

Energiewende und strategische Abhängigkeiten beim Stromsystem

Eine strukturvergleichende Analyse der Rohstoff-, Technologie- und Lieferkettenrisiken Europas

Dirk Gildemeister

7. August 2026

Executive Summary

Die europäische Energiewende ist politisch als Projekt der Unabhängigkeit gerahmt. Diese Rahmung ist nicht falsch – aber sie ist strukturell unvollständig. Was die Energiewende tatsächlich bewirkt, ist eine Transformation der Abhängigkeitsstruktur: weg von Energieträgern, hin zu Materialien, Technologien und Verarbeitungskapazitäten.¹²

Dieses Whitepaper analysiert diese Verlagerung entlang dreier Kerndimensionen:

- Rohstoffabhängigkeiten: Welche kritischen Materialien benötigt die Energiewende, wo liegen die Vorkommen, und wer kontrolliert die Verarbeitung?
- Technologie- und Lieferkettenabhängigkeiten: Welche Produktionsstufen sind geografisch konzentriert, und welche Risiken entstehen daraus?
- Politisch kommunizierte vs. tatsächliche Unabhängigkeit: Inwieweit werden strukturelle Abhängigkeiten in der öffentlichen Debatte systematisch unterbewertet?

Europa ist im kritischen Midstream – der Raffinierung und Verarbeitung strategischer Rohstoffe – strukturell unterpositioniert.^{3,6} Der Transformationszeitraum von voraussichtlich 15 bis 30 Jahren dürfte eine Phase erhöhter kumulierter Verwundbarkeit darstellen, da fossile und neue materialbezogene Abhängigkeiten zeitweise parallel bestehen.⁹ Für Deutschland als größte Volkswirtschaft und zentralen Industriestandort der EU ist diese Verwundbarkeit besonders ausgeprägt.

*„Die Energiewende ist kein Pfad zur Autarkie, sondern ein Umbau von Abhängigkeiten; die politische Aufgabe ist daher nicht das Ende des Übergangs, sondern seine Korrektur hin zu **ganzheitlicher Systemkostenbetrachtung, Resilienz und Versorgungssicherheit**.“*

Das Dokument schließt mit politischen Optionen für Politik, Branchenverbände und Unternehmen sowie einem methodischen Anhang.

Kapitel 1 – Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Transformation des europäischen Energiesystems gehört zu den größten wirtschaftlichen Umbrüchen seit Beginn der Industrialisierung.¹²

Die Energiekrise infolge des russischen Angriffskrieges gegen die Ukraine – mit Gaspreisen, die zeitweise auf das Fünffache stiegen¹⁴ – hat die Verwundbarkeit eines fossil geprägten Energiesystems schärfer als je zuvor sichtbar gemacht.

Gleichzeitig wächst die Bedeutung spezialisierter Materialien und Vorprodukte für den Ausbau erneuerbarer Energien.¹⁰ Hierdurch entsteht die zentrale Forschungsfrage: Reduziert die Energiewende die geopolitische Abhängigkeit Europas – oder verändert sie lediglich deren Struktur?

Eine Präzisierung vorab: Der Begriff „Umbau von Abhängigkeiten“ bezieht sich in diesem Whitepaper in erster Linie auf die Stromerzeugung. Betrachtet man das gesamte Energiesystem – einschließlich Wärme, Verkehr und Industrie –, bleibt der Anteil fossiler Primärenergie noch für mehrere Jahrzehnte hoch.¹² Die neuen materialbezogenen Abhängigkeiten entstehen in dieser Übergangsphase daher zunächst zusätzlich zu den bestehenden fossilen Abhängigkeiten, nicht anstelle von ihnen. Erst mit fortschreitender Dekarbonisierung von Wärme und Verkehr verschiebt sich dieses Verhältnis schrittweise in Richtung Substitution.

1.2 Zielsetzung

Ziel ist eine nüchterne, quellenbasierte und strukturvergleichende Analyse der Wechselwirkungen zwischen Energiewende, Rohstoffsicherheit, industrieller Wertschöpfung und geopolitischer Resilienz.

- Welche Abhängigkeiten bestehen im fossilen Energiesystem?
- Welche neuen Abhängigkeiten entstehen durch die Energiewende?
- Welche Rolle spielt China innerhalb globaler Wertschöpfungsketten?
- Welche Risiken ergeben sich daraus für Europa und Deutschland?
- Welche politischen Optionen zur Diversifizierung stehen zur Verfügung?

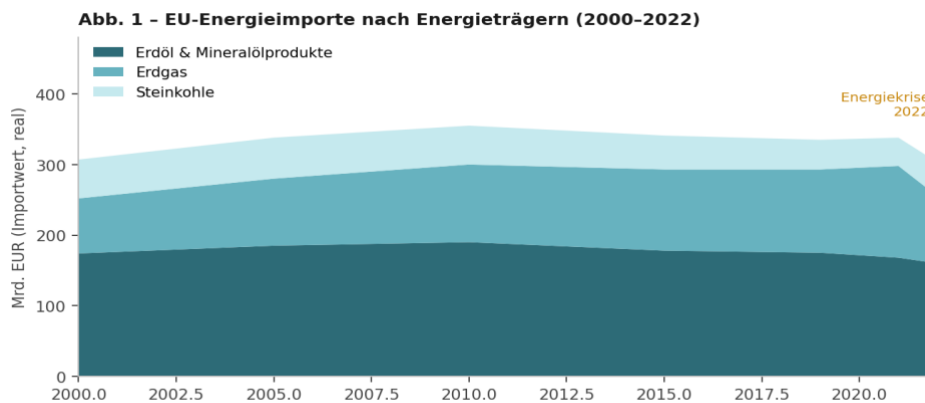
1.3 Methodik

Die Analyse basiert auf Primär- und Sekundärquellen internationaler Organisationen^{12,9,10,15} sowie auf Forschungsinstituten mit ausgewiesener Expertise.^{13,8,4} Quellenlogik und Limitationen sind im methodischen Anhang (Kapitel 16) dokumentiert.

Kapitel 2 – Historische Energieabhängigkeiten Europas

2.1 Entstehung des fossilen Energiesystems

Die wirtschaftliche Entwicklung Europas wurde über Jahrzehnte durch fossile Energieträger geprägt. Stromerzeugung, Industrieproduktion, Wärmeversorgung und Mobilität basierten weitgehend auf Kohle, Erdöl und Erdgas.²



Quelle: Eurostat (nrg_ti_is); IEA, World Energy Outlook (2023). Werte indexiert, eigene Darstellung.

Abb. 1 – Quelle: Eurostat (nrg_ti_is); IEA, World Energy Outlook (2023). Werte indexiert, eigene Darstellung.

2.2 Die Logik fossiler Abhängigkeiten

Fossile Energiesysteme besitzen eine grundlegende Eigenschaft: Der Energieträger muss kontinuierlich nachgeliefert werden. Dies führt zu permanenter Importabhängigkeit und geopolitischer Verwundbarkeit.¹² Die Energiekrise ab 2022 verdeutlichte dies: Gaspreise stiegen zeitweise auf das Fünffache des Vorkrisenwertes.¹⁴

2.3 Lehren aus der Energiekrise

Die Unterbrechung etablierter Lieferbeziehungen führte zu steigenden Energiepreisen, Produktionsrückgängen und erheblichen Belastungen.² Für Deutschland war sie besonders spürbar, da Russland bis 2021 rund 55 % der deutschen Gasimporte stellte.

Kapitel 3 – Die industrielle Architektur der Energiewende

3.1 Vom Brennstoffsystem zum Technologiesystem

Erneuerbare Energien unterscheiden sich grundlegend von fossilen Systemen. Sonne und Wind müssen nicht importiert werden. Stattdessen entsteht die Wertschöpfung durch Anlagenbau, Infrastruktur, Rohstoffverarbeitung und Speichertechnologien.

3.2 Zentrale Technologien und neue Abhängigkeiten

Die wichtigsten Bausteine der Energiewende benötigen spezifische Materialien und Komponenten.¹⁰ Die strategische Bedeutung verlagert sich von Förderländern hin zu Technologieproduzenten, Rohstoffverarbeitern und Komponentenherstellern.

Kapitel 4 – Kritische Rohstoffe als Fundament der Energiewende

4.1 Definition und Klassifikation

Als kritisch gelten Rohstoffe, die hohe wirtschaftliche Bedeutung besitzen und mit erheblichen Versorgungsrisiken verbunden sind.⁵ Der Critical Raw Materials Act (2024) definiert 34 kritische und 17 strategische Rohstoffe.

4.2 Rohstoffbedarf der Energiewende

Die Nachfrage nach diesen Rohstoffen steigt im Zuge der Dekarbonisierung erheblich.^{3,10} Ein batterieelektrisches Fahrzeug benötigt rund sechsmal mehr mineralische Rohstoffe als ein konventionelles Fahrzeug.

4.3 Förderung versus Verarbeitung – die Midstream-Lücke

Die geopolitische Bedeutung liegt häufig nicht in der Förderung, sondern in der Verarbeitung.^{3,6} Lithium wird überwiegend in Australien, Chile und Argentinien gefördert; die Verarbeitung erfolgt zu über 60 % in China.^{3,4}

Rohstoff	Abbaukonzentration	Verarbeitungskonzentration	Anwendung
Lithium	Australien, Chile, Argentinien	China (>60 %)	Batteriespeicher
Kobalt	DR Kongo (>70 %)	China (>80 %)	Batteriekathoden
Neodym / Dysprosium	China, Myanmar	China (>90 %)	Permanentmagnete
Graphit	Mosambik, China	China (>99 %)	Batterieanoden
Polysilizium	Divers	China (>95 %)	Solarmodule
Iridium / Platin	Südafrika, Russland	Divers, begrenzt	PEM-Elektrolyseure

Tab. 1 – Quelle: IEA, Critical Minerals Outlook (2024)[3]; BGR, Rohstoffsituation Deutschland (2024)[4]; DERA-Rohstoffliste 2023, DERA Rohstoffinformationen 56 (2023)[8].

Eine 2026 vorgelegte Studie der Fraunhofer-Institute ISI und IZM im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) unterstreicht, dass die stärkste relative Verknappung nicht bei den prominent diskutierten Rohstoffen wie Lithium droht, sondern bei Iridium.¹⁶ Getrieben durch den Hochlauf der PEM-Wasserelektrolyse, deren Anoden eine Iridiumoxid-Beschichtung benötigen, könnte der Iridiumbedarf im Nachhaltigkeitsszenario bis 2045 auf etwa das 12-Fache der heutigen Weltjahresproduktion von rund 6,8 Tonnen steigen; selbst im mittleren Szenario läge er noch beim 8-Fachen. Da Iridium nahezu ausschließlich als Nebenprodukt der Platinförderung anfällt und kein eigenständiger Iridiumbergbau existiert, lässt sich das Angebot kurzfristig kaum ausweiten – die Fördermenge ist also strukturell unelastisch. Andere in derselben Studie untersuchte Rohstoffe wie Titan, Gallium, Indium und Vanadium

liegen den Szenarien zufolge 2045 dagegen unterhalb der heutigen Produktionsmengen und erscheinen aus dieser Perspektive weniger kritisch.

4.4 Die Rolle des Recyclings

Recycling wird langfristig als wesentlicher Baustein zur Verringerung von Rohstoffabhängigkeiten betrachtet.^{9,6} Bis mindestens in die 2030er Jahre wird Primärförderung eine zentrale Rolle spielen.

Material	Recyclingrate heute	Technisches Potenzial	Skalierungshorizont
Lithium	< 5 %	Bis 70 %	2030–2035
Kobalt	~32 %	Bis 85 %	Heute skalierbar
Nickel	~35 %	Bis 90 %	Heute skalierbar
Neodym / REE	< 1 %	Bis 60 %	2035+
Graphit	< 5 %	Bis 50 %	2030+
Kupfer	> 30 %	Bis 95 %	Gut etabliert

Tab. 2 – Quelle: IRENA, *Geopolitics of the Energy Transition* (2022)[6]; IEA, *Critical Minerals Outlook* (2024)[3].

Grenzen des Recyclingansatzes: In einer Wachstumsphase kann Recycling nur einen Bruchteil des Primärbedarfs decken. Bis 2040 dürfte der Anteil bei den meisten kritischen Materialien unter 20 % des Gesamtbedarfs liegen.^{6,9}

Hinweis zur Datenlage: Der IEA Global Critical Minerals Outlook 2026 nennt für einzelne Materialien niedrigere aktuelle Recyclingquoten (u. a. Kobalt ca. 16 %, Kupfer ca. 10 %, Nickel unter 5 %).¹⁷ Die Abweichung zu Tab. 2 dürfte primär auf unterschiedliche Abgrenzungen zurückgehen: Die IEA-Werte beziehen sich enger auf energietechnologie-relevante Sekundärversorgung (z. B. Batterie- und Magnetrecycling), während Tab. 2 die gesamte materialbezogene Recyclingquote über alle Anwendungen hinweg abbildet (z. B. Stahl- bzw. Bauschrott bei Nickel und Kupfer). Eine abschließende Klärung der genauen Abgrenzungen steht noch aus.

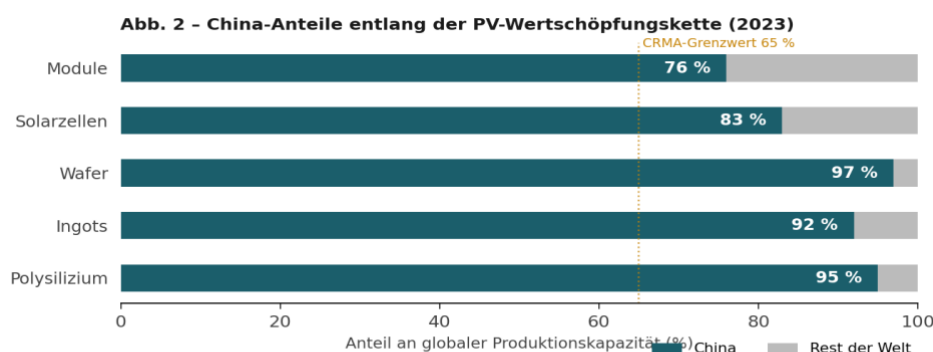
Kapitel 5 – China als zentraler Akteur der Energiewende-Lieferketten

5.1 Historische Entwicklung

China hat über mehrere Jahrzehnte gezielt industrielle Kapazitäten in Photovoltaik, Batterietechnologien und Seltenen Erden aufgebaut.^{1,8}

5.2 Photovoltaik-Wertschöpfungskette

Nach Analysen der IEA kontrolliert China mehr als 80 % der globalen Photovoltaik-Wertschöpfungskette.^{1,13}

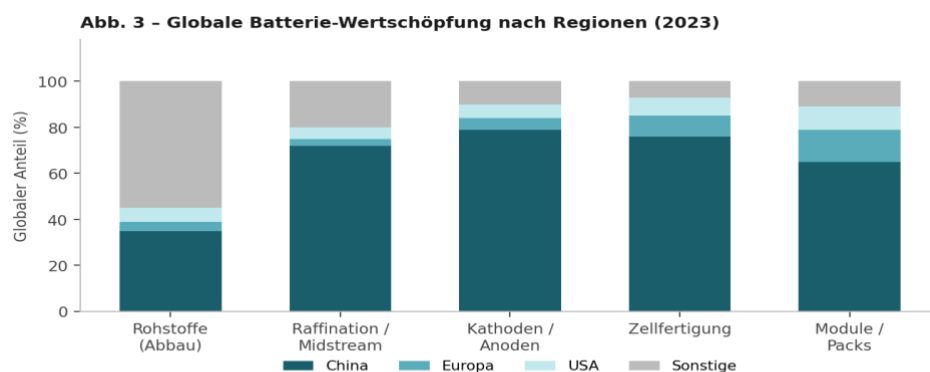


Quelle: IEA, Solar PV Global Supply Chains (2022); Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report (2024).

Abb. 2 – Quelle: IEA, Solar PV Global Supply Chains (2022)[1]; Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report (2024)[12].

5.3 Batterien und Rohstoffverarbeitung

China besitzt erhebliche Marktanteile bei Kathodenmaterialien, Anodenmaterialien und Batteriechemikalien.⁷ Die größte strategische Bedeutung liegt in der Raffination und Weiterverarbeitung.



Quelle: IEA, Global Supply Chains of EV Batteries (2022); IRENA, World Energy Transitions Outlook (2023); eigene Schätzung.

Abb. 3 – Quelle: IEA, Global Supply Chains of EV Batteries (2022)[7]; IRENA, World Energy Transitions Outlook (2023)[9]; eigene Schätzung.

5.4 Strategische Implikationen

Die Herausforderung für Europa liegt in der hohen Konzentration wesentlicher Wertschöpfungsstufen auf einen einzelnen Akteur.¹⁵

2025 hat sich diese Konzentration erstmals konkret geopolitisch materialisiert: Im April 2025 verhängte China Exportbeschränkungen für sieben Seltene Erden, im Oktober 2025 wurden diese auf weitere Elemente sowie auf im Ausland gefertigte Produkte mit chinesischen Vorprodukten ausgeweitet; seit November 2025 sind die Erweiterungen bis November 2026 ausgesetzt.¹⁷ Auch bei der Weiterverarbeitung nahm die Konzentration weiter zu: Chinas Anteil an der weltweiten Kupferschmelzkapazität stieg seit 2005 von rund 15 % auf etwa 50 % im Jahr 2025.¹⁷

Kapitel 6 – Globale Photovoltaik-Lieferketten

6.1 Einleitung und Risikolage

Die PV-Industrie weist eine außergewöhnlich hohe geografische Konzentration auf. Die IEA beschreibt sie als eine der am stärksten konzentrierten industriellen Lieferketten der Welt.¹

6.2 Europas Verlust industrieller Kapazitäten

Europa spielte in den frühen 2000er Jahren eine führende Rolle in der Solarindustrie. Zwischen 2010 und 2020 kam es zu einem massiven Strukturwandel durch Preisdruck und asiatische Überkapazitäten.¹³

6.3 Risikobewertung

Die Konzentration birgt wirtschaftliche, geopolitische und industrielle Risiken.^{1,5} Ein Präzedenzfall: 2023 führte China Exportbeschränkungen für Gallium und Germanium ein.

Kapitel 7 – Batterie- und Speicherlieferketten

7.1 Strukturelle Abhängigkeiten

Batteriespeicher spielen eine zentrale Rolle für Elektromobilität, Stromsystemstabilisierung und stationäre Anwendungen.⁷ China besitzt eine dominante Stellung insbesondere bei Anodenmaterialien, Kathodenmaterialien und Batteriechemikalien.

7.2 Der Engpass liegt nicht bei der Zellfertigung

Auch wenn Europa zusätzliche Zellfabriken errichtet, bleiben Abhängigkeiten bei Anodenmaterialien, Kathodenmaterialien und Vorprodukten bestehen.^{7,6}

Stufe	Risiko	Dominanz China
Rohstoffversorgung (Abbau)	Hoch	Mittel (Kobalt, Graphit)
Raffination / Midstream	Sehr hoch	Dominant (>80 % bei REE, Graphit)
Zellfertigung	Mittel	Hoch, Diversifizierung im Gange
Recycling	Niedrig–mittel	Gering (EU im Aufbau)

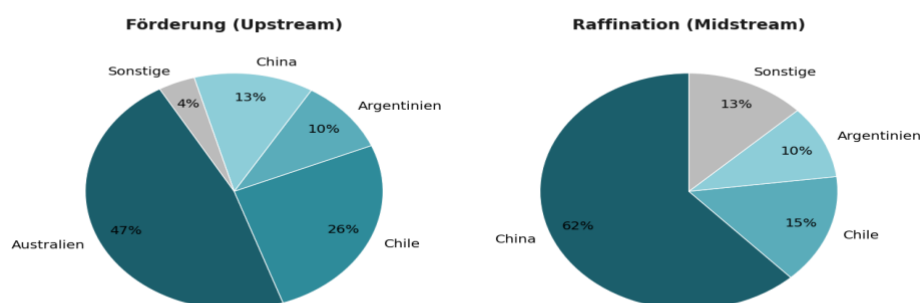
Tab. 3 – Quelle: IEA, *Global Supply Chains of EV Batteries (2022)*[7]; eigene qualitative Einschätzung.

Kapitel 8 – Kritische Rohstoffe und Raffination

8.1 Die Midstream-Problematik

Der Begriff „Midstream“ bezeichnet die industrielle Verarbeitung zwischen Förderung und Endprodukt. Genau hier bestehen die größten Konzentrationen.^{3,6}

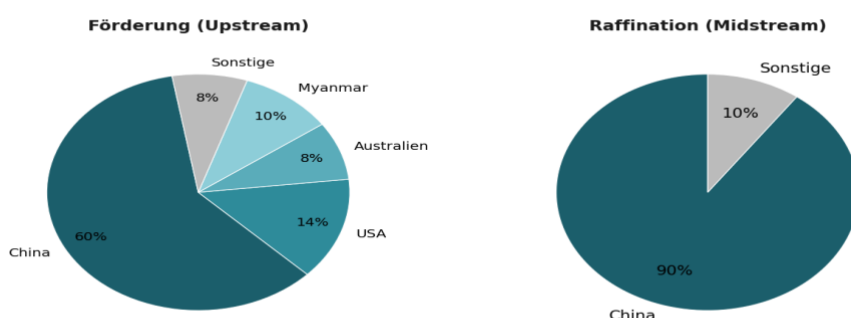
Abb. 4 – Lithium: Förderung vs. Raffination (2023)



Quelle: IEA, Critical Minerals Outlook (2024); BGR, Rohstoffsituation Deutschland (2024).

Abb. 4 – Quelle: IEA, Critical Minerals Outlook (2024)[3]; BGR, Rohstoffsituation Deutschland (2024)[4].

Abb. 5 – Seltene Erden (REE): Förderung vs. Raffination (2023)

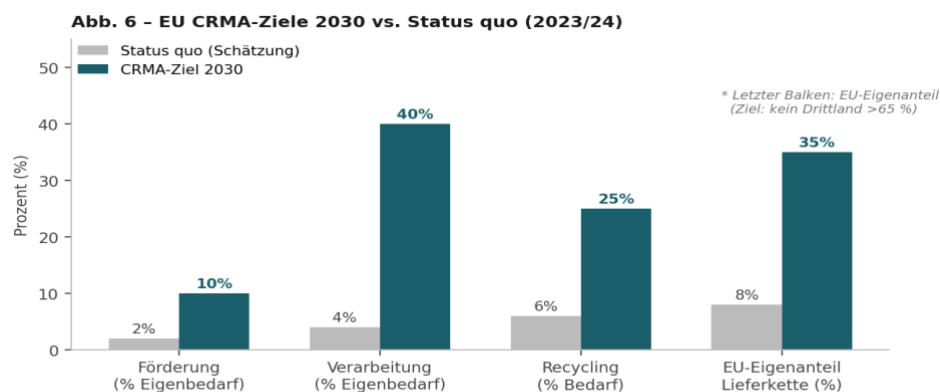


Quelle: IEA, Critical Minerals Outlook (2024); DERA-Rohstoffliste 2023, DERA Rohstoffinformationen 56 (2023).

Abb. 5 – Quelle: IEA, Critical Minerals Outlook (2024)[3]; DERA-Rohstoffliste 2023, DERA Rohstoffinformationen 56 (2023)[8].

8.2 Der Critical Raw Materials Act

Die EU reagierte mit dem Critical Raw Materials Act (2024).⁵ Zielwerte: Förderung mind. 10 %, Verarbeitung mind. 40 %, Recycling mind. 25 % des Eigenbedarfs; kein Drittland über 65 % einer Lieferkette.



Quelle: Europäische Kommission, Critical Raw Materials Act (2024); eigene Schätzung Status quo auf Basis IEA (2024).

Abb. 6 – Quelle: Europäische Kommission, Critical Raw Materials Act (2024)[5]; eigene Schätzung Status quo auf Basis IEA (2024)[3].

Die folgende Übersichtsabbildung fasst Chinas Marktstellung entlang der gesamten Energiewende-Wertschöpfungskette zusammen – von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung bis zu den Endprodukten. Während Chinas Anteile beim Abbau noch begrenzt sind, ist die Dominanz im Midstream und bei Endprodukten nahezu absolut.^{3,6,13}

Chinas Marktstellung entlang der Energiewende-Wertschöpfungskette

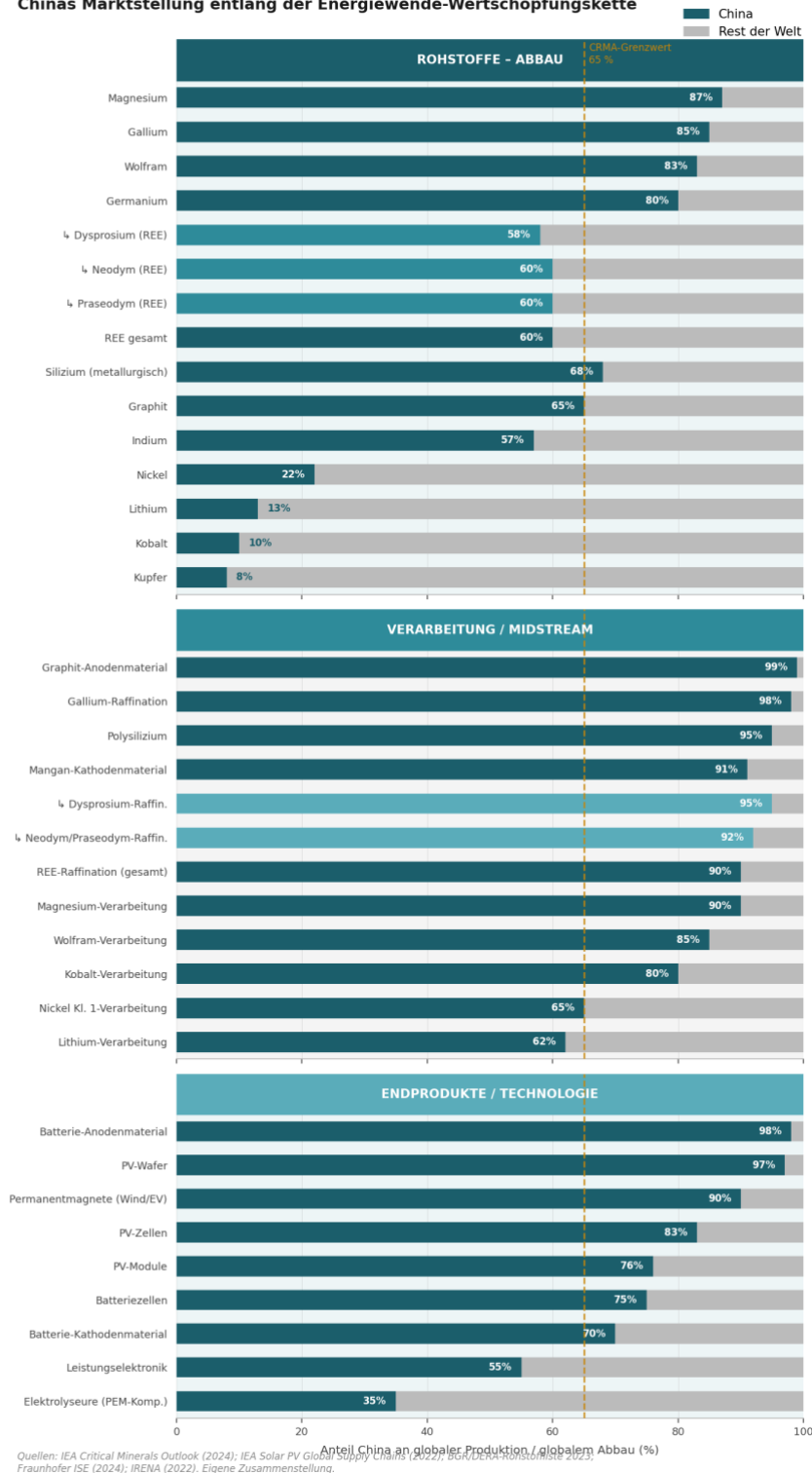


Abb. 7 – Quelle: IEA Critical Minerals Outlook (2024)[3]; IEA Solar PV Global Supply Chains (2022)[1]; BGR/DERA-Rohstoffliste 2023[8]; Fraunhofer ISE (2024)[13]; IRENA (2022)[6]. Eigene Zusammenstellung.

8.3 Exportkontrollen 2025/2026

Die Midstream-Konzentration aus 8.1 hat sich 2025/2026 in einer Reihe konkreter Exportbeschränkungen niedergeschlagen. Eine Auswahl:¹⁷

Material	Marktanteil China	Maßnahme
Seltene Erden	91 %	Exportlizenzpflcht auf 7 Elemente (Apr. 2025), erweitert (Okt. 2025), teilweise ausgesetzt bis Nov. 2026
Gallium	99 %	Ausfuhrverbot in die USA, ausgesetzt bis Nov. 2026
Indium	86 %	Exportlizenzpflcht (Feb. 2025)
Kobalt (DRC)	66 %	Exportquotensystem (Okt. 2025)

Tab. 4 – Quelle: IEA, *Global Critical Minerals Outlook 2026*[17].

Kapitel 9 – Europäische Gegenstrategien

9.1 Strategischer Paradigmenwechsel

Die europäischen Institutionen betrachten Versorgungssicherheit zunehmend als industrie- und sicherheitspolitische Herausforderung.^{5,15}

9.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Parallel zum CRMA verfolgt die EU mit dem Net-Zero Industry Act den Ausbau industrieller Kapazitäten für Solarmodule, Batterien, Elektrolyseure und Windkraftanlagen.⁵

9.3 Internationale Partnerschaften

Europa verfolgt Rohstoffpartnerschaften mit Australien, Kanada, Chile, Argentinien, Namibia und Kasachstan.¹⁵ Entscheidend ist, dass diese Partnerschaften auch Verarbeitungskapazitäten umfassen.

9.4 Grenzen der Diversifizierung

Trotz politischer Initiativen bestehen erhebliche Herausforderungen: lange Genehmigungszeiten, hohe Umweltauflagen, fehlende Skaleneffekte.¹⁵ Die Diversifizierung wird voraussichtlich mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen.

Kapitel 10 – Vergleich fossiler und technologischer Abhängigkeiten

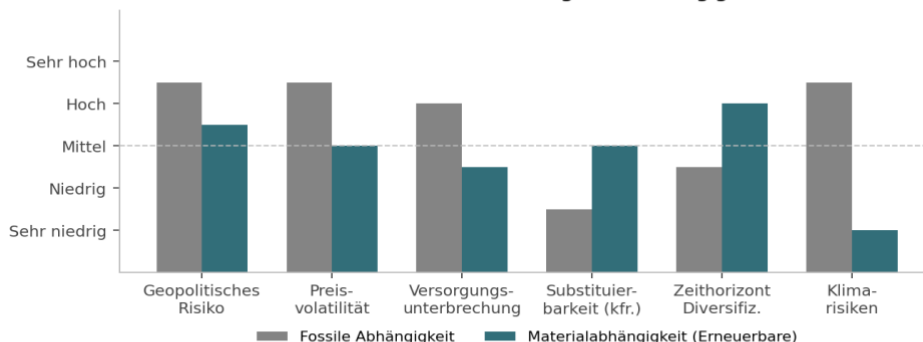
10.1 Vergleichende Risikomatrix

Risikodimension	Fossile Abhängigkeit	Materialabhängigkeit (Erneuerbare)
Laufende Importnotwendigkeit	Ja – dauerhaft	Nein – zyklisch (Erneuerungsinvestitionen alle 20–25 Jahre)
Preisvolatilität	Sehr hoch (OPEC-gesteuert)	Mittel (Kapazitätszyklen)
Geopolitisches Risiko	Sehr hoch	Mittel bis hoch (Midstream)
Versorgungsausfall	Kritisch (kurzfristig)	Mittel (Lagerhaltung möglich)
Substituierbarkeit (kfr.)	Niedrig	Mittel–hoch (langfristig)
Klimarisiken	Sehr hoch	Niedrig
Zeithorizont Diversifizierung	Mittel (5–10 Jahre)	Lang (10–25 Jahre)

Tab. 5 – Quelle: Eigene qualitative Einschätzung auf Basis IEA (2024)[3], IRENA (2023)[9], BGR (2024)[4], Fraunhofer ISI.

Die Einstufung „hoch“ beim geopolitischen Risiko (Midstream) ist keine rein hypothetische Kategorie mehr: Die Exportkontrollen aus 2025/2026 (vgl. 8.3) haben dieses Risiko im Beobachtungszeitraum bereits konkret ausgelöst.¹⁷

Abb. 7 – Risikostruktur: Fossile vs. technologische Abhängigkeit



Quelle: Eigene qualitative Einschätzung auf Basis IEA (2024), IRENA (2023), BGR (2024), Fraunhofer ISI. Skala 1–5.

Abb. 8 – Quelle: Eigene qualitative Einschätzung auf Basis IEA (2024)[3], IRENA (2023)[9], BGR (2024)[4]. Skala 1–5.

10.2 Die Bedeutung des Zeitfaktors

Fossile Systeme erfordern dauerhaften Brennstoffimport. Nach Installation erzeugen Wind- und Solaranlagen über Jahrzehnte Energie ohne Brennstoffimporte.¹² Diese Investitionsgutlogik macht die neue Abhängigkeit strukturell anders – aber nicht automatisch geringer, solange der Transformationsprozess anhält.

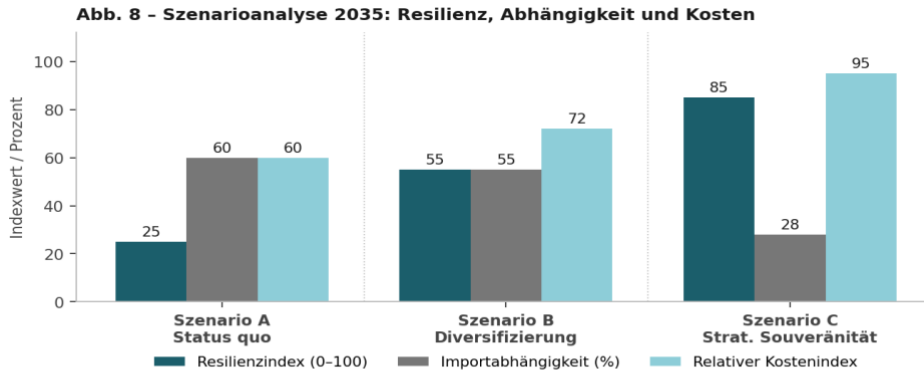
Eine wichtige Präzisierung: Die Materialabhängigkeit ist nicht einmalig, sondern zyklisch. Wind- und Solaranlagen erreichen typischerweise technische und wirtschaftliche Lebensdauern von etwa 20 bis 30 Jahren und müssen anschließend repowert, modernisiert oder ersetzt werden. Dadurch entsteht ein dauerhaft wiederkehrender Bedarf an Materialien und Komponenten.^{3,10} Die Transformation und der spätere Ersatzbedarf überlappen sich teilweise: Bereits während die Energiewende noch läuft, setzt der Erneuerungsbedarf der früh gebauten Anlagen ein. Die Materialabhängigkeit ist damit strukturell dauerhafter, als die Bezeichnung „Investitionsgut“ suggeriert – auch wenn sie sich qualitativ von der kontinuierlichen Brennstoffabhängigkeit fossiler Systeme unterscheidet. Ersatzinvestitionen und Repowering-Prozesse führen dazu, dass Rohstoff- und Technologieabhängigkeiten auch im langfristigen Betrieb des Energiesystems bestehen bleiben, wenngleich in anderer Intensität als während der initialen Transformationsphase.

10.3 Besondere Relevanz für Deutschland

Mit dem Auslaufen der Kernkraft (2023) und dem geplanten Kohleausstieg (2038) muss die Stromversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt werden.^{12,2} Dies erfordert überdurchschnittlich große Mengen an Photovoltaik-Modulen, Windkraftkomponenten und Batteriespeichern – und damit eine entsprechend hohe Materialabhängigkeit in der Übergangsphase. Der Bundesrechnungshof weist zusätzlich darauf hin, dass Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Klimaziele gleichzeitig sicherzustellen eine zentrale Herausforderung der deutschen Energiepolitik darstellt.¹¹

Kapitel 11 – Szenarioanalyse bis 2035

Zur Bewertung möglicher Entwicklungen werden drei Szenarien betrachtet. Die zugrundeliegenden Annahmen sind im methodischen Anhang (Kapitel 16) dokumentiert.^{9,12}



Quelle: Eigene Szenariomodellierung auf Basis IEA (2024), IRENA (2023), Europäische Kommission (2024). Indexwerte illustrativ.

Abb. 9 – Quelle: Eigene Szenariomodellierung auf Basis IEA (2024)[3], IRENA (2023)[9], Europäische Kommission (2024)[5]. Indexwerte illustrativ.

Szenario A – Status quo

China bleibt dominanter Produzent; europäische Kapazitäten wachsen nur begrenzt.³ Auswirkungen: hohe Importabhängigkeit, begrenzte Resilienz, fortbestehende Lieferkettenrisiken. Aktuelle Projektpipeline-Daten stützen dieses Bild: Bei Kupfer wird für 2035 trotz leichter Verbesserung weiterhin eine Angebotslücke von rund 25 % erwartet; bei Kobalt ist durch die neue Exportquote der DR Kongo (Oktober 2025) zusätzlich eine neue Angebotslücke entstanden, die im Vorjahr noch nicht abzusehen war.¹⁷

Szenario B – Diversifizierung

Ausbau europäischer Produktion; neue Rohstoffpartnerschaften; teilweise Rückverlagerung industrieller Kapazitäten.^{5,15} Die Analyse deutet darauf hin, dass Szenario B mittelfristig am wahrscheinlichsten ist.

Szenario C – Strategische Souveränität

Umfangreicher Aufbau europäischer Industrie; starke Kreislaufwirtschaft. Maximale Resilienz, hoher Kapitalbedarf. Vollständige Autarkie erscheint weder realistisch noch wirtschaftlich sinnvoll.

Kapitel 12 – Schlussfolgerungen

12.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Erstens: Die Energiewende reduziert die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffimporten strukturell und dauerhaft.¹² Zweitens: Gleichzeitig entstehen neue Abhängigkeiten bei Rohstoffen, Verarbeitungskapazitäten und Schlüsseltechnologien.^{3,6} Drittens: China nimmt in zahlreichen Wertschöpfungsstufen eine dominante Stellung ein.^{1,7} Viertens: Die eigentliche strategische Verwundbarkeit liegt nicht bei der Förderung, sondern bei Verarbeitung, Raffination und industrieller Skalierung.³

12.2 Beantwortung der Forschungsfrage

Führt die Energiewende zu größerer Unabhängigkeit? Die Analyse legt nahe, dass die Energiewende nicht automatisch zu größerer strategischer Unabhängigkeit führt, sondern bestehende Abhängigkeiten strukturell transformiert: weg von fossilen Brennstoffimporten, hin zu Materialien, Verarbeitungskapazitäten und Technologien.

*„Die Energiewende ist kein Pfad zur Autarkie, sondern ein Umbau von Abhängigkeiten; die politische Aufgabe ist daher nicht das Ende des Übergangs, sondern seine Korrektur hin zu **ganzheitlicher Systemkostenbetrachtung, Resilienz und Versorgungssicherheit**.“*

12.3 Drei Kerndimensionen der politischen Aufgabe

Ganzheitliche Systemkostenbetrachtung

Alle Systemkosten der Energiewende müssen vollständig ausgewiesen werden – einschließlich der Kosten von Importabhängigkeiten, strategischen Reserven und dem Aufbau von Midstream-Kapazitäten.

Resilienz

Resilienz ist nicht das Ziel, sondern die Bedingung des Gelingens. Ein Energiesystem, das in Abhängigkeit von konzentrierten Midstream-Kapazitäten gebaut wird, ist nicht belastbar – auch wenn seine Quellen erneuerbar sind.

Versorgungssicherheit

Versorgungssicherheit im erneuerbaren Energiesystem umfasst nicht nur die Netzstabilität, sondern auch die Materialsicherheit: die gesicherte Verfügbarkeit von Rohstoffen und Bauteilen über den gesamten Transformationszeitraum.

Kapitel 13 – Einwände und Gegenargumente

Einwand 1: Erneuerbare reduzieren dauerhaft Brennstoffimporte

Dieser Einwand ist nur teilweise korrekt.¹² Für die Stromerzeugung stimmt er: Wind und Sonne benötigen keinen Brennstoffimport, das ist ein realer und bedeutender Vorteil. Er lässt sich jedoch nicht auf das gesamte Energiesystem übertragen. Für Industrieprozesse und zur saisonalen Speicherung bleibt ein Bedarf an importierten Energieträgern bestehen – heute in Form fossiler Moleküle, perspektivisch in Form grüner Moleküle (Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe), die ihrerseits importiert werden müssten. Der kontinuierliche Brennstoffimportbedarf wird damit nicht beseitigt, sondern verändert sich langfristig in seiner Zusammensetzung.

Warum die These trotzdem gilt: Die Frage ist nicht, ob erneuerbare Energien Brennstoffabhängigkeiten reduzieren – das tun sie. Die Frage ist, ob sie Abhängigkeiten insgesamt beseitigen. Die Antwort lautet: nein. Während der Aufbauphase entstehen neue, strukturell anders geartete Abhängigkeiten, die politisch bisher untergewichtet werden.^{3,6} Hinzu kommt: Wind- und Solaranlagen erreichen typischerweise technische und wirtschaftliche Lebensdauern von etwa 20 bis 30 Jahren und müssen anschließend repowert, modernisiert oder ersetzt werden. Die Materialabhängigkeit ist damit nicht einmalig, sondern zyklisch wiederkehrend. Da sich Transformations- und Erneuerungszyklen teilweise überlappen, beginnt der nächste Materialbedarf bereits während der noch laufenden Energiewende. Die Energiewende beendet Abhängigkeiten daher nicht vollständig, sondern verändert ihre Struktur und ihren zeitlichen Charakter.

Einwand 2: Materialabhängigkeiten sind teilweise substituierbar

Auch dieser Einwand ist sachlich richtig. REE-freie Windgeneratoren, Natrium-Ionen-Batterien und Perowskit-Solarzellen sind reale Entwicklungen, die mittelfristig bestimmte Materialabhängigkeiten verringern können.⁹

Warum die These trotzdem gilt: Technologische Substitution hat einen Zeithorizont von mindestens 10 bis 20 Jahren bis zur Marktskalierung. In der Zwischenzeit bleiben die heutigen Lieferkettenstrukturen maßgeblich. Politische Reaktionen, die auf künftige Substitution verweisen, ohne den Übergangszeitraum zu adressieren, unterschlagen die aktuell relevante Verwundbarkeit.

Einwand 3: Recycling und Kreislaufwirtschaft können Konzentrationen verringern

Recycling ist eine wichtige langfristige Option, die in diesem Whitepaper explizit als Entlastungspfad anerkannt wird (Kapitel 4.4).^{6,9}

Warum die These trotzdem gilt: In einer Wachstumsphase – und die Energiewende ist eine massive Wachstumsphase – kann Recycling nur einen Bruchteil des Primärbedarfs decken. Der Materialbestand, der später rezykliert werden kann, muss erst gebaut werden. Bis 2040 dürfte Recycling bei den meisten kritischen Materialien unter 20 % des Gesamtbedarfs decken.

Einwand 4: Lieferketten diversifizieren sich bereits außerhalb Chinas

Dieser Einwand ist empirisch teilweise belegt. Indonesien baut Nickelverarbeitung auf, Australien und Kanada investieren in Lithiumraffination, und die USA fördern über den Inflation Reduction Act aktiv den Aufbau heimischer Kapazitäten.¹⁵

Warum die These trotzdem gilt: Die laufenden Diversifizierungsprozesse sind real, aber langsam. Selbst optimistische Szenarien sehen keine wesentliche Veränderung der chinesischen Midstream-Dominanz vor

2030 bis 2035. Der Zeitraum der höchsten Verwundbarkeit liegt also genau in der Dekade, in der Europa den größten Ausbau erneuerbarer Energien plant.^{3,5}

Zwischenfazit

Keiner der vier Einwände widerlegt die Kernthese. Sie ergänzen und qualifizieren sie. Die Energiewende schafft langfristig bessere Voraussetzungen für strategische Autonomie als fossile Systeme – aber nur, wenn der Übergangszeitraum politisch aktiv gestaltet wird. Genau das ist die politische Aufgabe, auf die dieses Whitepaper hinweist.

Kapitel 14 – Politische Optionen

Die folgenden Optionen sind als Handlungsmöglichkeiten formuliert, nicht als zwingende Ableitungen aus der Datenlage.

14.1 Optionen für die europäische Politik

- Aufbau von Midstream-Kapazitäten: Investitionsanreize und Genehmigungsvereinfachungen für Raffinerien und Verarbeitungsanlagen. Der CRMA benennt als Orientierungsgröße mind. 40 % Verarbeitungskapazität in Europa.
- Strategische Materialreserven: In Analogie zu Erdölreserven könnte die Einrichtung strategischer Lager für ausgewählte kritische Rohstoffe geprüft werden.
- Rohstoffpartnerschaften mit Midstream-Komponente: Bestehende EU-Partnerschaften könnten stärker auf Verarbeitungskorridore ausgerichtet werden.
- Förderung technologischer Substitution: REE-freie Windgeneratoren, Natrium-Ionen-Batterien und Perowskit-Solarzellen.

14.2 Optionen für Branchenverbände

- Abhängigkeitskartierung: Systematische Befragung der Mitglieder als Grundlage eines branchenweiten Risikoatlases.
- Beitrag zu differenzierter Kommunikation: Mitwirkung an einer öffentlichen Kommunikation, die politisch kommunizierte Unabhängigkeitsversprechen sachlich präzisiert.
- Standardisierung: Europäische Normen für Materialeffizienz und Recyclinganforderungen vorantreiben.

14.3 Optionen für Unternehmen

- Lieferkettentransparenz über alle Stufen – nicht nur Tier-1-Lieferanten.
- Dual Sourcing als Risikominderungsstrategie bei kritischen Materialien.
- Eigenständige FöE-Investitionen in materialreduzierende Designs.
- Planungshorizont: Umbauzeiten für Lieferketten betragen typischerweise 5–10 Jahre.

Kapitel 15 – Quellenverzeichnis

- [1] IEA (2022): Solar PV Global Supply Chains. Paris: International Energy Agency.
- [2] Eurostat (2024): Energy imports dependency (nrg_ti_is). <https://ec.europa.eu/eurostat>. Abruf: 28.06.2026.
- [3] IEA (2024): Critical Minerals Outlook 2024. Paris: International Energy Agency.
- [4] BGR (2024): Rohstoffsituation Deutschland 2023. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- [5] Europäische Kommission (2024): Critical Raw Materials Act. Regulation (EU) 2024/1252.
- [6] IRENA (2022): Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials. Abu Dhabi: IRENA.
- [7] IEA (2022): Global Supply Chains of EV Batteries. Paris: International Energy Agency.
- [8] Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der BGR (2023): DERA-Rohstoffliste 2023. DERA Rohstoffinformationen 56. Berlin: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- [9] IRENA (2023): World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA.
- [10] Weltbank (2020): Minerals for Climate Action. Washington D.C.: World Bank Group.
- [11] Bundesrechnungshof (2024): Umsetzung der Energiewende im Hinblick auf die Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Umweltverträglichkeit der Stromversorgung. Bericht nach § 99 BHO. Bonn: Bundesrechnungshof. Abrufbar unter: <https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/DE/Berichte/2024/energiewende-volltext.pdf>
- [12] IEA (2023): World Energy Outlook 2023. Paris: International Energy Agency.
- [13] Fraunhofer ISE (2024): Photovoltaics Report. Freiburg.
- [14] Eurostat (2023): Energy price statistics. <https://ec.europa.eu/eurostat>. Abruf: 28.06.2026.
- [15] OECD (2023): Critical Minerals and Supply Chain Resilience. Paris: OECD Publishing.
- [16] Schwarz, M. (2026): Nicht Lithium: Der Energiewende könnte ein Metall fehlen, das kaum jemand kennt. ingenieur.de, 15.07.2026 (Zusammenfassung der Fraunhofer ISI/IZM-Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur, DERA).
- [17] IEA (2026): Global Critical Minerals Outlook 2026. Paris: International Energy Agency.

Kapitel 16 – Methodischer Anhang

16.1 Quellenbasis und Auswahlkriterien

Das Whitepaper stützt sich auf öffentlich verfügbare Primär- und Sekundärquellen anerkannter internationaler Institutionen sowie auf Forschungsinstitute mit ausgewiesener Expertise. Quellen wurden bevorzugt, wenn sie: (a) primäre Datenerhebung dokumentieren, (b) jünger als drei Jahre sind und (c) von unabhängigen Institutionen stammen.

16.2 Definitionen und Abgrenzungen

- Kritische Rohstoffe: gemäß EU Critical Raw Materials Act (2024), Annex I und II.
- Midstream: Verarbeitungsstufen zwischen Rohstoffabbau (Upstream) und Endprodukt (Downstream).
- Marktanteile: Anteile an globaler Produktionskapazität gemäß IEA-Daten (2022–2024). Fehlende Primärdaten wurden als Schätzung gekennzeichnet.

16.3 Begriffsabgrenzung: Schätzung, Einschätzung, Modellierung

- Schätzung: Quantitative Angaben für Datenbereiche ohne vollständige Primärdaten.
- Einschätzung: Qualitative Bewertungen auf Basis der Quellenanalyse (z. B. Risikomatrix in Tab. 5 und Abb. 8).
- Modellierung: Szenarioberechnungen in Kapitel 11 und Abb. 9. Indexwerte sind illustrativ.

16.4 Szenarioannahmen

Die Szenarien in Kapitel 11 sind qualitative Szenarien, keine quantitativen Prognosen. Die Szenariostruktur orientiert sich an ähnlichen Arbeiten der IEA (Net Zero Emissions Scenario, Stated Policies Scenario) und IRENA (Transforming Energy Scenario).

16.5 Limitationen

- Datenverfügbarkeit: Insbesondere chinesische Produktionsdaten basieren teils auf indirekten Schätzungen.
- Dynamik: Die Daten spiegeln den Stand 2022–2024 wider; Marktanteile verändern sich.
- Normative Neutralität: Optionen in Kapitel 14 sind keine Ableitungen aus der Datenlage.
- Analysebasis: Die qualitative Risikomatrix (Tab. 5, Abb. 8) und die Szenarien (Kap. 11, Abb. 9) stellen analytische Einordnungen dar und sind nicht als empirische Messgrößen oder Prognosen zu verstehen.
- Geografische Abgrenzung: Fokus auf EU-27; Deutschland wird an relevanten Stellen gesondert erwähnt.

16.6 Schlussbemerkung

Die Energiewende macht Europa nicht automatisch unabhängig. Sie reduziert die Abhängigkeit von Öl und Gas, schafft jedoch neue Abhängigkeiten bei Solartechnik, Batterien und kritischen Rohstoffen. Wer von

mehr Unabhängigkeit spricht, sollte daher auch über industrielle Wertschöpfung, resiliente Lieferketten, Rohstoffsicherheit und Recycling sprechen.

*„Die Energiewende ist kein Pfad zur Autarkie, sondern ein Umbau von Abhängigkeiten; die politische Aufgabe ist daher nicht das Ende des Übergangs, sondern seine Korrektur hin zu **ganzheitlicher Systemkostenbetrachtung, Resilienz und Versorgungssicherheit.**“*