufwand beim Auf- bzw. Ausbau von Recyclingstoffströmen in Deutschland und Europa. Ohne eigene Recyclingkapazitäten sowie weitere Stufen der Wertschöpfungskette kann lediglich die Sammlung von EoL-Input in Deutschland bzw. Europa erfolgen. Der gesammelte EoL-Input wird dorthin transportiert, wo recycelt werden kann. Wenn hierzulande Recyclingkapazitäten entstehen, muss immer noch eine Integration in die weitere Wertschöpfungskette erfolgen. Dies könnte derart gestaltet werden, dass recycelte SEE, Oxide, Legierungen etc. dorthin verschifft werden, wo die weiteren Stufen der Wertschöpfungskette etabliert sind.

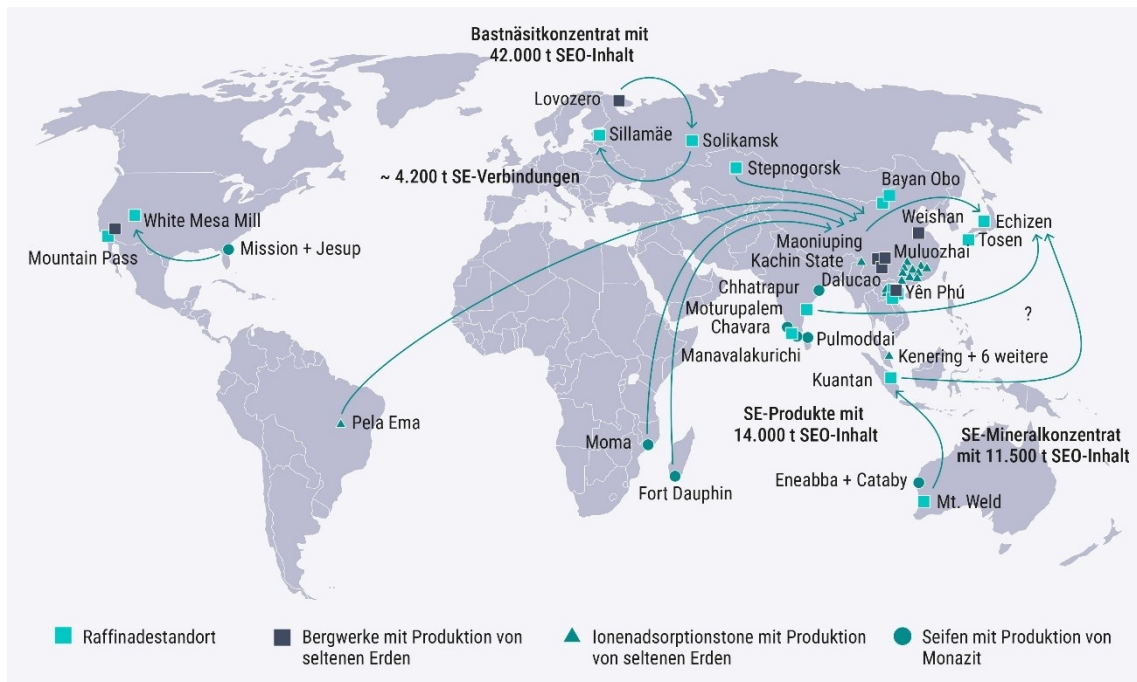
Recycelte SEE, Zwischenprodukte oder Komponenten mit Rezyklatanteil konkurrieren mit neu gefertigten Produkten. Sowohl für Rohstoffe als auch Zwischenprodukte und Komponenten liegen die Marktpreise gegenwärtig unter denen von Rezyklaten bzw. recycelten Produkten. So kann beispielsweise ein recycelter Magnet etwa doppelt so teuer sein wie ein neuer Magnet (Interview Burkhardt). Die Preisentwicklung lässt sich bislang zwar nicht für alle SEE darstellen, aber für ausgewählte Elemente, die Bestandteil von Permanentmagneten sind (Neodym und Dysprosium), lässt sich nachvollziehen, wie die Preisentwicklungen von Primärrohstoffen, Primärmagneten und Altmagneten zusammenhängen. Der Preis für neue Permanentmagnete ist direkt abhängig von den Preisen der Primärrohstoffe. Hier konnte über einen Zeitraum von 5 Jahren (2017 bis 2022) eine Steigerung um 125 % für den Preis von Primärmaterialien für die Magnetproduktion ermittelt werden. Im selben Zeitraum ist der Preis für Altmagnete ebenfalls um 125 % gestiegen, da auch hier der Marktwert der Primärrohstoffe ein wesentlicher Kostenfaktor ist. Hinzu kommen die Aufbereitungskosten. Wenngleich sich die Preisniveaus deutlich unterscheiden, so ist die Entwicklung in ihrer Richtung vergleichbar (DERA 2024, S. 25 f.).

Damit das Recycling von Altmagneten und anderen Komponenten mit SEE wirtschaftlicher wird, gibt es unterschiedliche Optionen. Um beispielsweise die Recyclingquoten zu erhöhen und mehr Elektroschrott mit dem Ziel, SEE zu recyceln, zu sammeln und zu sortieren, könnten die Hersteller von Komponenten stärker in die Verantwortung genommen und dazu verpflichtet werden, in digitaler Form Informationen über die Produkteigenschaften

<sup>12</sup> Ein Abfallschlüssel ist eine standardisierte Kennziffer, mit der Abfälle nach Art und Herkunft systematisch klassifiziert werden.

zur Verfügung zu stellen. So ließe sich leichter nachvollziehen, welche Produktbestandteile wiedergewonnen werden könnten. Zum anderen könnte die Herstellerverantwortung dahingehend weiterentwickelt werden, dass bei der Produktentwicklung der Anteil recycelter Materialien erhöht wird. Letztlich kann Herstellerverantwortung auch dahingehend erweitert werden, dass Rücknahmepflichten erweitert werden, sodass EoL-Produkte einem Recyclingprozess zugeführt werden müssen (Interview Faulstich; Kapitel 4).

**Abbildung 5.2 Lieferketten von seltenen Erden**



Quelle: nach Erdmann (2025, S. 11)

### 5.3 Ausblick: Recycling im Jahr 2035

Gegenwärtig wird in Europa nur rund 1 % der Nachfrage nach Rohstoffen durch recycelte SEE, insbesondere Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium, gedeckt (Burkhardt 2024; DERA 2024, S. 17). Vor allem Magnete, wie sie in Festplatten und Lautsprechern sowie anderen digitalen Technologien vorkommen, sowie Produktionsabfälle sind bislang für Recycling wirtschaftlich relevant gewesen (BGR 2021, S. 8). Jedoch wird das Recycling von derartigem Elektroschrott nicht durchgeführt, um SEE zurückzugewinnen, sondern für andere Materialien (Vuppaladadiyam et al. 2024). Der Grund dafür: Der Anteil an SEE im Vergleich zu anderen Materialien ist beim Elektroschrott gering. Künftig könnte sich dies ändern, wenn diejenigen Magnete bzw. SEE-Komponenten, die in Windkraftanlagen (Permanentmagnete) und Elektromotoren verbaut sind, das Ende ihrer Lebensdauer erreichen und in größeren Mengen für das Recycling zur Verfügung stehen. Als Bestandteil der europäischen Rohstoffstrategie könnten die eingangs genannten Anteile in den kommenden Jahrzehnten deutlich gesteigert werden. So könnten Schätzungen zufolge im Jahr 2035 bereits zwischen 25 und 35 % der Nachfrage und bis 2050 zwischen 30 und 40 % der Nachfrage durch recycelte SEE gedeckt werden (IEA 2024b, S. 88).<sup>13</sup> Dadurch sollen die bestehenden Abhängigkeiten von China reduziert und der steigende Bedarf nach Primärrohstoffen gedeckt werden.

Damit diese Potenziale gehoben werden können, sind zwei zentrale Entwicklungen erforderlich: Erstens der Ausbau von Recyclingkapazitäten in der EU und zweitens hinreichend große Mengen an EoL-Input, also beispielsweise Elektromotoren, Generatoren, Windkraftanlagen, Batterien, Lautsprecher etc. Jedoch gibt es große Unter-

<sup>13</sup> Die Spanne lässt sich dadurch erläutern, dass die International Energy Agency (IEA/Internationale Energieagentur) drei verschiedene Szenarien modelliert hat. Die Szenarien unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Grad der Zielerreichung der international vereinbarten Klimaziele und berücksichtigen unter anderem die Absichtserklärungen bezüglich der Klimaziele sowie die aktuellen politischen Strategien und Maßnahmen zur Zielerreichung.

schiede bei den verschiedenen EoL-Inputströmen. Zum einen befinden sich in den diversen Anwendungen verschiedene SEE in unterschiedlich großen Mengen: So enthält ein Elektromotor eines vollelektrischen Pkw ca. 1 kg Magnete, die SEE enthalten, Windkraftanlagen schon bis zu 2 t Magneten mit SEE, Lautsprecher hingegen nur wenige Milligramm (IEA 2024b, S. 88). Zum anderen sind die Lebenszyklen der Anwendungen unterschiedlich lang, Windkraftanlagen erreichen beispielsweise erst nach 20 bis 30 Jahren das Ende ihrer Lebensdauer. Das bedeutet, dass recyclingfähiges Material in großen – und auch wirtschaftlich bedeutsamen – Mengen gegenwärtig noch nicht zur Verfügung steht (Interview Burkhardt). Dies könnte sich ändern, wenn beispielsweise magnethaltige Hard-Drive-Disk(HDD)-Festplatten, wie sie in großer Zahl zum Beispiel in Serverfarmen verbaut sind, durch (magnetfreie) Solid-State-Disk(SSD)-Laufwerke ersetzt werden. Die magnethaltigen Festplatten könnten dann für das SEE-Recycling verfügbar sein (DERA 2024, S. 18).

Da erwartet wird, dass die weltweite Menge an Elektroschrott künftig weiter ansteigen wird, besteht auch hier das Potenzial, dass künftig größere Mengen an SEE aus Elektroschrott wiedergewonnen werden können. Doch sowohl die dafür notwendigen hydro- wie auch die pyrometallurgischen Prozesse müssten noch verbessert werden, um negative Umweltfolgen, etwa durch den Einsatz von Säuren, zu minimieren (Vuppaladadiyam et al. 2024).

Auch aus anderen Quellen, wie zum Beispiel Phosphatdüngemitteln, könnten künftig seltene Erden wie beispielsweise Lanthan und Cer, aber auch Praseodym und Neodym, zurückgewonnen werden. Hierzu laufen gegenwärtig erste Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (Brückner 2021).

Da beim Umgang mit heterogenen Stoffströmen ein wesentlicher Kostentreiber die Sortierung und die damit verbundenen Personalkosten sind, kann davon ausgegangen werden, dass hier eine stärkere Automatisierung angestrebt wird, um die Kosten zu reduzieren.

#### **Kasten 5.1      Projektionen Recycling**

##### **Szenario „Blockierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.1)**

*Projektion: Bis 2035 werden Recyclingkapazitäten in der EU nur in geringem Umfang ausgebaut.*

Da politische Maßnahmen nur zögerlich umgesetzt werden, bleiben Investitionen in Recyclingverfahren begrenzt. Recyclingkapazitäten werden nur in geringem Umfang ausgebaut. Rezyklate sind somit nur selten preislich wettbewerbsfähig verglichen mit Primärrohstoffen. Die Recyclingquote steigt demzufolge nur leicht auf 5 %. Vor allem bei Konsumgütern (Smartphones, Lautsprecher, Monitore etc.) gelingt keine wettbewerbsfähige Rückgewinnung seltener Erden.

##### **Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2)**

*Projektion: Bis 2035 werden Recyclingkapazitäten in der EU erweitert und EoL-Input gesammelt. Das Recycling findet aber weiterhin im Wesentlichen in China statt.*

Dank einer ambitionierten Umsetzung des europäischen Critical Raw Materials Act und einer konsequenten Förderung und Subventionierung werden zunehmend Investitionen in Recyclingverfahren getätigt. Auch beim Design von Produkten wird Recycling stärker mitgedacht. Allerdings werden EoL-Stoffströme vor allem dorthin gelenkt, wo bereits ausreichend Kapazitäten verfügbar sind. So wird eine Recyclingquote von 20 % erreicht und Rezyklate werden bei der Herstellung neuer Komponenten (zum Beispiel Permanentmagnete) verwendet. Dadurch entsteht eine europäische Recycling- und Vorprodukt-Infrastruktur.

##### **Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3)**

*Projektion: Bis 2035 entstehen ausreichend Recyclingkapazitäten in der EU und EoL-Stoffströme können in der EU verarbeitet sowie weitere Stufen in der Wertschöpfungskette aufgebaut werden.*

Neue Recyclingtechnologien und kostengünstige Verfahren werden realisiert. Dank digitaler Produktpässe gelingt eine bessere Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen. Weil Komponenten wie Permanentmagnete und Elektromotoren in den späten 2020er Jahren das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, können mehr Komponenten, die seltene Erden enthalten, der Wiederverwertung zugeführt werden. Mit erhöhten Rücklaufmengen steigt die Wirtschaftlichkeit von Recycling und entsprechende Anlagen entstehen. EoL-Stoffströme werden primär nach Europa verlagert, weil ausreichend Kapazitäten für die Wiederaufbereitung bestehen. Die Recyclingquote in der EU steigt auf 40 %. In einigen Bereichen (zum Beispiel Elektromobilität) entstehen vollständig integrierte Materialkreisläufe.

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Mit Blick auf den Ausbau der Recyclingkapazitäten wurde in Kapitel 2.3 eine Übersicht über die existierenden und angekündigten Projekte verschiedener Unternehmen gegeben (Tabelle 2.3). Falls diese realisiert werden, könnten bereits 2026 ausreichend Kapazitäten verfügbar sein, um 7 % der weltweiten Nachfrage nach SEE decken zu können (IEA 2024b, S. 95).

Spezifisch für das Recycling von Neodym-Eisen-Bor-Magneten wertete die DERA (2024) unterschiedliche Studien der vergangenen Jahre aus und erstellte eine Übersicht über die künftig verfügbaren Mengen an SEE-Magneten (Tabelle 5.3).

**Tabelle 5.3 Recyclingpotenziale ausgewählter SEE-Magnet-Materialströme mit Ausblick auf die zukünftige Entwicklung**

| Studie                 | Materialstrom                                   | Region      | Zeitraum und Menge an EoL-Magneten   |
|------------------------|---|-------------|--|
| Elwert et al. (2018)   | NdFeB-Magnete allgemein                         | Europa      | 2015: 150 t (davon 60 bis 70 t Produktionsabfall)<br>2016 bis 2040: 10.300 t bis 183.000 t |
| Reimer et al. (2018)   | NdFeB allgemein                                 | Europa      | 2018 bis 2040: 25.700 t bis 233.000 t  |
| UBA (2019)             | NdFeB allgemein                                 | Deutschland | 2015: 800 t<br>2030: 1.700 t<br>2040: 4.800 t  |
| GWEC (2023)            | NdFeB Windkraft                                 | Welt        | 2027: 15.000 t   |
| Schulze/Buchert (2016) | NdFeB allgemein                                 | Welt        | 2020: 15.000 t bis 22.000 t<br>2030: 27.000 t bis 52.000 t                                 |
| Schulze/Buchert (2016) | Produktionsabfälle für rohstoffliches Recycling | Welt        | 2020: 28.000 t bis 45.000 t<br>2030: 60.000 t bis 158.000 t                                |
| IEA (2022)             | SEE (Nd, Pr, Dy, Tb)                            | Welt        | 2030: 11.000 t<br>2040: 12.000 t   |

NdFeB = Neodym-Eisen-Bor-Magnete

Quelle: nach DERA (2024, S. 18)

Nicht nur zeigt sich, dass die geschätzten Mengenpotenziale stark variieren; auch die Zeitpunkte, zu denen die jeweiligen Materialströme erwartet sowie die Recyclingkapazitäten verfügbar sein werden, werden ersichtlich. Für Windkraftanlagen hängt die für ein Recycling verfügbare Menge beispielsweise nicht nur von der Lebensdauer der jeweiligen Anlagen ab, sondern auch von der Ausbaugeschwindigkeit. Insofern wird erwartet, dass erst ab 2030 ein Anstieg an verfügbaren EoL-Magneten eintritt (DERA 2024, S. 19). Somit besteht ein Zeitfenster für die Stärkung der wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen. Angesichts der chinesischen Marktführerschaft ist vor allem ein Auf- bzw. Ausbau von Kompetenzen und Know-how in Deutschland und Europa notwendig, um die vorhandenen Potenziale des Recyclings seltener Erden heben und eine eigene Wertschöpfung etablieren zu können.

## 6 Szenarien 2035: Mehr Souveränität bei seltenen Erden?

Wie in Kapitel 1 dargelegt, erfolgte auf Basis der Ergebnisse der Desktoprecherche und der Experteninterviews die Ableitung unterschiedlicher Entwicklungsmöglichkeiten (Projektionen) für die Schlüsselfaktoren der Rohstoffsouveränität. Die unterschiedlichen Projektionen werden jeweils am Ende der entsprechenden Unterkapitel vorgestellt. Die Projektionen wurden miteinander kombiniert und zu den drei folgenden Szenarien weiterentwickelt.

### 6.1 Blockierte Souveränitätswende: Chinas Dominanz und Europas Zögern verhindern Diversifizierung

- Die globale Ordnung im Jahr 2035 hat sich in zwei Blöcke aufgespalten – China und Russland auf der einen Seite, die USA und die EU auf der anderen Seite, wobei die USA und China teilweise als eigenständige Supermächte agieren. Sicherheit hat Vorrang vor Nachhaltigkeit. Die Nachfrage nach seltenen Erden verschiebt sich deshalb von grünen Technologien hin zum militärischen Bereich und steigt nur verhalten an. Afrikanische und asiatische Länder schließen lieber mit den USA und China Rohstoffpartnerschaften als mit der EU. Investitionen in den Rohstoffabbau stagnieren aufgrund der schwachen Nachfrage, geopolitischer Unsicherheiten und chinesischer Gegenstrategien, die die Souveränitätsbestrebungen der EU torpedieren sollen. Chinas bereits gefestigte Stellung im Bergbau und in der Raffination ermöglicht es dem Land, seine Dominanz nachhaltig zu verteidigen. Recycling und Substitution bleiben Randthemen ohne signifikanten Einfluss auf die Versorgungslage. Chinas Marktmacht und Europas Zögerlichkeit verhindern eine relevante Rohstoffunabhängigkeit.

#### *Sicherheit statt Nachhaltigkeit: die politische Verschiebung der 2020er Jahre*

Es ist 2035. Es zeichnet sich eine Polarisierung der Welt in zwei Blöcke ab: Trotz der politischen Spannungen zwischen den USA und der EU bis Ende der 2020er Jahre befinden sich der europäische Staatenbund und die USA inzwischen häufiger gemeinsam in einer antagonistischen Rolle gegenüber China und Russland. Die beiden Supermächte – die USA und China – agieren allerdings nicht nur als Blockführer, sondern zeitgleich als eigenständige Supermächte mit eigenen strategischen Interessen, die teilweise über die Logik der Blockbildung hinausgehen.

Indien, größte Demokratie der Welt, aber auch Teil der BRICS-Staatengruppe, schlägt sich bei Konflikten zwischen den Blöcken je nach indischer Interessenlage entweder auf die Seite der USA und der EU oder auf die Seite Chinas und Russlands.

Sicherheit und Verteidigung sind in den 2020er Jahren weltweit in den Vordergrund gerückt – sowohl in den politischen Debatten als auch in den nationalen Haushalten. Selbst in Staaten, die einst Vorreiter einer ambitionierten Klima- und Umweltpolitik waren, haben Dekarbonisierung, Kreislaufwirtschaft und industrielle Transformation an Bedeutung verloren.

#### *Verhaltene Nachfrageentwicklung*

Die Nachfrage nach seltenen Erden entwickelt sich bis 2035 deutlich schwächer als noch zu Beginn des Jahrzehnts erwartet. Der Bedarf an SEE für grüne Technologien wie Windkraft oder Elektromobilität nimmt ab, während gleichzeitig die Nachfrage für militärische Anwendungen steigt. Für Militärtechnologien werden aber vergleichsweise weniger Mengen SEE benötigt als für grüne Technologien. Insgesamt ergibt sich dadurch nur ein geringer Anstieg der Gesamtnachfrage – rund 1 % pro Jahr. Dazu trägt auch bei, dass durch Anpassungen in den Produktionsprozessen der SEE-Materialeinsatz reduziert werden kann. Das Nachfrageniveau im Jahr 2035 liegt mit rund 10 % somit nur geringfügig über dem Stand von 2025.

#### *Bis 2035 kann die EU ihren Zugang zu SEE in Drittländern kaum verbessern*

Um ihren Zugang zu seltenen Erden und damit perspektivisch ihre Versorgungslage zu verbessern, bemüht sich die EU weiterhin um Rohstoffpartnerschaften mit Ländern, die über bedeutende SEE-Reserven verfügen. In vielen afrikanischen und asiatischen Ländern konkurriert sie dabei allerdings mit China und den USA. Die USA und China machen diesen Ländern häufig attraktivere Angebote, beispielsweise in Bezug auf Wirtschaftskooperatio-

nen oder Infrastrukturinvestitionen, als die EU – sie gerät ins Hintertreffen. Selbst wenn die EU erfolgreich Rohstoffpartnerschaften abschließen kann, werden diese erst in den 2040er Jahren zur Versorgung mit seltenen Erden beitragen können.

#### *Investitionsklima lässt Bergbauprojekte außerhalb der chinesischen Einflussphäre stagnieren*

Das Investitionsklima für Bergbauprojekte hat sich angesichts der nur verhalten steigenden Nachfrage nach seltenen Erden, der zunehmenden Unübersichtlichkeit der geopolitischen Lage und von Preisvolatilitäten eingetrübt, zu denen China durch die strategische Ausweitung bzw. Verknappung des Angebots an SEE beiträgt.

Peking reagiert auf die europäische Souveränitätspolitik mit der gezielten Verschlechterung von Investitionsbedingungen außerhalb seines Einflussbereichs: Es erhöht zeitweise seine eigenen Produktions- und Weiterverarbeitungsquoten – und kann damit den Weltmarkt zu günstigen Preisen beliefern, sofern nicht gerade Exportkontrollen als politisches Druckmittel verhängt werden und zur Reduzierung des Angebots führen. Ohne einen staatlich garantierten Mindestpreis für Produzenten, an deren Vorhaben die EU finanziell beteiligt ist oder die in ihrem Einflussbereich produzieren, lassen sich Erträge in einem dynamischen Preisumfeld kaum abschätzen. Investitionsentscheidungen werden dadurch erschwert. Neue Bergbaustandorte – vor allem in westlichen Industrienationen – könnten unter diesen Bedingungen wirtschaftlich nicht konkurrieren. Nur Bergbauprojekte, die gezielt durch chinesisches Kapital und Know-how gefördert werden, haben eine Chance auf Erfolg.

#### *Raffination bleibt chinesisch dominiert*

Auch im Bereich der Weiterverarbeitung bleibt China führend. Zwar geht der chinesische Marktanteil leicht zurück, doch scheitert der Aufbau nennenswerter Raffinationskapazitäten in vielen Ländern außerhalb Chinas an hohen Investitionshürden, langwierigen Genehmigungsprozessen, dem Mangel an Fachkräften und Umweltschutzauflagen, die zwar abgeschwächt worden sind, jedoch immer noch über dem chinesischen Niveau liegen. Zudem ist die Raffination außerhalb Chinas häufig nicht wettbewerbsfähig: Die chinesische Industrie kann in der Regel zu deutlich geringeren Kosten raffinieren.

#### *Recycling als Randthema – Quoten bleiben niedrig*

Auch das Recycling bietet keinen Ausweg aus der strategischen Abhängigkeit. Da politische Maßnahmen nur zögerlich umgesetzt werden, bleiben in der EU Investitionen in Recyclingverfahren begrenzt. Recyclingkapazitäten werden nur in geringem Umfang ausgebaut. Rezyklate sind somit nur selten preislich wettbewerbsfähig verglichen mit Primärrohstoffen. Die Recyclingquote steigt demzufolge nur leicht auf 5 %. Besonders im Konsumgüterbereich – bei Smartphones, Lautsprechern oder Monitoren – gelingt keine wettbewerbsfähige Rückgewinnung seltener Erden.

#### *Kaum Fortschritte in der Substitutionsforschung*

In der Substitutionsforschung für Permanentmagnete können kaum Fortschritte erzielt werden, was vor allem an noch unbeantworteten Forschungsfragen und technischen Hürden liegt, aber auch an der begrenzten Forschungsförderung in diesem Bereich. Mit SEE-freien Magneten und Neodym-Eisen-Bor-Magneten mit geringerem Dysprosium- und Terbiumgehalt kann nach wie vor noch nicht die gleiche Leistungsfähigkeit wie mit herkömmlichen Magneten erreicht werden. Tetrataenit ist nicht im industriellen Maßstab verfügbar. Erfolge zeigen sich allenfalls bei der Reduzierung des SEE-Einsatzes, beispielsweise bei vollelektrischen und Plug-in-Hybrid-Pkw, bei Permanentmagneten für Windkraftanlagen und in der Industrie.

#### *Fazit*

Die EU befindet sich in einer schwierigen Lage: Um resilienter gegenüber den aktuellen geopolitischen Entwicklungen zu werden, müsste sie ihre Rohstoffstrategie eigentlich konsequent umsetzen. Doch genau diese konsequente Umsetzung wird durch die Ad-hoc-Krisen der Weltpolitik immer wieder torpediert. Sie binden politische Aufmerksamkeit, institutionelle Kapazitäten und finanzielle Ressourcen – und blockieren damit jene strukturverändernden Maßnahmen, etwa den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft, die langfristig zur strategischen Unabhängigkeit beitragen könnten. Gleichzeitig verhindert die chinesische Dominanz der Wertschöpfungskette, die bereits in den 2020er Jahren bestand, wirksame Diversifizierung.

## 6.2 Fragmentierte Souveränitätswende: Neue Bezugsquellen und eigene Verarbeitungsstufen eröffnen begrenzte Handlungsspielräume

- Die EU sieht sich mit einer multipolaren Weltordnung konfrontiert, in der Länder Klima- und Umweltthemen sehr unterschiedlich priorisieren. Die Nachfrage nach SEE steigt daher nur moderat an. Die EU konkurriert mit vielen Ländern um Rohstoffpartnerschaften, manche kann sie abschließen. China setzt seine Exportkontrollen fort: Mit Förderprogrammen und der Einführung eines Referenzpreismodells wird ein Investitionsklima geschaffen, das Bergbauprojekte außerhalb Chinas ermöglicht. Hiervon profitiert direkt wie indirekt auch die EU. Die Weiterverarbeitungskapazitäten in Europa werden ausgebaut. Durch gezielte politische Maßnahmen entsteht eine europäische Recycling- und Vorproduktinfrastruktur. Stoffströme enden aber häufig noch außerhalb Europas. Es können teilweise Fortschritte in der Substitutionsforschung erzielt werden. Durch neue Bezugsquellen und eigene Verarbeitungsstufen kann die EU ihre Handlungsspielräume bedingt erweitern.

### *In einer multipolaren Weltordnung*

Es ist 2035. Der politische und wirtschaftliche Aufstieg einiger Länder hat die Entstehung einer multipolaren Weltordnung begünstigt, in der die USA und China wichtig bleiben, aber nicht hegemonial agieren (können). Die unterschiedlichen Länder kooperieren und konkurrieren miteinander in diversen Konstellationen und auf verschiedenen Politikfeldern.

### *Moderate Nachfrageentwicklung*

Die Priorisierung von Klima- und Umweltthemen fällt in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich aus, und internationale Kooperationen zur Koordinierung klimapolitischer Maßnahmen sind fragmentiert. Zudem gelten in den einzelnen Weltregionen verschiedene technische Standards. Vor diesem Hintergrund kommen der Ausbau der Elektromobilität und der Zubau erneuerbarer Energien global betrachtet nur schleppend voran. Die Nachfrage nach seltenen Erden ist infolgedessen im Vergleich zur Mitte der 2020er Jahre nur moderat um jährlich 4 % angestiegen und liegt 2035 48 % über dem Niveau von 2025.

### *Teilweise besserer Zugang zu SEE in Drittländern*

Die EU kann ihren Zugang zu SEE in Drittländern teilweise ausbauen. Die Zielländer für Rohstoffpartnerschaften wägen gründlich ab, wessen Angebot sie annehmen. Sie verhandeln strategisch mit den USA, China, der EU und anderen Ländern. Für manche Zielländer kann die EU den attraktivsten Deal anbieten: zum Beispiel die Möglichkeit, Produkte in den größten Binnenmarkt der Welt zu exportieren.

### *Fortsetzung der chinesischen Exportkontrollen*

Die EU gerät wiederholt in das Spannungsfeld geökonomischer Rivalitäten zwischen den USA und China. Handels- und Zollkonflikte flammen in wiederkehrenden Wellen auf – mit direkten Auswirkungen auf die Versorgung mit seltenen Erden. Die Exportkontrollen bezogen auf SEE werden fortgesetzt: Mal kommt es zu minimalen Erleichterungen (beispielsweise werden bürokratische Aufwände abgebaut), mal zu Verschärfungen, dann müssen Unternehmen weitreichende Informationen über ihre Lieferketten offenlegen, und die Antragsbearbeitung wird verzögert. China setzt Exportkontrollen für SEE und SEE-Produkte wie Magnete als Druckmittel ein, etwa als Reaktion auf US-Exportkontrollen im Halbleiterbereich. Dies führt zu einer spürbaren Verknappung von SEE und SEE-Produkten auf dem Weltmarkt. Besonders betroffen sind Schlüsselindustrien wie die europäische Automobilbranche, der Maschinen- und Anlagenbau sowie energie- und sicherheitsrelevante Technologien – E-Motoren, Robotik oder Drohnen.

### *Marktgestaltung als Produktionsmotor*

Durch die anhaltenden Exportkontrollen für SEE und Produkte mit SEE erscheint es sinnvoll, Bergbauprojekte außerhalb Chinas konsequent voranzutreiben. Neben umfangreichen Förderprogrammen tragen staatlich garantierte Referenzpreise mit Gewinnabschöpfung zu einem positiven Investitionsklima in westlichen Industrienationen und ihren Partnerländern bei. Diese Maßnahmen ermöglichen Unternehmen Planungssicherheit auch für Phasen, in denen es durch ein Überangebot zu einem Preisverfall kommen könnte.

### *Ausweitung des SEE-Bergbaus weltweit*

2023 stammen noch 67 % der weltweiten Bergbauförderung von SEE aus China. Bis 2035 kann diese Quote jedoch verringert werden: 13 der 19 weltweit am weitesten fortgeschrittenen Bergbauprojekte nehmen bis zu Beginn der 2030er Jahre die Produktion auf. Australien, bereits zuvor wichtigster SEE-Bergbaustandort weltweit nach China, etabliert sich mit fünf Projekten als zentraler Akteur unter den Neuentwicklungen, gefolgt von Kanada mit zwei aktiven Minen. Weitere Standorte entstehen in Angola, Laos, Madagaskar, Südafrika, Tansania und den USA. Die Vereinigten Staaten, Laos und Madagaskar können so ihr Standortportfolio erweitern. Angola, Südafrika und Tansania sind hingegen Neulinge im Bereich SEE-Förderung. Kanada, Laos sowie ein australisches Projekt fördern dabei auch die besonders begehrten schweren seltenen Erden, was diese Standorte geopolitisch zusätzlich aufwertet.

Gleichzeitig zeigt sich: Ganz ohne China geht es weiterhin nicht. Die neuen Bergbaustandorte in Laos und Tansania sind stark von chinesischen Investoren abhängig. Ihre Produkte fließen weitgehend in chinesische Wertschöpfungsketten ein. Auch Nechalecho in Kanada wird zumindest teilweise von chinesischem Kapital gestützt.

Die Mine exportiert in die USA, nach Frankreich und Norwegen, die angolanische Mine nach UK und die australische Mine Yangibana nach Estland.

### *Europäische Anknüpfungspunkte im Rohstoffsystem der SEE*

Auch die EU kann – direkt wie indirekt – vom Bergbauboom profitieren. Bereits 2025 beteiligte sie sich im Rahmen des CRMA an zwei außereuropäischen Bergbauprojekten: Das südafrikanische Vorhaben Zandkopsdrift von Frontier Rare Earths und Songwe Hill in Malawi (Mkango Resources) nehmen bis 2030 erfolgreich den Betrieb auf. Da Songwe Hill seine Produktion in Mkangos Separationsanlage Puławy Rare Earth in Polen vornimmt, ist hier eine Blaupause für eine integrierte Lieferkette zugunsten der EU entstanden. Allerdings leidet Malawi extrem unter den Auswirkungen des Klimawandels, sodass ein verlässlicher Export aus seinen Minen nicht immer gewährleistet ist. Das Land ist zudem abhängig von China, das dort unter anderem in den Abbau von Titan investiert.

Aus europäischer Perspektive sind die EU-Rohstoffpartnerschaften mit Australien und Kanada relevant für das Aufbrechen der chinesischen Dominanz im Bergbau. Wie bereits erwähnt, exportieren zwei neu in Betrieb genommene Minen in Australien und Kanada ihre Produkte unter anderem zur Weiterverarbeitung nach Estland und Frankreich.

Die EU-Rohstoffpartnerschaft mit Norwegen wird allerdings erst in der übernächsten Dekade Früchte tragen, wenn das Bergbauprojekt Fen gegen Ende der 2030er oder zu Beginn der 2040er Jahre in die Umsetzung geht.

### *Europäische Raffinations- und Recyclingkapazitäten im Aufbau*

Parallel zur Rohstoffförderung weltweit wächst auch die Weiterverarbeitungskapazität in Europa. Mit Projekten wie CAREMAG in Frankreich, dem bereits erwähnten Puławy Rare Earth in Polen sowie weiteren Anlagen in La Rochelle und im schwedischen Luleå wird das im CRMA formulierte Ziel, 40 % des eigenen Raffinationsbedarfs innerhalb der EU zu decken, deutlich übertroffen.

Der Aufbau einer kreislauforientierten Rohstoffpolitik ergänzt diese Bemühungen. Dank der ambitionierten Umsetzung des CRMA und gezielter Subventionen entwickelt sich ein tragfähiges Recyclingsystem für End-of-Life-Komponenten. Produktdesigns werden zunehmend auf Kreislauffähigkeit optimiert. Allerdings konzentrieren sich die Stoffströme auf Regionen mit bereits bestehender Infrastruktur. Eine Recyclingquote von rund 20 % wird erreicht, Rezyklate fließen in die Herstellung neuer Komponenten wie Permanentmagnete ein. So entsteht eine europäische Recycling- und Vorproduktinfrastruktur.

### *Teilweise Fortschritte bei der Substitutionsforschung*

In der Substitutionsforschung und in der Anwendung ihrer Ergebnisse geht es voran: In einem ersten EU-Pilotprojekt gelingt die Herstellung von Tetrataenit für die industrielle Fertigung.

Mittelstarke Magnete ohne die schweren SEE Dysprosium und Terbium werden als Alternativen zu konventionellen SEE-Permanentmagneten in Nischenanwendungen eingesetzt, etwa im Automobil- und Energiebereich sowie in der Industrie.

### Fazit

Die EU ist in der Lage, ihre Bezugsquellen von seltenen Erden zu diversifizieren. Allerdings liegen diese Bezugsquellen sämtlich außerhalb Europas. In einer multipolaren Weltordnung mit wechselnden Allianzen und Konflikten könnte dies von Nachteil sein, wenn beispielsweise Lieferketten aus machtpolitischen Erwägungen oder aufgrund von Extremwetterereignissen, Naturkatastrophen oder Pandemien unterbrochen werden. Zudem baut die EU Verarbeitungs- und Recyclingkapazitäten auf. Allerdings bleibt die chinesische Dominanz am Ende der Wertschöpfungskette noch spürbar.

### 6.3 Proaktive Souveränitätswende: Reserven, Kreislaufstrategien, Substitution und vorausschauendes Handeln stärken die europäische Resilienz

- Handels- und Zollkonflikte flauen ab. Die Rückkehr von Klima- und Umweltfragen auf die politischen Agenden lässt die Nachfrage nach SEE beträchtlich zunehmen. Die EU schließt Rohstoffpartnerschaften ab und investiert mittels Public Private Partnerships in aussichtsreiche Bergbauprojekte. Dies wird dazu beitragen, ihre Versorgung in den 2040er und 2050er Jahren zu sichern. Dass es bis 2035 kaum Fortschritte im Bergbau außerhalb Chinas gegeben hat, verursacht inzwischen kaum Probleme. Denn die EU hatte Mitte der 2020er Jahre noch rechtzeitig ihre Souveränitätsstrategie nachjustiert und konsequent auf Recycling und Substitutionsforschung gesetzt. Als Brückeninstrument zur Dämpfung damaliger durch China erzeugter Preisvolatilitäten diente die EU-Reserve für SEE. Inzwischen ist die EU gegen die Störung und Unterbrechung von Lieferketten gewappnet: Ein beträchtlicher Teil seltener Erden, die sie benötigt, befindet sich in Art von Reserven und recyclingfähigen Produkten in ihrem Hoheitsgebiet.

#### *Handelskonflikte flauen ab*

Es ist 2035. Nachdem Handels- und Zollkonflikte sowie Kriege das wirtschaftliche Wachstum in den USA, China und der EU deutlich ausgebremst haben, kommt es zu einer handelspolitischen Entspannung zwischen den drei Weltregionen. Zwar ist die regelbasierte Ordnung von einst nach wie vor Vergangenheit, jedoch werden seltene Erden und Chips kaum mehr als Druckmittel eingesetzt. Die politische Weltlage entschärft sich insgesamt und damit auch der vehemente Kampf um Einflussphären. Vor diesem Hintergrund gelingt es der EU, Rohstoffpartnerschaften zu schließen, die in den 2040er und 2050er Jahren zu ihrer Versorgung beitragen können. EU-finanzierte Public Private Partnerships investieren in aussichtsreiche Bergbauprojekte und sichern sich über die Beteiligung Abnahmequoten in der Zukunft. Ausgleichsmechanismen sollen dazu beitragen, dass es zukünftig konkurrenzfähige Produktionsbedingungen (Level Playing Field) geben wird.

#### *Nachfrageboom durch Rückkehr des Klimaschutzes*

War der Klimawandel Mitte der 2020er Jahre auf den politischen Agenden ins Hintertreffen geraten, kam er durch sich häufende Extremwetterereignisse und klimabedingte Migration im Globalen Süden mit Wucht zurück in die politische Arena. Allein in Deutschland steigt die Nachfrage nach SEE jährlich um ca. 8 % an – die Gesamtnachfrage im Jahr 2035 ist damit mehr als doppelt so hoch wie 2025.

Getrieben wird die steigende Nachfrage von politisch und gesellschaftlich unterstützten Klimaschutzmaßnahmen. Dazu zählen eine Förderung für klimaneutrale Zukunftstechnologien (Elektromotoren, Windkraftanlagen, Katalysatoren) sowie ein massiver Ausbau von Schlüsselindustrien (chemische Industrie, Motoren- und Batterieproduktion etc.) für eine klimaneutrale Transformation.

#### *Kaum Fortschritte im Bergbau – kaum Probleme*

Bis 2035 gehen nur jene Bergbauprojekte in die Produktion, die bereits 2025 in die Umsetzungsphase eingetreten sind und zentrale Voraussetzungen erfüllen – darunter günstige klimatische Bedingungen, funktionierende Infrastruktur, geringe Transportkosten, förderliche Bergbaugesetzgebung, begleitende Wertminerale und gesicherte Finanzierung. Das sind die Bergbauprojekte Eneabba (Australien), Toliara (Madagaskar) und Phaxay (Laos).

Diese drei Standorte schaffen allerdings nur begrenzte zusätzliche Kapazitäten – zudem fördern sie keine nennenswerten Mengen an schweren seltenen Erden. Außerdem exportiert Phaxay seine Produkte über den Grenzübergang Mengkang nach China, Toliara liefert sein Monazitkonzentrat wesentlich zur Weiterverarbeitung nach

White Mesa Mill in Utah/USA. Dass die weltweite Dominanz Chinas im Bergbau durch die neuen Bergbaustandorte nicht aufgelöst werden kann, fällt aus europäischer Perspektive allerdings inzwischen weniger ins Gewicht.

#### *Nachjustierung der Rohstoffpolitik: Die EU setzt auf Recycling, Substitute und Reserven*

Als sich Mitte der 2020er Jahre abzeichnete, dass die Abhängigkeiten von China im Primärrohstoffbereich in der nächsten Dekade kaum auflösbar sein würde, justierte die EU ihre Souveränitätsstrategie neu und verlagerte den Fokus stärker auf Recycling und die Substitutionsforschung für SEE. Zur Überbrückung der Zeit, innerhalb derer die Nachjustierung ihre Wirkung entfalten konnte, ist ein staatlicher Interventionsmarkt für SEE geschaffen worden: In Analogie zu strategischen Öl- und Gasreserven wurde eine gemeinsame EU-Reserve für SEE aufgebaut – zur Dämpfung von Preisvolatilitäten und als Notfallinstrument bei geopolitischen Engpässen. Dies trug dazu bei, sich in Handels- und Zollkonflikten mit China zu behaupten, die noch bis Ende der 2020er Jahre andauerten. Die EU-Reserve für SEE besteht bis heute fort als eine Art geopolitisches Notfallinstrument für den Fall, dass sich die weltpolitische Lage wieder zum Schlechteren verändert.

#### *Recycling nimmt Fahrt auf – Europa etabliert Stoffkreisläufe*

Inzwischen stehen neue Recyclingtechnologien für SEE und kostengünstige Verfahren zur Verfügung, die auch eingesetzt werden. Da Komponenten wie Permanentmagnete und Elektromotoren in den späten 2020er Jahren das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, können mehr Komponenten, die SEE enthalten, der Wiederverwertung zugeführt werden. Dank digitaler Produktpässe gelingt eine bessere Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen. Mit erhöhten Rücklaufmengen steigt die Wirtschaftlichkeit von Recycling und entsprechende Anlagen entstehen. End-of-Life-(EoL)-Stoffströme werden primär nach Europa verlagert, da ausreichend Kapazitäten für die Wiederaufbereitung bestehen. Die Recyclingquote in der EU steigt somit auf 40 %. In Teilbereichen – etwa bei Elektromobilität – entstehen geschlossene Materialkreisläufe.

#### *Ausreichende Raffinationskapazitäten außerhalb Chinas*

Zusätzlich zu den europäischen Raffinationsprojekten nehmen bis Mitte der 2030er Jahre weltweit weitere Raffinerien den Betrieb auf, im Wesentlichen in den USA und Australien. Europäische Unternehmen können mit einigen Raffinerien langfristige Lieferverträge abschließen.

#### *Substitute reduzieren Importabhängigkeit*

Langjährig geförderte Forschungsinitiativen ermöglichen die Entwicklung neuer magnetischer Materialien. Europa kann seine Importe von Magneten aus Seltenerdmetallen bis 2035 deutlich vermindern. Gleichzeitig gibt es Fortschritte bei der künstlichen Herstellung von Tetrataenit im industriellen Maßstab, die in mehreren Pilotprojekten erprobt wurde.

Durch Fortschritte bei der Nanostrukturierungstechnologie können inzwischen zudem leistungsstarke Neodym-Eisen-Bor-Magnete hergestellt werden, für die deutlich weniger Dysprosium und Terbium als in herkömmlichen Permanentmagneten benötigt wird. Inzwischen werden auch Windkraftanlagen mit Hochtemperatursupraleitern in den Generatoren als Alternative zu permanenterregten Generatoren gebaut.

#### *Fazit*

Durch die rechtzeitige Neujustierung und Fokussierung der Souveränitäts- und Rohstoffpolitik auf Recycling und Substitution mit der SEE-Reserve als Brückeninstrument gelingt es der EU, sich bei steigender SEE-Nachfrage weniger erpressbar zu machen. Sie kann maßgeblich auf seltene Erden zurückgreifen, die sich bereits im Binnenmarkt befinden: sei es in Form von Reserven, sei es in Form von SEE, die in ausgedienten Produkten verbaut sind. Für Beeinträchtigungen von Liefer- und Wertschöpfungsketten – aus welchen Gründen auch immer – ist sie daher weniger anfällig. Mit der vorausschauenden und gezielten Beteiligung an SEE-Bergbauprojekten eröffnet sie sich zudem geopolitische Spielräume für die nächsten Dekaden.

## 7 Handlungsperspektiven

- Durch Recycling, Kreislaufstrategien, Substitution und den Aufbau einer EU-SEE-Reserve kann mittelfristig die strategische Souveränität der EU bei seltenen Erden erhöht werden. Der Vorteil ist, dass diese Maßnahmen an SEE ansetzen, die sich bereits in der EU befinden bzw. – im Fall von Substitution – auf die Verminderung der Nachfrage abzielen.
- Die finanzielle Unterstützung von Bergbauprojekten außerhalb Chinas kann langfristig zur Diversifizierung von Bezugsquellen beitragen und ist sinnvoll, sofern in der EU auch Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Primärrohstoffe geschaffen werden.

Die Ergebnisse der TA-Kompakt-Studie bekräftigen die Annahme, dass Chinas Vormachtstellung in der Wertschöpfungskette für Seltenerdelemente, insbesondere bei Permanentmagneten, voraussichtlich auch in den nächsten 10 Jahren bestehen bleiben dürfte (Kapitel 2.2, 2.3, 4.1 u. 4.3). Dies ist besorgniserregend, da China seine dominante Position bereits jetzt in geopolitischen und geoökonomischen Konflikten als Druckmittel einsetzt.

Die Diskussionen um den neuen 5-Jahresplan der chinesischen Staatsführung verdeutlichen, dass China seine Politik der technologischen Souveränität und Technologieführerschaft fortsetzen möchte. Chinas Ziel ist es, die eigene Unabhängigkeit von westlichen Technologien zu erhöhen und gleichzeitig die Abhängigkeit anderer Länder von China zu verstärken (Kamp 2025).

Wenngleich die Ausgangslage herausfordernd ist, haben Deutschland und die EU die Möglichkeit, sich resilienter gegenüber Versorgungsrisiken aufzustellen und ihre Bezugsquellen von SEE bis 2035 – und vor allem mit einem längeren Zeithorizont – schrittweise zu diversifizieren. Dies kann, wie im Szenario „Proaktive Souveränitätswende“ (Kapitel 6.3) angedeutet, vor allem mittelfristig durch die Schaffung von Voraussetzungen für Recycling als Grundlage für die langfristige Etablierung einer Kreislaufwirtschaft gelingen. Zudem erscheinen die Intensivierung der Substitutionsforschung und der Aufbau einer gemeinsamen EU-Reserve für SEE nach dem Vorbild staatlicher Öl- und Gasreserven sinnvoll. Die Vorzüge dieser Kombination von Instrumenten bestehen darin, dass sie auf seltene Erden abzielen, die sich bereits in der EU befinden, etwa in EoL-Produkten oder in Lagern. Substitute tragen zudem dazu bei, den Bedarf an SEE insgesamt zu senken.

### Recycling, Kreislaufstrategien, Substitution und Reserve

Die Europäische Kommission hat mit dem 2024 verabschiedeten CRMA den Rahmen für europäische und nationale Regulierungen geschaffen, die den Weg für eine Kreislaufwirtschaft ebnen können (Kapitel 4.2).

Kennzeichnend für eine Kreislaufwirtschaft mit seltenen Erden ist, dass bereits bei der Produktentwicklung die spätere Recyclebarkeit bedacht, der Produktionsprozess möglichst ohne Abfälle und unter Verwendung erneuerbarer Energien durchgeführt sowie eine Kaskadennutzung für Rohstoffe, Vorprodukte und Komponenten ermöglicht wird. Daneben spielt auch die Verfügbarkeit von (digitalen) Informationen über Produkte sowie von Daten über Wertschöpfungs- und Lieferketten eine zentrale Rolle bei der Gestaltung einer Kreislaufwirtschaft (Kapitel 5).

Bis Ende der 2020er Jahre müssen die Mitgliedstaaten der EU beispielsweise nationale Programme unter anderem zu Stärkung der technologischen Reife von Recyclingtechnologien, zur Abfallvermeidung, zur Wiederverwendung und zur Substitution beschlossen haben und umsetzen:

- *Förderung von Recyclingtechnologien, zum Beispiel im Rahmen nationaler Forschungs- und Innovationsprogramme (CRMA, S. 36):* Die technische Weiterentwicklung und umfangreiche Umsetzung von Recyclingverfahren ist vor allem deshalb relevant, weil damit wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle realisiert werden können, die mit den Kosten für die Primärwertschöpfung konkurrieren können (Interviews Burkhardt, Deubzer, Faulstich; (Kapitel 5.1).
- *Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Reparatur von Produkten durch Vorgaben in nationalen Programmen (CRMA, S. 36):* Insbesondere bei Produkten mit ausgereiften Technologien kann die Verlängerung ihrer Lebensdauer zielführend sein, um Ressourcen zu schonen. Dies kann durch die Etablierung neuer Geschäftsmodelle, wie etwa Leasing-Angebote für Produkte, die Verbesserung der Reparaturfähigkeit sowie die gezielte Verlängerung der technischen Nutzungsdauer, erreicht werden (Interview Deubzer).
- *Förderung der Substitution kritischer Rohstoffe in Produkten und Anwendungen, zum Beispiel im Rahmen nationaler Forschungs- und Innovationsprogramme (CRMA, S. 36):* Die Forschung und Entwicklung an

Vorabfassung – wird durch die lektorierte Fassung ersetzt.

Substituten für seltene Erden kann ebenfalls ein Bestandteil einer Kreislaufwirtschaft sein (Interview Faulstich; Kapitel 3.3).

Weitere wichtige Grundpfeiler für eine Kreislaufwirtschaft sind:

- *Digitale Produktpässe für bestimmte Produktkategorien mit Dauermagneten (CRMA, S. 39 f.):* Diese können zukünftig ein effektives Werkzeug zur Optimierung von Rückgewinnungsquoten und zur Reduktion von Stoffverlusten sein. Sie können allerdings nicht rückwirkend erstellt werden. Das heißt, Produkte, die bereits im Umlauf sind und in einigen Jahren in einen Recyclingprozess überführt werden sollen, verfügen dann noch nicht über digitale Produktpässe (Interview Oehlmann).

Digitale Produktpässe gehören zu Ansätzen, die sich unter dem Stichwort Design to Recycle zusammenfassen lassen. Ziel dieser Ansätze ist es, Produkte am Ende ihres Lebenszyklus leichter – und somit zeit- und kosteneffizienter – zu demontieren sowie Komponenten zu entnehmen, um sie in einen Recyclingprozess zu überführen. Zur Produktgestaltung gehören neben einer modularen Bauweise und einer reduzierten Materialkomplexität auch die Integration von Erkennungstechnologien (Sensorik), um Produkteigenschaften zu überwachen und einzelne Bauteile leichter identifizieren zu können (Interview Faulstich; Kapitel 4.2 und 5.2).

- *Einsatz von Rezyklaten in Dauermagneten (CRMA, S. 40 f.):* Bis spätestens Ende 2031 wird die Europäische Kommission Vorgaben für den Einsatz eines Mindestanteils von Rezyklaten für bestimmte SEE und weitere kritische Rohstoffe machen, die in Dauermagneten verwendet werden müssen (Kapitel 4.2).

Damit Recycling und europäische Rezyklate in der EU gegenüber Recycling in China und chinesischen Rezyklaten allerdings konkurrenzfähig sind, müssten wahrscheinlich Ausgleichsmechanismen geschaffen werden, die den höheren Lohnkosten in der EU und den höheren Umweltstandards Rechnung tragen. Dies kann beispielsweise über staatlich subventionierte Garantiepreise für Rezyklate erfolgen, die für Hersteller von Sekundärrohstoffen in der EU gezahlt werden, oder über Regulierungsansätze wie den WTO-konformen Carbon Border Adjustment Mechanism der EU (Kapitel 4.3).

In Ergänzung der Vorgaben im CRMA kann die Ausweitung der Herstellerverantwortung für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft hilfreich sein. Hersteller oder Importeure von Komponenten, die SEE enthalten, könnten auch für deren Sammlung und Wiederverwertung in die Verantwortung genommen werden (IEA 2024b, S. 97; Kapitel 5.2). Allerdings verursachen Nachweispflichten zum Sammeln/Wiederverwerten erhöhten bürokratischen Aufwand (Interview Deubzer) – ein Spannungsfeld, das bei der Ausgestaltung von Regulierungen stets bedacht werden muss.

Zudem wäre besonders im internationalen Handel eine klare Regulierung als Grundlage für eine korrekte Deklaration von Produkten als Altgeräte, Abfall, Schrott oder Rohstoffe entscheidend. Dadurch könnten illegale Exporte verhindert und der tatsächliche Recyclingwert von Materialien besser erfasst werden (Interview Faulstich; Kapitel 5.2). Durch standardisierte Kennzeichnung von Abfällen können die Sammelkosten reduziert und das Recycling wirtschaftlicher werden (IEA 2024b, S. 97). Auch die im CRMA anvisierten digitalen Produktpässe können einen Beitrag zur Deklaration von Produkten leisten: Denn sie enthalten Informationen zur Zusammensetzung, zur Herkunft und zum Recyclingpotenzial einzelner Materialien und fördern so die Transparenz entlang der gesamten Lieferkette.

Es ist zu erwarten, dass nicht alle Anwendungen, in denen seltene Erden enthalten sind, in den nächsten 10 Jahren in eine funktionierende Kreislaufwirtschaft überführt werden können. Vielmehr wird es sektorale Unterschiede geben. Für Anwendungen wie Permanentmagnete in Windkraftanlagen erscheint eine zunehmende Recyclingquote wahrscheinlich – einerseits, weil diese Magnete besonders hohe Konzentrationen an seltenen Erden aufweisen, andererseits, weil Demontage und Rückführung aufgrund der kontrollierten Betriebsumgebungen relativ gut planbar sind (Interview Faulstich). Auch für bestimmte Bereiche wie NiMH-Akkumulatoren, Leuchtmittel oder Altgeräte aus der Unterhaltungselektronik bestehen bereits erprobte Rückgewinnungsverfahren, die ökonomisch tragfähig erscheinen und mittelfristig skaliert werden könnten (Interviews Faulstich, Oehlmann; Kapitel 5.2).

Eine gemeinsame europäische Lagerhaltung kritischer Rohstoffe wie Seltenerdelemente, wie sie gerade von der EU-Kommission konzeptioniert wird, kann ebenfalls einen Beitrag dazu leisten, mit kurzfristig verhängten Exportkontrollen umzugehen (Kapitel 5.2).

Im CRMA ist eine europäische SEE-Reserve noch nicht vorgesehen, allerdings werden die Mitgliedstaaten verpflichtet, über ihre strategischen Vorräte an die Kommission zu berichten. Zudem wird die Kommission ermächtigt, Richtwerte für ein „sichere[s] Niveau der strategischen Unionsvorräte“ (CRMA, S. 34) vorzugeben.

Privatwirtschaftliche Lagerhaltung von SEE existiert in Deutschland bereits: In der Nähe von Frankfurt am Main lagert die Firma Tradium SEE in einem Bunker für ihre Kunden in der ganzen Welt ein (Schaumann 2025).

### **Unterstützung von Bergbauprojekten innerhalb der EU und in Drittländern, integrierte Wertschöpfungsketten**

Die finanzielle Unterstützung von Bergbauprojekten außerhalb Chinas kann ebenfalls ein wichtiger Ansatz zur Diversifizierung sein (Kapitel 4.2). Im Gegensatz zu den oben präsentierten Maßnahmenbündeln (Recycling, Substitute, Reserven) setzt es jedoch funktionsfähige Lieferketten voraus, da SEE erst einmal in die EU transportiert werden müssen (Kapitel 6.2 Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“).

Wie in dieser TA-Kompakt-Studie dargestellt, ist überdies zu beachten, dass Bergbauprojekte mit erheblichen finanziellen Risiken behaftet sind, Dekaden vergehen können, bis eine Mine tatsächlich in die Produktion geht, und viele Projekte ohne chinesisches Know-how schlicht scheitern (Kapitel 2.2).

Zudem gilt für Primär- ebenso wie für Sekundärrohstoffe: Eine Produktion in westlichen Industrienationen ist häufig nicht konkurrenzfähig. Schwankende Marktpreise bei Primärrohstoffen, verursacht durch Exportbeschränkungen oder die strategische Ausweitung von Produktions- und Weiterverarbeitungsquoten von SEE in China, erschweren die Einschätzungen von Investitionschancen und -risiken – und damit die Kalkulation des wahrscheinlichen Ertrags von Bergbauprojekten. Im Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“ (Kapitel 6.2) tragen staatlich garantierte Referenzpreise mit Gewinnabschöpfung dazu bei, dass Bergbauprojekte in westlichen Industrienationen erfolgreich sind. Tatsächlich könnte ein solches Preismodell auch die heimische Produktion von SEE in der EU oder in westlichen Partnerländern fördern (Kapitel 4.3).

Überdies ist zu bedenken, dass die alleinige Diversifizierung von Bezugsquellen von Primärrohstoffen nicht ausreicht, um strategische Souveränität zu erreichen. Ziel muss die Entstehung integrierter Wertschöpfungsketten sein, das heißt, dass in der EU auch Kapazitäten für die Verarbeitung/Raffination und für die Herstellung beispielsweise von Permanentmagneten entstehen müssen, damit Stoffströme nicht doch wieder in China landen (Kapitel 5.2; Kapitel 6.2 Szenario „Fragmentierte Souveränitätswende“).

## 8 Literatur

- Assefi, M. et al. (2020): Pyrometallurgical recycling of Li-ion, Ni–Cd and Ni–MH batteries: A minireview. In: *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 24, S. 26–31, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.005>
- Bähr, C. et al. (2024): Kritisch für die Wertschöpfung – Rohstoffabhängigkeit der deutschen Wirtschaft. Köln
- BAKS (2019): Unter dem Radar. Die strategische Bedeutung Seltener Erden für die wirtschaftliche und militärische Sicherheit. (Autor/in: Kullik, J.) Bundesakademie für Sicherheitspolitik, Arbeitspapier Sicherheitspolitik 13, [https://www.baks.bund.de/sites/baks010/files/arbeitspapier\\_sicherheitspolitik\\_2019\\_13.pdf](https://www.baks.bund.de/sites/baks010/files/arbeitspapier_sicherheitspolitik_2019_13.pdf) (19.11.2025)
- Baskaran, G.; Schwartz, M. (2025): Developing Rare Earth Processing Hubs: An Analytical Approach. Center for Strategic and International Studies, <https://www.csis.org/analysis/developing-rare-earth-processing-hubs-analytical-approach#h2-conclusion> (24.9.2025)
- BGR (2021): Seltene Erden. Informationen zur Nachhaltigkeit. (Autor: Erdmann, M.) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Bhattacharai, A. et al. (2024): Recovery of Rare Earth Elements (REEs) from Different Sources of E-waste and Their Potential Applications: A Critical Review. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.1659.v1>
- BMWE (2025a): Europäische Industriepolitik – Der europäische Critical Raw Materials Act (CRMA). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/critical-raw-materials-act.html> (24.9.2025)
- BMWE (2025b): Nationales Explorationsprogramm der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des Critical Raw Materials Act (CRMA). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, o. O.
- BMWK (2024): Eckpunktepapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Wege zu einer nachhaltigen und resilienten Rohstoffversorgung. Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, o. O.
- Brückner, L. (2021): Entwicklung eines hydrometallurgischen Verfahrens zur Gewinnung Seltener Erden aus einem monazithaltigem Phosphogips. Dissertation, [https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal\\_derivate\\_00001605/Db115001.pdf](https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal_derivate_00001605/Db115001.pdf) (24.9.2025)
- Buchert, M. et al. (2019): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen. Umweltbundesamt, Texte 03/2019, Dessau-Roßlau
- Burkhardt, C. (2024): Seltene Erden: Warum sie für die Transformation recycelt werden sollten – Transforming Economies. Bertelsmann Stiftung, o. O.
- BWE (o. J.): Generatorkonzepte. Bundesverband WindEnergie e. V. <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/anlagenkonzepte/generatorenkonzepte/> (19.11.2025)
- Campos, M. F. de (2024): Are There Any Alternatives for Rare-Earth Permanent Magnets? In: *Acta Physica Polonica A* 146(1), S. 26–33, <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.146.26>
- Danouche, M. et al. (2024): Advances in bio/chemical approaches for sustainable recycling and recovery of rare earth elements from secondary resources. In: *The Science of the total environment* 912, Art. 168811, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168811>
- DERA (2021a): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. (Autor/innen: Marscheider-Weidemann, F. et al.) Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA Rohstoffinformationen 50, Berlin
- DERA (2024): Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland. (Autor/innen: Schönfeldt, M. et al.) Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA Rohstoffinformationen 60, Berlin
- DERA (2025): Seltene Erden. (Autor/innen: Elsner, H. et al.) Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA Rohstoffinformationen 61, Berlin

- DERA (o. J.): Rohstoff Seltene Erden. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin
- Deutsche Windindustrie (o. J.): Gondel. o. J. <https://deutsche-windindustrie.de/wiki/gondel/> (10.2.2026)
- Die Zeit (2010): China drosselt Export Seltener Erden. <https://www.zeit.de/wirtschaft/2010-12/china-erden> (24.9.2025)
- EFI (2025): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025. Expertenkommission Forschung und Innovation, Berlin
- EK (2011): Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze. Europäische Kommission, KOM(2011) 25 endgültig, Brüssel
- EK (2020a): Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. (Autor/innen: Bobba, S. et al.) Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/58081>
- EK (2020b): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. Europäische Kommission, COM(2020) 474 final, Brüssel
- EK (2024): EU und Ruanda unterzeichnen eine Vereinbarung über Wertschöpfungsketten für nachhaltige Rohstoffe. Europäische Kommission, [https://luxembourg.representation.ec.europa.eu/actualites-et-evenements/actualites/eu-und-ruanda-unterzeichnen-eine-vereinbarung-uber-wertschopfungsketten-fur-nachhaltige-rohstoffe-2024-02-19\\_de](https://luxembourg.representation.ec.europa.eu/actualites-et-evenements/actualites/eu-und-ruanda-unterzeichnen-eine-vereinbarung-uber-wertschopfungsketten-fur-nachhaltige-rohstoffe-2024-02-19_de) (6.11.2025)
- EK (2025a): COMMISSION DECISION of 25.3.2025 recognising certain critical raw material projects as Strategic Projects under Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council. Europäische Kommission, C(2025) 1904 final, Brüssel
- EK (2025b): Selected strategic projects. Europäische Kommission, [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/strategic-projects-under-crma/selected-projects\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/strategic-projects-under-crma/selected-projects_en) (25.9.2025)
- EK (2025c): Strategic Raw Materials. Rare earth elements for permanent magnets. Europäische Kommission, <https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/d/d/workspace/SpacesStore/980c7927-6ab8-42e5-a288-9b9cd500c6e0/file.bin> (24.9.2025)
- EK (2025d): Strategic project – CAREMAG. Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/1446288>
- EK (2025e): Strategic project – LIFE-22-ENV-IT-INSPIREE. Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/9607763>
- EK (2025f): Strategic project – MagFactory. Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/7902410>
- EK (2025g): Strategic project – Pulawy rare earths separation plant. Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/1262053>
- EK (2025h): Strategic project – ReeMAP project. Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/0012054>
- EK (2025i): Strategic project – Songwe Hill Rare Earths. Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/4547427>
- EK (2025j): Strategic project – Zandkopsdrift rare earths and battery grade manganese project. Europäische Kommission, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/7498756>
- EK (o. J.a): Carbon Border Adjustment Mechanism. Europäische Kommission, [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en#why-cbam](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en#why-cbam) (19.11.2025)
- EK (o. J.b): Critical Raw Materials Act. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act\\_en#overview-of-the-critical-raw-materials-act](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en#overview-of-the-critical-raw-materials-act) (25.9.2025)

- EK (o. J.c): Raw materials diplomacy. Europäische Kommission, [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/raw-materials-diplomacy\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/raw-materials-diplomacy_en) (24.9.2025)
- EK (o. J.d): Substitution of Rare Earth for advanced novel magnets in energy and transport application. Europäische Kommission, <https://cordis.europa.eu/project/id/101129912/de> (25.9.2025)
- EK (o. J.e): Weniger Abhängigkeit von Seltenen Erden für Europa. Europäische Kommission, <https://cordis.europa.eu/article/id/442771-reducing-europe-s-reliance-on-rare-earths/de> (17.9.2025)
- Elwert, T. et al. (2018): Entwicklung einer industriell umsetzbaren Recycling-Technologiekette für NdFeB-Magnete – SEMAREC. In: Thiel, S. et al. (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin, S. 253–271
- enercity Erneuerbare GmbH (o. J.): Aufbau eines Windrads – Technik, Struktur und Zusammenspiel der Komponenten. o. J. <https://www.enercity-erneuerbare.de/wind/infothek/windrad-aufbau> (10.2.2026)
- Erdmann, M. (2025): Lieferketten von Seltenen Erden. Herausforderungen und neue Entwicklungen. DERA Industrieworkshop „Seltene Erden“. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin, 13.3.2025
- GAO (2024): Critical Materials: Action Needed to Implement Requirements That Reduce Supply Chain Risks. U.S. Government Accountability Office, <https://www.gao.gov/products/gao-24-107176> (24.9.2025)
- Green BRI Center (o. J.): Countries of the Belt and Road Initiative (BRI). Green Belt and Road Initiative Center, <https://green-bri.org/countries-of-the-belt-and-road-initiative-bri/> (12.12.2025)
- GWEC (2023): Global Wind Report 2023. Global Wind Energy Council, Brüssel
- Handelsblatt (2023): China verbietet Ausfuhr von Technologien zur Verarbeitung Seltener Erden. <https://www.handelsblatt.com/politik/international/begehrte-rohstoffe-china-verbietet-ausfuhr-von-technologien-zur-verarbeitung-seltener-erden/100004179.html> (24.9.2025)
- Henning, S. et al. (2024): Kritische mineralische Rohstoffe in Deutschland – Gewinnung und Exploration. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Commodity TopNews 73, Hannover
- Hochwarth, D. (2025): Wie neue E-Motoren Seltene Erden überflüssig machen. Ingenieur.de, <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/wie-neue-e-motoren-seltene-erden-ueberfluessig-machen/> (19.11.2025)
- IEA (2022): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report. International Energy Agency, Paris
- IEA (2024a): Global Critical Minerals Outlook 2024. International Energy Agency, Paris
- IEA (2024b): Recycling of Critical Minerals. Strategies to scale up recycling and urban mining. International Energy Agency, Paris
- IHK Region Stuttgart (o. J.a): CBAM: Der CO2-Grenzausgleichsmechanismus. <https://www.ihk.de/stuttgart/fuer-unternehmen/international/import-export/import/cbam-5761850> (19.11.2025)
- IHK Region Stuttgart (o. J.b): China kontrolliert Export von Seltenen Erden. <https://www.ihk.de/stuttgart/fuer-unternehmen/international/aktuelles/china-exportkontrolle-seltene-erden-6678934> (24.9.2025)
- ISE (2023): Rare Earth Elements (REE). Vorkommen, Herstellung, Verwendung. Institut für Seltene Erden und Metalle AG, <https://institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/seltene-erden/> (24.9.2025)
- Islam, R. et al. (2024): Historical overview and recent advances in permanent magnet materials. In: Materials Today Communications 41, Art. 110538, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110538>
- Jyothi, R. K. et al. (2020): Review of rare earth elements recovery from secondary resources for clean energy technologies: Grand opportunities to create wealth from waste. In: Journal of Cleaner Production 267, Art. 122048, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122048>
- Kamp, M. (2025): Der nächste Fünfjahresplan: China will nicht mehr abhängig sein, sondern andere abhängig machen. Neue Zürcher Zeitung, <https://www.nzz.ch/wirtschaft/der-naechste-fuenfjahresplan-china-will-nicht-mehr-abhaengig-sein-sondern-andere-abhaengig-machen-ld.1908597> (19.11.2025)

- Kosow, H.; Gaßner, R. (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. Berlin
- Krempl, S. (2025): China: Aussetzung der Exportkontrollen für Seltene Erden gilt auch für die EU. heise online, <https://www.heise.de/news/China-Aussetzung-der-Exportkontrollen-fuer-Seltene-Erden-gilt-auch-fuer-die-EU-10966118.html> (19.11.2025)
- Kullik, J. (2020): Verlorenes Jahrzehnt der Rohstoffsicherheit. Die ungelöste Abhängigkeit des Westens von Seltenen Erden und anderen kritischen Hightech-Metallen. Konrad-Adenauer-Stiftung, Auslandsinformationen 24, <https://www.kas.de/documents/259121/8116012/Verlorenes+Jahrzehnt+der+Rohstoffsicherheit.pdf/c464815f-4da1-ad73-368d-95e480bd63f9?version=1.0&t=1602149909435> (19.11.2025)
- Miningscout (2025): Chinas Exportbeschränkungen für Seltene Erden im Detail. <https://www.miningscout.de/blog/2025/04/16/chinas-exportbeschraenkungen-fuer-seltene-erden-im-detail/> (25.9.2025)
- NRCan (2024): Verbrauchsanteile von Seltenen Erden weltweit nach Verwendungszweck im Jahr 2022. Natural Resources Canada, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/170264/umfrage/seltene-erden-verbrauch-weltweit-nach-volumen-2008/> (25.9.2025)
- Opiela, N. et al. (2018): Exekutive KI 2030. Vier Zukunftsszenarien für Künstliche Intelligenz in der öffentlichen Verwaltung. Berlin
- Pape, L. et al. (2025): Seltene Erden: Chinas neue Exportkontrollen als Faustpfand im Handelsstreit. Table.Briefings, <https://table.media/china/thema-des-tages/seltene-erden-chinas-neue-exportkontrollen-als-faustpfand-im-handelsstreit> (19.11.2025)
- Pillkahn, U. (2007): Trends und Szenarien als Werkzeuge zur Strategieentwicklung. Wie Sie die unternehmerische und gesellschaftliche Zukunft planen und gestalten. Siemens Aktiengesellschaft, Erlangen
- Reimer, M. V. et al. (2018): Recycling Decisions in 2020, 2030, and 2040—When Can Substantial NdFeB Extraction be Expected in the EU? In: Metals 8(11), Art. 867, <https://doi.org/10.3390/met8110867>
- Šajn, R. et al. (2024): Secondary Deposits as a Potential REEs Source in South-Eastern Europe. In: Minerals 14(2), Art. 120, <https://doi.org/10.3390/min14020120>
- Schaumann, J. (2025): Seltene Erden in Deutschland - Bunker und Recycling-Forschung. Tagesschau.de, <https://www.tagesschau.de/tagesthemen/video-1523348.html> (20.11.2025)
- Schönfeldt, M. (2025): Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland und Europa. DERA Industrieworkshop „Seltene Erden“. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin
- Schüler, D. (2011): Seltene Erden - Daten & Fakten. Öko-Institut e. V., Berlin
- Schulze, R.; Buchert, M. (2016): Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. In: Resources, Conservation and Recycling 113, S. 12–27, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.004>
- Severson, M. H. et al. (2022): A preliminary feasibility study of potential market applications for non-commercial technology magnets. In: Heliyon 8(e11773), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11773>
- Statista (2025): Seltene Erden. O. O.
- Strohbach, U. (2023): Usbekistan fördert mehr Uran und erschließt Seltene Erden. Germany Trade & Invest, <https://www.gtai.de/de/trade/usbekistan/branchen/usbekistan-foerdert-mehr-uran-und-erschliesst-seltene-erden-948232> (19.11.2025)
- TAB (2024): Seltene Erden – Rohstoffsicherung und Potenziale der Gewinnung in Europa. (Autor/innen: Meißner, L.; Czerniak-Wilmes, J.) Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, TAB-Themenkurzprofil 69, <https://doi.org/10.5445/IR/1000169054>
- Tagesschau.de (2025a): Einigung zu seltenen Erden und geringeren Zöllen. <https://www.tagesschau.de/ausland/asien/trump-xi-treffen-100.html> (19.11.2025)

- Tagesschau.de (2025b): Preisexplosion bei seltenen Erden.  
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/seltene-erden-preise-steigen-china-100.html>  
(25.9.2025)
- Tagesschau.de (2025c): USA und Australien wollen seltene Erden fördern.  
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/seltene-erden-usa-australien-china-100.html>  
(15.12.2025)
- Tradium GmbH (o. J.): Seltene Erden. <https://selteneerden.de/> (25.9.2025)
- Tsuji, C. (2025): Belt and Road Initiative. Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/topic/Belt-and-Road-Initiative> (12.12.2025)
- U.S. Geological Survey (2023): Mineral Commodity Summaries 2023. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
- U.S. Geological Survey (2025): Mineral Commodities Summaries 2025. <https://doi.org/10.5066/P13XCP3R>
- UBA (2019): Seltene Erden in Permanentmagneten. Factsheet. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- van Wieringen, K. (2025): The future of rare earths mining in Ukraine. Europäische Union,  
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2025/765789/EPRS\\_ATA\(2025\)765789\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2025/765789/EPRS_ATA(2025)765789_EN.pdf)  
(19.11.2025)
- Vela, J. H. (2025): EU will sich bei seltenen Erden stärker von China entkoppeln. Handelsblatt,  
<https://www.handelsblatt.com/politik/international/rohstoffe-eu-will-sich-bei-seltenen-erden-staerker-von-china-entkoppeln/100136121.html> (20.11.2025)
- Vuppaladadiyam, S. S. V. et al. (2024): Can e-waste recycling provide a solution to the scarcity of rare earth metals? An overview of e-waste recycling methods. In: The Science of the total environment 924, Art. 171453, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171453>
- WD (2022): Seltene Erden als wichtige Ressource. Wissenschaftliche Dienste, Deutscher Bundestag, WD 5 - 3000 - 003/22, Berlin
- World Bank Group (2024): Worldwide Governance Indicators.  
<https://www.worldbank.org/en/publication/worldwide-governance-indicators> (20.12.2024)

## 9 Anhang

### 9.1 Interviewpartner/innen

| Name                      | Organisation  |
|---------------------------|---|
| Prof. Dr. Carlo Burkhardt | Hochschule Pforzheim                                    |
| Dr. Otmar Deubzer         | Fraunhofer IZM  |
| Dr. Martin Erdmann        | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) |
| Dr. Leona Faulstich       | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH                       |
| Dr. Jakob Kullik          | TU Chemnitz   |
| Dr. Claas Oehlmann        | BDI e. V.   |

Die Interviews wurden im Dezember 2024 und Januar 2025 geführt.

### 9.2 Expert/innen Szenarioworkshop

| Name                   | Organisation   |
|------------------------|--|
| Dr. Lukas Gast         | Institut für die Zukunft der Industriegesellschaft (INZIN e. V.) |
| Prof. Dr. Jens Gutzmer | Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie            |
| Aleksei Ksenofontov    | Vienna think tank Global Neighbours                              |
| Dr. Sabine Langkau     | Fraunhofer ISI   |
| Dr. Robert Möckel      | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf                             |
| Oliver Lutz Radtke     | Vienna think tank Global Neighbours                              |
| Mario Schönfeldt       | Fraunhofer IWKS  |
| Dr. Stefan Steinicke   | BDI e. V.  |
| Dr. Leona Faulstich    | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH                                |

Der Workshop fand am 7. Juli 2025 online statt.

**9.3 Abbildungen**

|  | Seite |
|--|-------|
| Abbildung 2.1 Seltene Erden im Periodensystem der Elemente .....                                       | 13    |
| Abbildung 2.2 Anteile unterschiedlicher SEE in der<br>Zusammensetzung der oberen Erdkruste .....       | 14    |
| Abbildung 2.3 Reserven an seltenen Erden in ausgewählten<br>Ländern 2023 .....                         | 15    |
| Abbildung 2.4 Minenproduktion von seltenen Erden wichtiger<br>Erzeugerländer 2024 .....                | 21    |
| Abbildung 2.5 Gewinnung seltener Erden .....   | 22    |
| Abbildung 3.1 Verbrauchsanteile von seltenen Erden weltweit nach<br>Verwendungszweck (Stand 2022)..... | 27    |
| Abbildung 5.1 Phasen der Wiederverwertung .....  | 40    |
| Abbildung 5.2 Lieferketten von seltenen Erden.....   | 45    |

**9.4 Tabellen**

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 2.1 Kriterien für die Lagerstättenwahl .....   | 16 |
| Tabelle 2.2 Übersichtsdarstellung und Ranking der am weitesten<br>fortgeschrittenen Bergbauprojekte außerhalb Chinas<br>nach 20 Kriterien..... | 17 |
| Tabelle 2.3 Raffinationsprojekte.....  | 23 |
| Tabelle 4.1 Ausgewählte strategische SEE-Projekte<br>(Stand März/Juni 2025).....   | 34 |
| Tabelle 4.2 Rohstoffpartnerschaften der EU und SEE-Relevanz<br>in den Partnerländern .....   | 36 |
| Tabelle 5.1 Vor- und Nachteile von Recyclingmethoden.....  | 41 |
| Tabelle 5.2 Übersicht über Recyclingunternehmen .....  | 43 |
| Tabelle 5.3 Recyclingpotenziale ausgewählter SEE-Magnet-<br>Materialströme mit Ausblick auf die zukünftige<br>Entwicklung .....                | 47 |

**9.5 Kästen**

|   |    |
|---|----|
| Kasten 2.1 Projektionen Bergbau.....                    | 20 |
| Kasten 2.2 Projektionen Raffination .....               | 26 |
| Kasten 3.1 Militärtechnik als Zukunftstechnologie ..... | 28 |
| Kasten 3.2 Projektionen Nachfrageentwicklung .....      | 29 |
| Kasten 3.3 Projektionen Substitution .....              | 31 |
| Kasten 4.1 Projektionen Handels- und Zollpolitik.....   | 37 |
| Kasten 4.2 Projektionen Marktgestaltung .....           | 38 |
| Kasten 5.1 Projektionen Recycling .....                 | 46 |