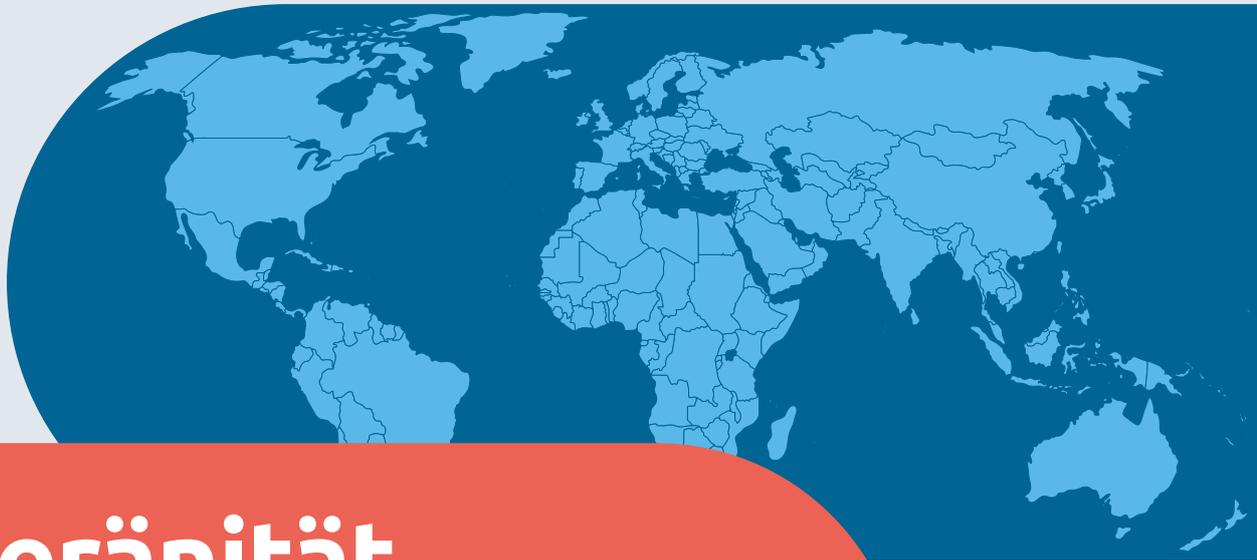




Stiftung
Klimaneutralität



Souveränität Deutschlands sichern

Resiliente Lieferketten für die
Transformation zur Klimaneutralität 2045

Kurzfassung der Studie

IMPRESSUM

Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045

IM AUFTRAG VON

Stiftung Klimaneutralität
www.stiftung-klima.de | info@stiftung-klima.de
Friedrichstr. 140 | 10117 Berlin

ERSTELLT DURCH

Prognos AG
Goethestr. 85 | 10623 Berlin
Elias Althoff, Tim Bichlmeier, Lucas Bierhaus, Nico Dietzsch, Hans Dambeck, Dr. Andreas Kemmler, Leonard Krampe, Sebastian Lübbbers, Malek Sahnoun, Lennart Schulz, Minh Phuong Vu, Paul Wendring, Aurel Wunsch, Marco Wunsch, Inka Ziegenhagen

Öko-Institut e. V.

Borkumstraße 2 | 13189 Berlin
Dr. Johannes Betz, Dr. Matthias Buchert, Dr. Nino Schön-Blume, Daniela Eckert, Dr. Katharina Göckeler, Wolf Görz, Ulrike Heutmanek, Cornelia Merz, Inia Steinbach

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19 | 42103 Wuppertal
Clemens Schneider, Georg Holtz

Prognos war in dieser Studie federführend für die Gesamtprojektleitung und verantwortete die Bereiche Energiewirtschaft, Gebäude, Elektrolyseure (Anlagen). Das Öko-Institut war zuständig für die Bereiche Mobilität (inkl. Lithium-Ionen-Batterien und Permanentmagnete) sowie Rohstoffe und Ressourcen. Das Wuppertal Institut bearbeitete den Sektor Industrie.

PROJEKTLEITUNG

Regine Günther | regine.guenther@stiftung-klima.de
Dr. Sebastian Helgenberger | sebastian.helgenberger@stiftung-klima.de

Marco Wunsch | marco.wuensch@prognos.com
Inka Ziegenhagen | inka.ziegenhagen@prognos.com
Dr. Matthias Buchert | m.buchert@oeko.de

DANKSAGUNG

Für die vorliegende Studie wurde ein Beirat zur fachlichen Begleitung gegründet mit den folgenden Mitgliedern: Auswärtiges Amt, Bundeskanzleramt, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Agora Energiewende, Agora Industrie, Agora Verkehrswende, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Bundesverband der Deutschen Industrie, Bundesverband Erneuerbare Energie, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der BGR, Deutsche Umwelthilfe, European Climate Foundation, Stiftung KlimaWirtschaft, Umweltbundesamt, Verband der Chemischen Industrie sowie Umweltstiftung WWF Deutschland.

Darüber hinaus wurden Fachveranstaltungen mit Unternehmens- und Branchenvertreter:innen aus den Bereichen Erneuerbare Energien, Automobilität und grünem Stahl durchgeführt.

Wir bedanken uns bei allen Beteiligten, dass sie ihre Expertise und Erfahrungen mit uns geteilt haben. Dieser fachliche Austausch lieferte wichtige Impulse bei der Erstellung der Studie.

Für die Inhalte der Studie sind allein die Studiennehmer Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut sowie die Stiftung Klimaneutralität als Auftraggeber verantwortlich.

BITTE ZITIEREN ALS

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023):
Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045
Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität - Kurzfassung

Kurzfassung der Studie

Souveränität Deutschlands sichern

Resiliente Lieferketten
für die Transformation zur
Klimaneutralität 2045

Wir möchten mit dieser Studie den Blick auf zentrale Prioritäten, Handlungsfelder und politische Maßnahmen für «resiliente Lieferketten» lenken, um die Transformation zur Klimaneutralität abzusichern.

Inhalt

Vorwort 05

Executive Summary 06

1. Einleitung 08

2. Risiken entlang der Lieferkette 09

3. Zentrale Herausforderungen 10

4. Strategien und Maßnahmen 17

5. Politische Empfehlungen 24

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

die vergangenen Jahre waren geprägt von tiefgreifenden Veränderungen, die die Notwendigkeit einer beschleunigten und resilienten Transformation zu klimaneutralem Wirtschaften sehr deutlich gemacht haben. Hierzu gehört, dass die Folgen der menschengemachten Klimakrise rund um den Globus immer fühlbarer werden. Darüber hinaus hat in der jüngsten Vergangenheit vor allem der russische Angriffskrieg auf die Ukraine sehr klar die Verletzbarkeit der europäischen Wirtschaft und Gesellschaft durch die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, aber auch die negativen Implikationen einseitiger Importabhängigkeiten von einzelnen Ländern offengelegt. Mit der Einführung des Inflation Reduction Act (IRA) in den USA wurde zudem sehr evident, dass der Wettbewerb um die Ansiedlung der wichtigsten Zukunftstechnologien für die Transformation voll im Gange ist. Und da ist China, das seit mehr als einer Dekade erfolgreich darauf hinarbeitet, Weltmarktführer für grüne Technologien zu werden.

Die Europäische Union und Deutschland müssen die notwendige Transformation zur Klimaneutralität resilient gestalten. Unter Resilienz wird im Rahmen der hier vorgelegten Studie die Fähigkeit verstanden, externe Schocks oder Verwerfungen der sozialen, wirtschaftlichen oder politischen Rahmenbedingungen insbesondere mit Blick auf die internationale Einbettung auszuhalten und sich an die neuen Bedingungen anzupassen. Das bedeutet für Schlüsseltechnologien entlang der gesamten Lieferkette über die notwendigen Technologien und Komponenten zu verfügen, die wichtigen Rohstoffe abzusichern, hierbei entsprechende Diversifizierungsstrategien umzusetzen und frühzeitig eine Recyclingwirtschaft aufzubauen. Nur wenn dies gelingt, werden die Europäische Union und Deutschland die Transformation erfolgreich bewältigen, in Zukunft auf dem Weltmarkt eine starke Rolle einnehmen, zu Hause zukunftsfähige Arbeitsplätze bereitstellen und damit die nationale und europäische Souveränität wahren können. Nur eine Situation, in der die Europäische Union und ihre Mitgliedsstaaten bei zentralen Fragen der wirtschaftlichen Prosperität nicht einseitig erpressbar sind, gibt Europa letztlich auch die notwendige politische Freiheit für souveränes Handeln. Deshalb ist die Frage

der resilienten Lieferketten nicht nur eine ökonomische Frage oder eine Herausforderung für die Transformation, sondern eine hochpolitische Frage der Sicherheit und der politischen Souveränität.

Mit der vorliegenden Studie adressieren wir die verschiedenen Dimensionen der genannten Herausforderungen, um Entscheidungsträger:innen in die Lage zu versetzen, schnell und zielführend Strategien und Maßnahmen für eine resiliente Transformation zu ergreifen.

- Wir identifizieren die zentralen Schlüsseltechnologien, Zwischenprodukte und Rohstoffe für die Transformation zur Klimaneutralität, die von den politisch Handelnden prioritär gesichert werden sollten.
- Wir analysieren die zentralen Lieferketten und zeigen die jeweiligen Schwachstellen auf. Die für die Transformation notwendigen Technologien können erst als gesichert verfügbar gelten, wenn alle Teile der Lieferkette robust aufgestellt sind. Das meint Resilienz.
- Wir empfehlen für jede der Schlüsseltechnologien Lösungswege und geben Empfehlungen zu ersten politischen Weichenstellungen.

Die hier vorgelegte Untersuchung bezieht sich zunächst auf Deutschland, um einerseits konkrete Handlungsempfehlungen für ein wichtiges Mitgliedsland der EU geben zu können und andererseits komplexe Fragen, die auch für die EU insgesamt beantwortet werden müssen, handhabbar zu machen. Wir möchten mit dieser Studie den Blick auf zentrale Prioritäten, Handlungsfelder, Strategien und politische Maßnahmen für «resiliente Lieferketten» lenken, um die Transformation zur Klimaneutralität abzusichern und damit die politische Souveränität Deutschlands und der EU zu stärken. Wir freuen uns auf den weiteren Austausch mit Ihnen.

Ihre
Regine Günther

Zentrale Erkenntnisse dieser Studie

1. Für die Transformation zur Klimaneutralität spielen einige **Schlüsselindustrien eine strategische Rolle**. Diese strategische Bedeutung ergibt sich mit Blick auf den Erfolg der Klimaschutzstrategien, die politische Souveränität Deutschlands und Europas sowie die Sicherung des Industriestandorts. Zu den besonders relevanten Schlüsseltechnologien gehören:
 - Photovoltaik
 - Windkraft
 - Lithium-Ionen-Batterien für Elektromobilität
 - Permanentmagnete für Elektromobilität und Windkraft
 - Elektrolyseure
 - Wärmepumpen
 - Grüne Stahlerzeugungsanlagen (DRI-Schachtöfen)
2. Bei der Bewertung der Resilienz gilt es **stets die gesamte Lieferkette in den Blick zu nehmen**. Die Resilienz der Lieferkette ist insgesamt nur so robust wie die des schwächsten Gliedes.
3. **Für die Schlüsseltechnologien werden sieben Rohstoffe als sehr kritisch bewertet** mit Blick auf die Förderung und Verarbeitung im Verständnis der Studienziele. **Die Kritikalität ist durch entschlossenes politisches Handeln beherrschbar**. *Es handelt sich um: Graphit, Iridium, Kobalt, Lithium, Mangan, Leichte und Schwere Seltene Erden*. Darüber hinaus sollten *Nickel* und *Polysilizium* als weitere mittelkritische (verarbeitete) Rohstoffe besondere Aufmerksamkeit finden. Eine besondere Bedeutung ergibt sich hier für die Transformationsphase bis 2030/35.
4. **Gezielte Investitionen in heimische Transformationsindustrien und die Ansiedlung besonders kritischer Teile der Lieferketten in Deutschland bzw. Europa, ermöglichen die erfolgreiche und resiliente Transformation zur Klimaneutralität**. Besonders relevant sind diesbezüglich die PV-Industrie (hier insbesondere Ingots / Wafers, Solarglas, PV-Zellen / Module), die Herstellung von Permanentmagneten und ihre Vorprodukte (vor allem für Windkraftanlagen und E-Mobilität), die komplette Lieferkette von Lithium-Ionen-Batterien (E-Mobilität), sowie der Aufbau eines Leitmarktes für grünen Stahl.
5. **Die internationale Diversifizierung beim Bezug von kritischen Rohstoffen, Komponenten und strategischen Gütern** kann durch den Aufbau von transformationsorientierten Partnerschaften maßgeblich unterstützt werden und damit Marktkonzentrationen und Abhängigkeiten verringern. Es gilt insbesondere auch neue Handelsbeziehungen aufzubauen. Folgende Länder außerhalb der EU sind für transformationsorientierte Partnerschaften von besonderem Interesse: Australien, Brasilien, Chile, Ghana, Indonesien, Kanada, Kolumbien, Madagaskar, Malawi, Mozambique, Namibia, Südafrika, Zimbabwe.
6. Ein **nennenswerter Beitrag des Rohstoffrecyclings zur Steigerung der Resilienz ist nicht vor Beginn der 2030er Jahre zu erwarten**. Das Rohstoffrecycling spielt dann allerdings eine zunehmend entscheidende Rolle. Ein Recyclingfreundliches Design der relevanten Güter, **rechtzeitige Investitionen in Recyclingkapazitäten und der Aufbau eines förderlichen industriellen Ökosystems sollte deswegen schon heute gestartet werden**.
7. Nicht zuletzt die **Verringerung von Rohstoffintensitäten und die Entwicklung alternativer technologischer Optionen** bilden eine wichtige Säule resilienzorientierter Transformationspolitik. Hierzu ist die Schaffung eines entsprechenden Innovationsumfeldes in Europa unerlässlich.

Zentrale Strategien und Instrumente zur Erhöhung der Resilienz

1. **Umfassendes Resilienz- Monitoring einführen und institutionell verankern.** Die regelmäßige Analyse der Rohstoffverfügbarkeit und Lieferbeziehungen mit kritischen Abhängigkeiten entlang der strategisch relevanten Lieferketten sind die Grundlage für politische Entscheidungen zu notwendigen Anpassungen. Ausgestaltungsoptionen zur institutionellen Verankerung sollten geprüft werden.
2. **Stabile heimische Absatzmärkte für transformative Schlüsseltechnologien schaffen.** Dies gelingt durch die Sicherung stabiler politischer Rahmensetzungen sowie verlässliche Förderinstrumente in Deutschland und der EU. Die Förderung kritischer Rohstoffe innerhalb der EU gilt es zu forcieren.
3. **Resilient-Content-Regelungen etablieren.** Dies gelingt durch die Festsetzung von Standards, etwa zu umwelt- und sozialverträglichkeits-Kriterien bei Fördermaßnahmen sowie mit Blick auf den Import von Gütern.
4. **Ermöglichung von Einkaufsgemeinschaften für strategische Rohstoffe und Güter sowie Bündelung von Lieferverträgen.** Dies gelingt durch eine Prüfung und etwaige Reform des Kartellrechts, sowie eine Bündelung und Absicherung von Abnahmeverträgen durch die öffentliche Hand.
5. **Heimische Ansiedlungspolitik im Bereich strategischer Rohstoffe und Güter offensiv vertreten.** Dies gelingt durch Ausgleichsmaßnahmen für die europäischen Transformationsindustrien zur Herstellung eines Level Playing Fields zu subventionierten Konkurrenten außerhalb Europas. Hier sollten Investitionen gefördert und Betriebskostenbeihilfen befristet ermöglicht werden.
6. **Transformationspartnerschaften auf Augenhöhe ausbauen und stärken.** Dies gelingt durch die Stärkung der wirtschaftlichen Zusammenarbeit über bestehende Rohstoff- und Technologiepartnerschaften hinaus, mit der Stärkung der Wertschöpfung in den Partnerländern und durch intensiviertere Zusammenarbeit bei Bildungs- und Forschungsvorhaben.
7. **Frühzeitiger Kapazitätsaufbau in der Recyclingindustrie.** Dies gelingt durch Designanforderungen, Exportbeschränkungen für Sekundärrohstoffe und Vorprodukte sowie die robuste Umsetzung der EU Battery Regulation und des Critical Raw Materials Acts der EU.

Unter Resilienz verstehen wir hier die Fähigkeit, externe Schocks oder Verwerfungen der sozialen, wirtschaftlichen oder politischen Rahmenbedingungen insbesondere mit Blick auf die internationale Einbettung auszuhalten und sich an neue Bedingungen anzupassen.

1. Einleitung

ABB. 01 **Stufen der Lieferkette – allgemeines Schema**

Kritische Versorgungssituationen können entlang der gesamten Lieferkette auftreten.



QUELLE Eigene Darstellung

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2023

1. Einleitung

Deutschland hat den Weg zur Klimaneutralität im Jahr 2045 eingeschlagen. Angesichts der sich verändernden geopolitischen Rahmenbedingungen stellt sich nun die Frage, wie resilient die Lieferketten für den Ausbau der Transformationstechnologien sind.

Mit dieser Studie wird entlang der gesamten Lieferketten untersucht, wo heute und in absehbarer Zukunft vor allem große Abhängigkeiten vom Ausland bei der Versorgung mit Rohstoffen, Komponenten und strategischen Gütern für die Transformation der Volkswirtschaft bestehen und mit welchen Maßnahmen die Resilienz erhöht werden kann. Da Zeit auch eine knappe Ressource auf dem Weg zur Klimaneutralität ist, wird in dieser Arbeit – ungeachtet des strategischen Zieljahres 2045 – der Fokus auf kurz- und mittelfristige Herausforderungen bis 2030 und 2035 an die Resilienz von relevanten Wertschöpfungsketten gelegt.

Die vorliegende Studie basiert auf der Grundlagenstudie «Klimaneutrales Deutschland 2045» (KNDE2045)¹, die 2021 von Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut erarbeitet worden ist. Die Grundan-

nahmen der Vorgängerstudie wurden beibehalten, aber aktuelle Entwicklungen in den Bereichen Verkehr und Ausbau der Erneuerbaren Energien angepasst und aktualisiert.

Die Studie «Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045» untersucht im Detail den zeitlichen Hochlauf der für die Transformation der Sektoren notwendigen Rohstoffe, Komponenten und strategischen Güter und stellt sie der aktuellen Angebotsseite der Lieferketten und ihrer Skalierbarkeit in Fünfjahresritten – von 2020 bis 2045 – gegenüber: In der vorliegenden Kurzfassung der Studie werden die zentralen Ergebnisse komprimiert dargestellt. Die detaillierte Analyse ist in der Langfassung zu finden.

Die vorliegende Studie konzentriert sich auf die Herausforderungen, die sich bei den sieben identifizierten Schlüsseltechnologien – Photovoltaik, Windkraft, Lithium-Ionen-Batterien, Permanentmagneten, Elektrolyseure, Wärmepumpen und Stahl – vor allem durch eine zu starke Abhängigkeit vom Ausland ergeben. Die für die Transformation ebenfalls relevanten Themen Infrastruktur, Cybersecurity, Fachkräftemangel und Bürokratie wurden nicht im Rahmen dieser Studie untersucht.

¹ Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Online: https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/08/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf

2. Risiken entlang der Lieferkette und Priorisierung von Schlüsseltechnologien

Die Kritikalität von Rohstoffen, Komponenten und Gütern, die für die Transformation zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendig sind, ist von zwei wesentlichen Faktoren abhängig. Zum einen müssen sie bereits kurz- und mittelfristig (2030/2035) hohe Treibhausgas-einsparungen ermöglichen. Entsprechend steil muss deren Markthochlauf erfolgen mit entsprechenden Konsequenzen für das Wachstum der gesamten betroffenen Wertschöpfungsketten. Zum anderen liegt eine Gefährdung der Versorgungssicherheit vor oder ist absehbar. Gründe hierfür können sein:

- Nachfrageüberhang: Die Nachfrage steigt schneller an als die Ausweitung des Angebots.
- Marktmacht und Angebotskonzentration: Viele Rohstoffe oder Zwischenstufen der Wertschöpfungsketten sind auf sehr wenige Länder konzentriert oder werden nur von wenigen Unternehmen abgebaut bzw. produziert. Das hat zum einen geologische als auch historische gewachsene Gründe.
- Fehlende bzw. geringe Umwelt- und Sozialstandards können in vielen rohstoffreichen Ländern bei der Etablierung sauberer Lieferketten eine große Herausforderung sein. Dieser Aspekt wurde in der vorliegenden Studie nicht untersucht, ist aber relevant für zukünftige Analysen hinsichtlich der Diversifizierung von Lieferländern.

Es ist an dieser Stelle zu betonen, dass in dieser Arbeit eine Definition von Kritikalität gewählt wird, die über die gängigen und etablierten Kritikalitätsraster hinaus Kriterien aufnimmt, die dem speziellen Schwerpunkt dieser Arbeit geschuldet ist. Hierzu gehören vor allem die Fokussierung auf Technologien für die Transformation zur Klimaneutralität und die besondere Aus-

richtung auf zukünftige Entwicklungen mit einem Zeithorizont bis 2045 unter besonderer Betonung bis 2030/2035.

Die heutige Debatte über Resilienz im Rahmen der Transformation zur Klimaneutralität wird zumeist auf die Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe verkürzt. Aber eine kritische Versorgungssituation kann sich entlang der ganzen Lieferkette ergeben: Beim Abbau und der Aufbereitung der Rohstoffe, der Produktion der (Teil)-Komponenten bis hin zur Produktion der einzelnen Güter. Dies analysiert diese Studie.

Aus über 30 Transformationstechnologien wurden durch einen Screeningprozess sieben Schlüsseltechnologien identifiziert, die im Sinne der Projektziele mit Priorität weiter untersucht wurden.

Für die Auswahl waren folgende Kriterien maßgebend:

- Hohe Einsparung von Treibhausgasemissionen bis 2030/2035
- Kurzfristig steiler Hochlaufpfad
- Kurzfristig kaum Alternativen
- Hohe Angebotskonzentration bei Rohstoffen, Komponenten oder sogar der Produktion ganzer Güter.

Bei der Analyse haben sich die folgenden sieben Schlüsseltechnologien herauskristallisiert:

- Photovoltaik
- Windkraft
- Lithium-Ionen-Batterien für Elektromobilität
- Permanentmagnete für Elektromobilität und Windkraft
- Elektrolyseure
- Wärmepumpen
- Grüne Stahlerzeugungsanlagen (DRI-Schachtöfen)

3. Zentrale Herausforderungen

3. Zentrale Herausforderungen an die Resilienz über die gesamte Lieferkette der sieben Schlüsseltechnologien

Für die Kritikalitätsbewertung wurden für die sieben Schlüsseltechnologien sowohl die Nachfrage bis 2045 als auch die aktuellen und absehbaren Entwicklungen auf der Angebotsseite entlang der gesamten Lieferkette analysiert: Von der Rohstoffförderung und -aufbereitung über die Produktion von (Teil)-Komponenten bis hin zur Produktion der einzelnen Güter wurde nach den aktuell verfügbaren Quellen recherchiert. Durch den Abgleich der Ergebnisse der Nachfrage mit der Angebotsseite konnten für die Stufen der Lieferketten die Einstufung sehr kritisch, mittel kritisch und mäßig kritisch¹ im Sinne dieser Studie vorgenommen werden. Abbildung 2 zeigt die wesentlichen identifizierten «Hot-Spots» bzgl. der Resilienz der strategischen Lieferketten.

Übersicht: Kritikalität nach Schlüsseltechnologien

Photovoltaik: Für die Wafer-basierte Photovoltaik ist die eigentliche Rohstoffförderung nicht vulnerabel, allerdings zeigen sich erhebliche Herausforderungen an die Resilienz der Wertschöpfungskette über die weiteren Verarbeitungsstufen. Vor allem die Herstellung von Ingots, Wafern, Solarglas und PV-Zellen sowie Modulen ist sehr kritisch, weil sie signifikant von China dominiert wird und die EU hier keine oder nur sehr geringe eigene Kapazitäten hat. Die Aufbereitung von Quarzsanden zu Polysilizium ist zum Teil kritisch, weil China auch hier einen substantziellen Marktanteil hat, jedoch gibt es in Europa einen großen Produzenten von Polysilizium.

Windkraft: Für die Windkraft (vor allem Offshore) besteht ebenso wie für die Elektromobilität die wesentliche Herausforderung an die Resilienz der Lieferkette für Permanentmagnete aus Seltenen Erden. Diese ist sehr kritisch, da fast alle Stufen der Lieferkette von China dominiert werden. Bei Windkraft Offshore werden in fast allen Neuanlagen mittlerweile Permanentmagnete verbaut, bei Windkraft Onshore sind es rund 20 Prozent.

Auch die Fertigung von Windkraftanlagen auf See ist derzeit mit Risiken verbunden, da speziell für große Anlagen über 12 MW nur wenig Produktionskapazitäten bestehen. Bei der Fertigung von Anlagen für Windkraft an Land hingegen gibt es mittelfristig noch ausreichend Kapazitäten. Jedoch können die im Vergleich zu Europa geringeren Produktionskosten in China zu einer Verdrängung europäischer Hersteller führen. Zudem wird mittlerweile eine Vielzahl von Komponenten und Teilkomponenten aus Kostengründen von chinesischen Unternehmen bezogen. Im Gegensatz zu Permanentmagneten liegt hier jedoch kein Monopol vor.

Elektromobilität: Für die Elektromobilität sind zudem weite Bereiche der Lieferkette der Lithium-Ionen-Zellen als sehr kritisch im Sinne dieser Studie einzustufen. Dies beginnt mit der Rohstoffversorgung bzgl. der stark wachsenden Nachfrage wichtiger Schlüsselrohstoffe, in erster Linie bei Lithium; aber im Weiteren auch für Nickel, Kobalt und Graphit. Bei der Rohstoffverarbeitung (vor allem bei Graphit, Mangan und Kobalt) besteht eine sehr dominante Rolle Chinas. Dies gilt auch für nachfolgende Stufen wie die Kathodenmaterial- und noch stärker für die Anodenmaterialherstellung. Bei der Herstellung der Lithium-Ionen-Zellen selbst hat aktuell China ebenfalls die führende Rolle, gefolgt von Südkorea und Japan.

¹ Diese Einteilung ist projektspezifisch im Sinne der Ziele dieser Arbeit zu verstehen. Ein direkter Vergleich mit anderen Arbeiten, die Einstufungen zur Kritikalität von Rohstoffen etc. vornehmen (vor allem die EU Critical Raw Materials List), ist nicht angezeigt und sinnvoll, da der Fokus dieser Arbeit spezifischer ist als in anderen Veröffentlichungen.

ABB. 02 **Versorgungsrisiken bei strategischen Schlüsseltechnologien entlang der Lieferkette nach Kritikalität**

Die Risiken unterscheiden sich nach Schwere und Ursache für mögliche Versorgungsengpässe.

	Rohstoffförderung	Rohstoffverarbeitung	(Teil-)Komponenten	Güter
Photovoltaik		⊙ Polysilizium: China 79 %	⊙ Ingots/Wafer: China 97 %	⊙ Module: China 75 %
			⊙ Zellen: China 85 %	
			⊙ Solarglas	
Windkraft			⊙ Viele Komponenten werden in China beschafft	⊙ Derzeit ausreichende Kapazitäten in Europa, jedoch sinkende Wettbewerbsfähigkeit
Generatoren und Motoren (für Windkraft und Elektromobilität)	⊙ Leichte Seltene Erden: China 58 %	⊙ Leichte Seltene Erden: China 87 %	⊙ Permanentmagnete: China: 94 %	
	⊙ Schwere Seltene Erden: China / Myanmar: 100 %	⊙ Schwere Seltene Erden: China 100 %		
Elektromobilität Lithium-Ionen-Batterie	🚩 Lithium	🚩 Lithium	⊙ Kathodenmaterial: China 71 %	🚩 Batteriezellen
	🚩 Kobalt: Kongo 72 %	⊙ Kobalt: China 75 %		
	⊙ Mangan: Südafrika 36 %	⊙ Mangan: China 95 %		
	⊙ Nickel: Indonesien 38 %	⊙ Nickel: China 55 %		
	⊙ Graphit: China 73 %	⊙ Graphit: China 100 %	⊙ Anodenmaterial: China 91 %	
Elektrolyseure	⦿ Iridium (PEMEL): ⊙ Produktion kann nicht ausgeweitet werden. Südafrika 85 %			
	⊙ Scandium (HTEL, erst nach 2030/35)			
Wärmepumpen			⊙ Kompressoren (teilw. mit Permanentmagneten)	
Grüner Stahl	🚩 Eisenerze in DRI-Qualität			⊙ Anlagenbau für Direktreduktions-Anlagen (DRI-Schachtofen)

LEGENDE ⊙ Konzentration und Marktmacht 🚩 Kurz-/Mittelfristiger Nachfrageüberhang ⦿ Dauerhafte Knappheit
Kritikalität: 🚩 Sehr kritisch 🟠 Mittel kritisch 🟡 Mäßig kritisch

QUELLE Eigene Darstellung HINWEIS Kupfer, Titan, Gallium, Germanium, Yttrium sowie Platin: Nach den Untersuchungen dieser Studie sind diese Rohstoffe für die Transformation zur Klimaneutralität 2045 strategisch relevant, aber nicht kritisch.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2023

3. Zentrale Herausforderungen

Elektrolyseure: Für Elektrolyseure besteht die wesentliche Herausforderung im Bereich der PEM-Elektrolyseure. Hier ist die zukünftige Versorgung mit ausreichend Iridium sehr kritisch. Denn die Bergbauförderung von Iridium kann nicht ausgeweitet werden, da es in sehr geringen Konzentrationen vorliegt und ausschließlich als Begleitmetall vor allem bei der Platinförderung (sehr hohe Länderkonzentration auf Südafrika) gewonnen wird. Eine zukünftige Steigerung der Platinförderung ist nicht realistisch und daher ist auch keine Steigerung des Iridiumangebots zu erwarten. Andere natürliche Vorkommen für Iridium scheiden ebenfalls aus für eine Steigerung der Förderung.

Wärmepumpen: Die wesentliche Herausforderung bei Wärmepumpen ist, wie bei Elektroautos und Offshore-Windturbinen, der Einsatz von Permanentmagneten aus Seltenen Erden, welche z. T. in den Elektromotoren der Kompressoren und den Umwälzpumpen verbaut werden. Es liegen aber derzeit keine Daten vor, welcher Anteil der Wärmepumpen mit Permanentmagneten gebaut wird und wie hoch der Anteil der Wärmepumpen mit Elektromagneten ist. Hierzu ist weiterer Forschungsbedarf notwendig. Im Vergleich zu anderen Schlüsseltechnologien und deren Komponenten sind die Versorgungsrisiken bei Wärmepumpen aber deutlich geringer.

Stahl: Bei Stahl besteht der Hauptengpass beim Bau der Schachtöfen für die Direktreduktion (DRI) mit Wasserstoff (oder alternativ Erdgas), da es hier nur wenige Anbieter gibt. Zum Teil gibt es auch Risiken bei der Verfügbarkeit von Eisenerzen mit sehr hohem Eisenanteil.

Nachfolgend werden die Rohstoffe, Komponenten und Güter, die in dieser Studie untersucht worden sind, eingeteilt nach ihrer Kritikalität. Bei den Rohstoffen wird dabei unterschieden zwischen Rohstoffgewinnung und Rohstoffverarbeitung

Kritikalität bei Rohstoffgewinnung

Sehr kritisch: Lithium, Schwere Seltene Erden und Iridium

Sehr kritisch auf der Ebene der Rohstoffgewinnung (Bergbauförderung) sind unter allen vertieft untersuchten Technologien die Rohstoffe Lithium (Lithium-Ionen-Batterien), Schwere Seltene Erden (Permanentmagnete für Offshore und Elektromobilität) sowie Iridium (PEM-Elektrolyseure).

- **Lithium:** Im Falle von Lithium ist in erster Linie der steile Hochlauf der globalen Nachfrage die Hauptherausforderung (Nachfrageüberhang). Die Ausweitung bestehender und die Neuinbetriebnahme neuer Minen – bzw. Förderungen aus Salzseen – benötigt mehr oder weniger lange Vorlaufzeiten. Daher ist für Lithium die Zeitdimension entscheidend für die Einstufung.
- **Schwere Seltene Erden:** Schwere Seltene Erden, wie z. B. Dysprosium und Terbium, werden zurzeit ausschließlich in China und in geringeren Mengen noch in Myanmar gefördert. Diese sehr starke Länderkonzentration verbunden mit der Tatsache, dass Schwere Seltene Erden in vielen (aber nicht allen) natürlichen Lagerstätten weltweit nur in sehr geringen Konzentrationen vorkommen, manifestiert diese Einstufung.
- **Iridium:** Die Bergbauförderung von Iridium beträgt heute 6 bis 10 Tonnen pro Jahr und kann nicht ausgeweitet werden, da es ausschließlich als Begleitmetall vor allem bei der Platinförderung (sehr hohe Länderkonzentration auf Südafrika) gewonnen wird. Eine zukünftige Steigerung der Platinförderung ist nicht realistisch und daher ist auch keine Steigerung des Iridiumangebots zu erwarten. Andere natürliche Vorkommen für Iridium scheiden ebenfalls aus für eine Steigerung der Förderung.

Mittel kritisch: Nickel, Kobalt, Graphit und Leichte Seltene Erden

Mittel kritisch auf der Ebene der Rohstoffgewinnung (Bergbauförderung) sind nach den Untersuchungen dieser Studie Nickel, Kobalt, Graphit und Leichte Seltene Erden. Für alle diese Rohstoffe ist zwar ein signifikantes Nachfragewachstum in den nächsten Jahren zu erwarten. Im Unterschied zu den oben als sehr kritisch eingeschätzten Rohstoffen gibt es aber unterschiedliche Gründe (siehe unten) die diese Einschätzung hier – trotz der hohen Bedeutung dieser Rohstoffe – rechtfertigen:

- **Nickel:** die weltweite Bergbauförderung ist vergleichsweise weit verteilt, wenngleich Indonesien aktuell seine führende Position ausbaut. Der Anstieg der Nickelnachfrage kann zumindest teilweise durch den steigenden Marktanteil nickelfreier Lithium-Ionen-Batterien (LFP-Batterien) gedämpft werden.
- **Kobalt:** Die DR Kongo weist zwar bzgl. der globalen Kobaltförderung einen sehr großen Anteil auf. Allerdings kommt nicht zuletzt Indonesien mit Produktionsausweitungen (als Begleitmetall bei der Nickelförderung) als demnächst zweitwichtigster Minenproduzent dem Markt entgegen. Außerdem dämpft sich der Anstieg der Kobaltnachfrage aufgrund des zunehmenden Einsatzes kobaltfreier und kobaltarmer Lithium-Ionen-Batterien mittelfristig ab.
- **Graphit:** China weist zwar bei der Bergbauförderung für natürlichen Graphit eine sehr dominante Rolle auf. Allerdings ergibt sich durch den Einsatz von synthetischem Graphit hier ein Alternativfeld. Außerdem sind die natürlichen Graphitreserven auf diverse Länder verteilt und Steigerungen des Angebots von dort möglich.

- **Leichte Seltene Erden:** China ist zwar weiterhin das Land mit der größten Minenproduktion an Leichten Seltenen Erden – allerdings mit klar sinkender Tendenz in den letzten Jahren. Leichte Seltene Erden kommen in natürlichen Vorkommen in zahlreichen Ländern vor (Australien, USA, Kanada usw.) und werden dort in zunehmendem Maße abgebaut, um das starke Nachfragewachstum zu befriedigen.

Mäßig kritisch: Mangan, Scandium, Eisenerze in DRI-Qualität

Mäßig kritisch auf der Ebene der Rohstoffgewinnung (Bergbauförderung) werden im Sinne dieser Studie die Rohstoffe Mangan und Scandium sowie Eisenerze (DRI Qualität) eingestuft. Die Begründungen hierfür sind unterschiedlicher Natur und werden in den jeweiligen Abschnitten erläutert.

Nicht kritisch, aber strategisch relevant für die Transformation zur Klimaneutralität 2045 sind nach den Untersuchungen die Rohstoffe Kupfer, Titan, Gallium, Germanium, Yttrium sowie Platin. Die Details hierzu finden sich in den entsprechenden Kapiteln in der Vollversion der Studie.

Kritikalität bei Rohstoffverarbeitung

Sehr kritisch: Verarbeitung von Leichten und Schweren Seltene Erden, Kobalt, Mangan, Graphit

Für die Ebene der Rohstoffverarbeitung sieht das Muster der Einstufung in sehr kritisch, mittel kritisch und mäßig kritisch anders aus im Vergleich zur Ebene der Rohstoffgewinnung. Die Verarbeitung von Leichten und Schweren Seltenen Erden sowie Kobalt, Mangan und Graphit wird hier jeweils als sehr kritisch eingestuft. Die Gründe für die Einstufung ist hier in allen Fällen die gleiche: die sehr starke bis totale aktuelle Dominanz Chinas vor dem Hintergrund eines steilen globalen Nachfragewachstums.

3. Zentrale Herausforderungen

Mittel kritisch: Verarbeitung von Polysilizium, Lithium, Nickel

Für Polysilizium, Lithium und Nickel² wird die Rohstoffverarbeitung als mittel kritisch eingestuft. Zwar hat hier China ebenfalls eine führende Position – allerdings haben hier auch andere Länder relevante Marktanteile.

Kritikalität bei Herstellung von (Teil)-Komponenten

Sehr kritisch: Ingots, Wafer, Zellen für Photovoltaik, Permanentmagnete für Offshore-Windkraft und Elektromotoren sowie Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien bei Elektromobilität

Für die Ebene der (Teil)-Komponentenherstellung sind für die Wafer-basierte Photovoltaik die Ingot-, Wafer- und Zellenproduktion, für die Windkraft und Elektromobilität die Produktion von Permanentmagneten und für die Elektromobilität die Herstellung von Anodenmaterial (für Lithium-Ionen-Zellen) als sehr kritisch einzustufen. In allen Fällen ist die Begründung eine sehr große bis erdrückende Marktmacht von China.

Mittel kritisch: Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien

Weiterhin wird für die Ebene der (Teil)-Komponentenherstellung die Herstellung von Kathodenmaterial (für Lithium-Ionen-Zellen) als mittel kritisch eingestuft. China ist zwar hier auch führend, aber auch Südkorea, Japan und tendenziell die USA und die EU nehmen hier relevante Rollen ein.

² In der Verarbeitungsebene handelt es sich bei Lithium um Lithiumcarbonat und Lithiumhydroxid-Hydrat, für Nickel um Nickelsulfat.

Kritikalität bei Gütern

Auf der Ebene der Güter werden PV-Module als sehr kritisch eingestuft. Zwar ist hier der Marktanteil Chinas an der Weltproduktion etwas geringer als bei den vorgelagerten Stufen und es bestehen derzeit mehr Fertigungskapazitäten in Europa als bei Zellen. Da die in Europa gefertigten Module größtenteils vom Import chinesischer Zellen abhängig sind, wird die Modulproduktion in dieser Studie auch als sehr kritisch eingestuft. Mittel kritisch wird zudem die Produktion von Batteriezellen eingestuft aufgrund des starken globalen Nachfragewachstums und der starken Position Chinas.

Bedarf kritischer Rohstoffe für Deutschland bis 2045

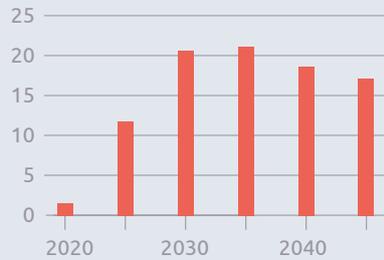
Die Studie zeigt, dass für die sieben zentralen Schlüsseltechnologien drei Rohstoffe als sehr kritische (Lithium, Schwere Seltene Erden, Iridium) sowie vier Rohstoffe (Nickel, Kobalt, Graphit, Leichte Seltene Erden) als mittel kritisch eingeschätzt werden. Ein weiteres zentrales Ergebnis dieser Studie ist die Quantifizierung des Bedarfs dieser sehr und mittel kritischen Rohstoffe in 5-Jahresschritten für Deutschland, die für die strategischen Schlüsseltechnologien bis zum Jahr 2045 notwendig sind. Der Bedarf basiert auf den Ausbaupfaden des Szenarios «KNDE2045» und den Annahmen zur Entwicklung der konkreten Technologiepfade der einzelnen Schlüsseltechnologien. Beim Ausbau Erneuerbarer Energien sowie dem Ausbau der Elektromobilität wurde das KNDE2045-Szenario punktuell aktualisiert. Zudem wurden im Verkehrssektor zwei Szenarien betrachtet: das «KNDE2045»-Szenario basiert auf den in der Studie «Klimaneutrales Deutschland 2045» berechneten Neuzulassungen – berücksichtigt also nur Mengen, die zur Deckung der Inlandsnachfrage notwendig sind. Eine umfassende Datenübersicht entlang dieser Szenarien ist in der Langfassung der Studie dargestellt.

ABB. 03 **Versorgungsrisiken für kritische Rohstoffe bei strategischen Schlüsseltechnologien**

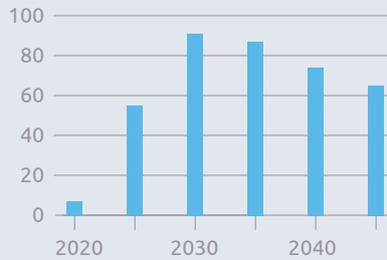
Die drei sehr kritischen Rohstoffe (Lithium, Schwere Seltene Erden, Iridium) sowie die vier mittel kritischen Rohstoffe (Nickel, Kobalt, Graphit, Leichte Seltene Erden) erreichen 2030/2035 ihr Nachfragemaximum.

A. Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge

Lithium (kt/a)

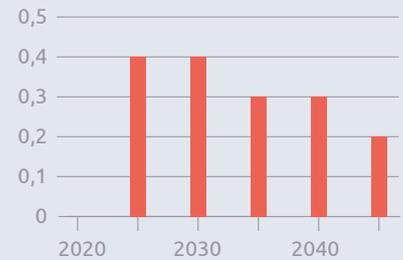


Nickel (kt/a)

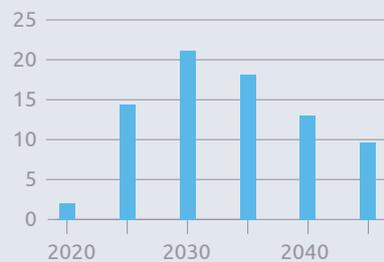


B. (PEM-)Elektrolyseure

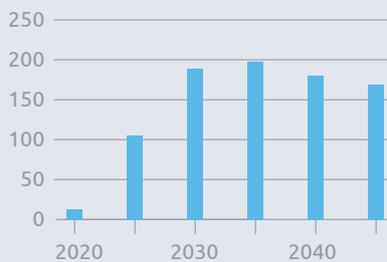
Iridium (t/a)



Kobalt (kt/a)



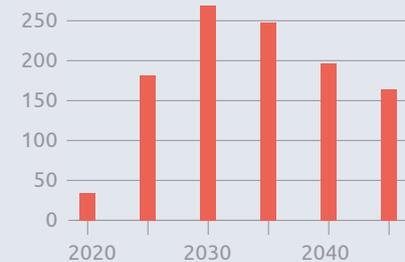
Graphit (kt/a)



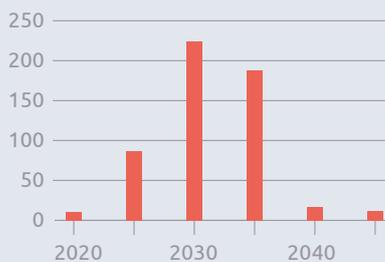
C. Permanentmagnete für Motoren in Fahrzeugen und Generatoren in Windkraftanlagen

Schwere Seltene Erden: Dysprosium, Terbium (t/a)

Fahrzeuge

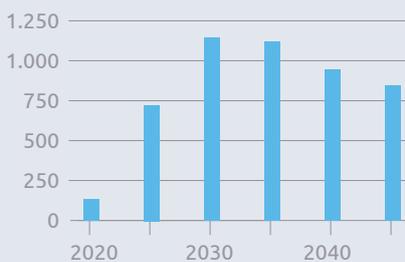


Windkraft

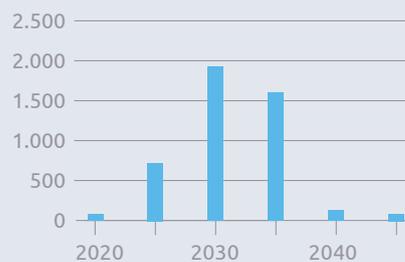


Leichte Seltene Erden: Neodym, Praseodym (t/a)

Fahrzeuge



Windkraft



3. Zentrale Herausforderungen

Mangan (Lithium-Ionen-Batterien) und Scandium (Hochtemperaturelektrolyseure) werden vor dem Hintergrund dieser Studie als mäßig kritisch eingestuft. Kupfer, Titan, Gallium, Germanium, Yttrium sowie Platin: Nach den Untersuchungen dieser Studie sind diese Rohstoffe für die Transformation zur Klimaneutralität 2045 strategisch relevant, aber nicht kritisch. Für die Quantifizierung des Iridiumbedarfs wurde eine Reduktion der Rohstoffintensität von bis zu 90 Prozent im Vergleich zu heute unterstellt.

Die Abbildung 3 zeigt sehr eindrücklich, welche Mengen von heute bis 2045 benötigt werden, um die Nachfrage nach den sieben mittel kritischen bzw. sehr kritischen Schlüsselrohstoffen Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit (Batterierohstoffe), Leichte Seltene Erden sowie Schwere Seltene Erden (Permanentmagnete in E-Fahrzeugen und Windkraftanlagen) sowie für Iridium (PEM-Elektrolyseure) decken zu können.

Alle hier dargestellten Rohstoffe erreichen in den Jahren 2030 bis 2035 ihr Nachfragemaximum. Grund hierfür ist vor allem der schnelle Ausbau der Schlüsseltechnologien in den nächsten zehn Jahren. Ab 2035 stagniert der Ausbau bei den meisten Technologien (z. B. Wafer-basierte Photovoltaik, E-Fahrzeuge) oder ist sogar rückläufig (Wind Offshore). Zudem kann durch die Erhöhung der Materialeffizienz der spezifische Rohstoffbedarf pro Anlage sinken. Besonders eindrücklich ist dieser Effekt bei PEM-Elektrolyseuren. Im Gegensatz zu den anderen dargestellten Technologien steigt der Bedarf nach den Anlagen auch nach 2030 weiter an. Durch die hier unterstellte Reduktion des Rohstoffeinsatzes von rund 90 Prozent, sinkt jedoch der Gesamtbedarf.

Der Nachfrageanstieg bis 2030 unterstreicht den hohen Handlungsdruck. Dieses gilt nicht nur für die sieben mittel kritischen bzw. sehr kritischen Rohstoffe, sondern auch für deren nachgelagerten Lieferketten zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien, Permanentmagneten und PEM-Elektrolyseuren.

4. Strategien und Maßnahmen für eine resiliente Transformation zur Klimaneutralität 2045

Nachdem im vorherigen Abschnitt für die strategischen Schlüsseltechnologien analysiert worden ist, auf welchen Stufen der Lieferketten die größten Versorgungsrisiken zu finden sind, werden in diesem Abschnitt mögliche Maßnahmen vorgestellt, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen und die Resilienz zu stärken.

Hierzu zählen insbesondere folgende nachfragegetriebene und angebotsseitige Maßnahmen:

- **Produktionsaufbau in Europa:** Diese Maßnahme betrifft grundsätzlich alle Wertschöpfungsstufen. Aufgrund der eingeschränkten geologischen Verfügbarkeit bei den meisten kritischen Rohstoffen, ist die Stärkung des europäischen Bergbaus nur bei vereinzelt Rohstoffen möglich. Diese Maßnahme greift deshalb vor allem bei den nachgelagerten Wertschöpfungsstufen.
 - **Diversifizierung von Bezugsländern:** Diese Maßnahme greift vor allem bei Versorgungsrisiken auf der Rohstoffseite. Die Vorschläge zur Priorisierung von Ländern erfolgt nach der Maßgabe, dass die Analyse realistische Chancen für Rohstoff- und Technologiepartnerschaften mit Deutschland bzw. der EU erkennen lässt. Wesentliche Kriterien hierfür sind:
 - Reserven:** es gibt relevante Reserven und es sind bestenfalls vor Ort schon Projekte für den Abbau gestartet oder zumindest in einem fortgeschrittenen Stadium (Zeitkomponente!),
 - Erfahrungen:** Länder mit Bergbau- und Aufbereitungserfahrungen wie z. B. Kanada, Australien, Brasilien, Chile sind besonders vorteilhaft, da dort im Zweifel schneller Projekte realisiert werden können: örtliche Behörden haben mehr Erfahrung, Fachkräftepotenzial ist höher etc.
 - Infrastruktur:** Es ist eine ausreichende Verkehrsinfrastruktur vorhanden oder im Aufbau: Hochseehäfen mit entsprechenden Kapazitäten
 - sind hierfür besonders relevant. Damit sind Lagerstätten in Küstennähe und guter Anbindung an bestehende Straßen- und/oder Bahninfrastruktur besonders attraktiv,
 - Beziehungen:** Die in Frage kommenden Länder haben bereits gute politische Beziehungen mit Deutschland und der EU oder sind zumindest offen für verstärkte wirtschaftliche Beziehungen,
 - Kein Kriegs- oder Krisengebiet:** Es handelt es sich nicht um Länder, die ausgewiesene Kriegs- oder Krisengebiete umfassen.
- **Recycling von kritischen Rohstoffen:** diese Maßnahmen wirken – mit wenigen Ausnahmen, z. B. beim Recycling von Batterieproduktionschrotten – vor allem erst längerfristig, da viele Technologien nach dem initialen Hochlauf teilweise mehrere Jahrzehnte im Markt verbleiben, bevor sie dem Recycling zur Verfügung stehen.
 - **Reduktion der Rohstoffintensität:** Diese wird meist durch Forschung und Entwicklung oder durch Automatisierung und Aufbau industrieller Fertigung erreicht. Diese Maßnahme reduziert die inländische Nachfrage, wirkt meist erst mittel- bis langfristig.
 - **Alternative Technologien:** Ausweichen auf Technologien mit geringerem Bedarf an kritischen Rohstoffen – z. B. Einsatz von nickel-, mangan- und kobaltfreien LFP-Batterien.

Im Folgenden sind die wichtigsten Maßnahmen und Strategien für eine resiliente Transformation zur Klimaneutralität 2045 bzgl. der identifizierten Schlüsseltechnologien zusammengefasst. Detaillierte Ausführungen hierzu finden sich in der Langfassung zu dieser Studie.

4. Strategien und Maßnahmen

4.1. Photovoltaik

Produktionsaufbau in Europa: Die wichtigste Maßnahme bei Photovoltaik ist der Aufbau von eigenen Produktionskapazitäten entlang der gesamten Lieferkette in Europa. Nach dem Net-Zero Industry Act sollen 2030 mindestens 40 Prozent im europäischen Inland produziert werden. Größtes Hemmnis hierbei sind die günstigeren Produktionskosten (von bis zu 30 Prozent) in den USA und in China durch hohe staatliche Subventionen.

Recycling: Beim Recycling bestehen größere Potenziale erst ab 2035 und 2040, da die Module eine lange Lebensdauer haben und erst langfristig in relevanten Mengen fürs Recycling zur Verfügung stehen. Recyclingverfahren zur Rückgewinnung von Polysilizium und Solarglas werden derzeit erst entwickelt und erprobt.

Diversifizierung von Bezugsländern: Diversifizierungspotenziale sind hingegen schwer prognostizierbar, da die möglichen Kapazitäten, z. B. in den USA und in Indien, gerade erst aufgebaut werden und voraussichtlich zuerst die heimische Nachfrage bedient wird.

Reduktion der Rohstoffintensität: Die Senkung der Materialintensität wirkt rohstoffseitig, löst aber nicht Marktmacht in der nachgelagerten Lieferkette.

Alternative Technologien: Neben den Wafer-basierten PV-Modulen könnten alternative Technologien genutzt werden. Bei den Dünnschicht-Modulen sprechen jedoch die geringen Wirkungsgrade gegen hohe Markanteile. Perowskit- oder organische Zellen befinden sich noch in Entwicklung und können kurzfristig keinen Beitrag zur Erhöhung der Resilienz liefern.

4.2. Windkraft

Produktionserhalt in Europa: Für die Fertigung von Windkraftanlagen wurde im Net-Zero Industry Act das Ziel vorgegeben, dass 85 Prozent der Windturbinen 2030 in Europa gefertigt werden sollen. Dieses Ziel kann prinzipiell erreicht werden, da im Gegensatz zu Photovoltaik, bereits heute eine substanzielle industrielle Basis in Europa besteht. Wichtigste Maßnahme zum Erhalt des hohen europäischen Fertigungsanteils ist die Unterstützung beim Upscaling der Fertigungsstätten,

sowie beim Hochfahren der Kapazitäten insbesondere im Leistungsbereich größer 12 MW für den Offshore-Sektor. Denn bei den großen Offshore-Anlagen besteht bislang nur eine geringe Fertigungskapazität, die zügig ausgebaut werden muss.

Zudem ist der Aufbau einer europäischen Lieferkette für Permanentmagneten zentral für die Erhöhung der Resilienz (vgl. KAP 4.4 Permanentmagnete).

Senkung Rohstoffintensität und alternative Technologien: Durch den Einsatz von Getrieben könnte der Bedarf von Seltenen Erden in Permanentmagneten um etwa 65 Prozent reduziert werden. Dieses reduziert jedoch die Effizienz der Anlagen und könnte zu höheren Gesamtkosten und damit zu einer zusätzlichen Schwächung der europäischen Hersteller führen, die bereits heute deutliche Kostennachteile gegenüber chinesischen Anbietern haben.

Recycling: Recycling von Seltenen Erden aus Permanentmagneten ist aufgrund der Lebensdauer der Anlagen erst ab 2035 von Relevanz.

4.3. Lithium-Ionen-Batterien

Produktionsaufbau in Europa: Nach dem Entwurf des Critical Raw Materials Acts sollen zehn Prozent der Rohstoffe und 40 Prozent der verarbeitenden Rohstoffe bis 2030 durch europäische Produktionskapazitäten abgedeckt werden. Zusätzlich verlangt das Sektorziel der EU, dass bis 2030 rund 90 Prozent der benötigten Batteriezellen in Europa gefertigt werden. Bergbau in Europa ist mittelfristig ab ca. 2026 für Lithium (Deutschland, Finnland, Frankreich etc.), Nickel und Kobalt (Finnland) und Graphit (Norwegen) möglich. Für die Raffination von Lithium werden mittelfristig ab 2024 Kapazitäten in Deutschland, Polen und Finnland aufgebaut. Für die Fertigung des Kathodenmaterials gibt es schon Projekte in Deutschland und Polen. Bei den Gigafactories sind große Anlagen zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen in zahlreichen Staaten der EU (Ungarn, Polen, Deutschland, Frankreich, Schweden usw.) in Planung, Bau oder bereits im Betrieb (insgesamt 35 GWh). Zusammengenommen könnte bei Realisierung der meisten Projekte hier eine

Produktionskapazität in Europa von >1000 GWh pro Jahr bis 2030 aufgebaut werden.

Diversifizierung von Bezugsländern: Für die Batterierohstoffe, Aktivmaterialien und Batteriezellen – besonders Lithium-Eisen-Phosphatzellen (LFP) – ist eine stärkere Differenzierung der Lieferländer nötig und auch möglich. Stärkung bestehender Partnerschaften wie mit Chile und neue Kooperationen mit Australien, Kanada, Ghana; Namibia u. a. sollten aus- und aufgebaut werden.

Recycling: Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wird in fünf bis 15 Jahren eine immer größere Relevanz für die Versorgung einnehmen können. Die Basis wurde mit der neuen EU-Batterieverordnung geschaffen, die in Kürze in Kraft tritt. Massive Investitionen in die gesamte Recyclinginfrastruktur für Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland und in der EU sind notwendig, aber bereits auch angelaufen, um mittel- und langfristig die gewaltigen Recyclingpotenziale für Lithium, Kobalt, Nickel usw. optimal zu erschließen.

Alternative Technologien: Bis auf Weiteres (mindestens bis 2030/2035) werden Lithium-Ionen-Batterien die dominante Technologie für Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen darstellen. Technologische Alternativen wie vor allem Natrium-Ionen-Batterien benötigen noch entwicklungs- und Aufbauzeit. Die tatsächlichen zukünftigen Marktpotenziale sind hier derzeit noch nicht valide zu prognostizieren.

Reduktion der Rohstoffintensität: Insbesondere auf der Güterebene kann die Materialintensität bzgl. kritischer Rohstoffe für Batterien durch kleinere Batterien (Vermeidung zu groß dimensionierter Batterien zur Adressierung der oft übertriebenen «Reichweitenangst») und durch weniger Fahrzeuge (Änderung des Modal Splits hin zum öffentlichen Verkehr) sowie durch tendenziell kleinere und leichtere Fahrzeuge mit verringertem Energieverbrauch erreicht werden

4.4. Permanentmagnete

Produktionsaufbau in Europa: Die European Raw Materials Alliance gibt für den stark wachsenden Markt für Permanentmagnete (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) das ambitionierte Ziel von 20 Prozent Eigenversorgung bis 2030 in der EU vor. Hauptherausforderungen sind hierbei Know-how und Kostenvorsprung von chinesischen Unternehmen sowie eine überschaubare Unternehmens- und Fachkräftekapazität in Europa. Beides gilt es in Europa in hohem Tempo aufzubauen. Mit dem Startschuss eines von der EU geförderten Investitionsprojekts in Estland (Magnetfabrik inkl. vorgelagerten Produktionsstufen) wurde hier ein wichtiger Schritt eingeleitet.

Diversifizierung von Bezugsländern: Da Europa auf absehbare Zeit auf Importe von Rohstoffen, Zwischenprodukten und strategischen Gütern bzgl. der Wertschöpfungskette für Permanentmagnete angewiesen sein wird, ist eine zentrale Maßnahme die Schaffung einer stärker diversifizierten Lieferländerstruktur. Hier sollte sich Deutschland und Europa für verstärkte gemeinsame Transformationspartnerschaften (Technologie- und Rohstoffkooperationen) mit geeigneten Ländern sowohl des Globalen Nordens (vor allem Kanada und Australien) als auch des Globalen Südens (z.B. Namibia, Malawi, Kolumbien) intensiv einsetzen.

Recycling: Bis 2030 sind die Recyclingpotenziale nur sehr gering, Allerdings steigen die Recyclingpotenziale nach 2030 zunächst aus End-of-Life-Fahrzeugen und etwas später aus ausgemusterten Windkraftanlagen sehr stark an. Das Recycling von Permanentmagneten und Seltenen Erden ist noch ein Forschungs- und Entwicklungsbereich, der gefördert werden muss. Erste kleine Recyclinganlagen für Permanentmagnete in UK und Deutschland sind mit Betriebsstart für 2024 angekündigt. Das Recycling von Permanentmagneten ist grundsätzlich eine vielversprechende Option, da in den Magneten 30 Gewichtsprozent der Seltenen Erden enthalten sind, die auch wieder für Magnete benötigt werden. Diese Ausgangslage bietet nicht annähernd eines der vielen natürlichen Rohstoffvorkommen weltweit.

4. Strategien und Maßnahmen

Alternative Technologien: Elektromotoren für Fahrzeuge, die ohne Permanentmagnete arbeiten, sind zwar am Markt. Aufgrund der technologischen Vorteile der Elektromotoren mit Permanentmagneten (geringeres Gewicht und Volumen, höherer elektrischer Wirkungsgrad) fristen sie jedoch fast nur ein Nischendasein. Fachleute rechnen daher auch mittel- und langfristig für alternative Elektromotoren (ohne Permanentmagnete) nur mit einem moderaten Potenzial. Im Bereich der Windkraftanlagen haben getriebelose Anlagen mit Permanentmagneten vor allem bei den besonders großen Offshore-Anlagen deutliche Vorteile, so dass auch hier nicht mit relevanten Entspannungen bzgl. des Einsatzes von Permanentmagneten und damit Seltenen Erden zu rechnen ist.

Reduktion der Rohstoffintensität: Die Senkung des Einsatzes von Schweren Seltenen Erden in den Magnetlegierungen ist zum guten Teil bereits erschlossen. Auch langfristig sind hier nur noch moderate weitere Potenziale möglich.

4.5. Elektrolyseure

Reduktion der Rohstoffintensität: Die Reduzierung des spezifischen Materialbedarfs an Iridium für PEM-Elektrolyseure stellt mit Abstand die wichtigste strategische Aufgabe dar. Mit Hilfe von F&E und innovativen Verfahren könnte der Einsatz von Iridium um bis zu 90 Prozent gesenkt werden.

Produktionsaufbau in Europa: Nach den Zielen von RePowerEU sollen im Jahr 2025 Fertigungskapazitäten zum Bau von Elektrolyseuren in Höhen von rund 17,5 GW (bezogen auf die Wasserstoffherzeugung und den Heizwert) erreicht werden. Die bisher geringe Nachfrage an Wasserelektrolyseanlagen wurde im Manufakturbetrieb und in Kleinserie bedient. Um die rasant steigende Nachfrage zu bedienen, ist der Aufbau einer Gigawatt-Elektrolyseindustrie mit serieller Fertigung, einem hohen Automatisierungsgrad und der Nutzung von Skaleneffekten eine zentrale Voraussetzung. Der erwartbare Hochlauf der Fertigungskapazität zeichnet sich bereits ab. Es muss nun sichergestellt werden, dass die angekündigten Projekte realisiert und weiter gesteigert werden.

Diversifizierung von Bezugsländern: Die Iridiumförderung ist sehr stark konzentriert auf Südafrika und dann mit Abstand auf Zimbabwe und Russland. Eine Diversifizierung der Bezugsländer würde die Resilienz kaum erhöhen. Denn das Hauptproblem ist weniger die Länderkonzentration, sondern dass die weltweite Förderung voraussichtlich nicht gesteigert wird. Iridium wird nur als Beiprodukt (in sehr geringer Konzentration) bei der Platinförderung gewonnen.

Recycling: Recycling von Schlüsselrohstoffen aus verbrauchten Elektrolyseuren (vor allem Iridium und Platin sowie Titan) ist erst langfristig eine Perspektive, die in der Entwicklung bereits heute berücksichtigt werden kann. In Deutschland gibt es bereits laufende Forschungsanstrengungen hierzu.

Alternative Technologien: Alkalische Elektrolyseure (AEL) als mögliche Alternative zu PEM-Elektrolyseuren haben heute einen Marktanteil von 70 Prozent und verwenden keine kritischen Rohstoffe, wie Iridium. Allerdings brauchen sie aufgrund der geringeren Effizienz mehr Strom und können weniger flexibel gefahren werden. Gerade bei einem Stromsystem mit einem sehr hohen Anteil Erneuerbarer Energien ist dieses notwendig. Weitere Alternativen wären Hochtemperatur-Elektrolyseure (HTEL) oder Anionenaustauschmembranelektrolyseure (AEM). Diese sind erst im Pilotstadium, die zukünftige Marktdurchdringung ist noch ungewiss. Zudem benötigen HTEL Scandium, welches bislang zu 75 Prozent in China abgebaut wird. Hier wäre jedoch eine Diversifizierung der Versorgung aus Ländern wie USA, Kanada aber auch aus der EU (Finnland, Schweden, Griechenland) möglich.

4.6. Wärmepumpen

Produktionsaufbau und -erhalt in Europa: Heute bestehen in Europa bereits Fertigungskapazitäten in Höhe von 19 GW. Nach den Zielen des Net-Zero Industry Act sollen bis 2030 mindestens 85 Prozent der neu installierten Anlagen in Europa gefertigt werden. Dieses entspricht einer Fertigungskapazität von etwa 31 GW und einem notwendigen Zuwachs von 50 Prozent im Vergleich zu heute. Die Hersteller erwarten in Europa in

Summe ein deutliches Marktwachstum und weiten entsprechend ihrer Kapazitäten aus. Um diesen Hochlauf und die Investitionen abzusichern, ist es wichtig, dass es verlässliche Rahmenbedingungen für die Minderung der Treibhausgase im Gebäudesektor gibt. Für die weitere Perspektive in Deutschland bis 2030 ist vor allem das Gebäudeenergiegesetz (GEG) und ein für alle Akteure gut einschätzbarer Hochlauf der CO₂-Bepreisung entscheidend.

Alternative Technologien, Diversifizierung: In den Motoren der Kompressoren und Umwälzpumpen können statt Permanentmagnete auch Elektromagnete (Induktionsmotoren) eingesetzt werden. Inwieweit die Nachteile der Induktionsmotoren (teilweise geringerer Wirkungsgrad, etwas höhere Lautstärke) über technische Weiterentwicklung kompensiert werden können, muss untersucht werden. Bislang ist das Thema Permanentmagnete bei Wärmepumpen kaum wissenschaftlich untersucht worden.

Darüber hinaus ist der Aufbau einer europäischen Lieferkette für Permanentmagneten zentral für die Erhöhung der Resilienz (vgl. Kap. 4.4 Permanentmagnete).

4.7. Stahl

Produktionsaufbau und -erhalt in Europa: Um Schachtöfen für die Direktreduktion mit Wasserstoff (DRI-Anlagen) in Deutschland bauen zu können, ist angesichts der drohenden Lieferengpässe im Anlagenbau Schnelligkeit gefragt. Die Politik kann eine solche Entwicklung besonders durch einen vorausschauenden Infrastrukturausbau und finanzieller Förderung unterstützen – als Ergänzung zum CO₂-Grenzausgleichssystem (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) sowie der Unterstützung des Hochlaufs eines Leitmarktes für grünen Stahl.

Recycling: Eine stärkere Versorgung mit inländischem Sekundärmaterial bildet auch im Stahlbereich die beste Versicherung gegen Importabhängigkeiten. Hierfür müssen die Schrotte jedoch deutlich besser sortiert werden, v. a. im Automobilbereich.

Diversifizierung von Bezugsländern: Deutschland sollte aber auch ein Interesse an einer sicheren DRI-Versorgung auch durch Importe haben, unterstützt werden könnte dies durch eine Flankierung der Entstehung von Lieferbeziehungen oder liquiden Märkten, etwa durch Kreditabsicherungen. Möglich wären feste Lieferverträge für grünes DRI mit Schweden. Möglichkeiten der Diversifizierung dürften sich mittelfristig ergeben, sobald auch die Projekte auf der Iberischen Halbinsel, in Australien, Brasilien oder Afrika Fahrt aufgenommen haben. Liquide Weltmärkte für grünes DRI wären aus Effizienzgesichtspunkten zu bevorzugen, ob sich diese angesichts des gerade im Stahlbereich virulenten Protektionismus robust herausbilden können, ist allerdings nicht sicher.

4.8. Fazit

Für alle priorisierten Schlüsseltechnologien konnten aus den folgenden fünf unterschiedlichen Maßnahmenbereichen relevante Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz identifiziert werden. An dieser Stelle werden die wichtigsten Beispiele in Kürze zusammengefasst.

Produktionsaufbau in Europa

Die Rückverlagerung bzw. der Aufbau der Wertschöpfungskette in Deutschland und Europa ist für weite Teile der PV-Wertschöpfungskette essenziell. Hierbei geht es vor allem um Stärkung der Marktanteile für die Produktionsstufen Ingots, Wafer, PV-Zellen und PV-Module für die marktdominante Wafer-basierte PV-Technologie. Europa hat in diesen Bereichen aktuell nur sehr geringe Produktionskapazitäten und zur Steigerung der Resilienz und Verminderung von Abhängigkeiten ist die deutliche Steigerung der Produktionskapazitäten in der EU bis 2030 strategisch unverzichtbar.

4. Strategien und Maßnahmen

TAB. 01 **Potenzielle Partnerländer für den Aufbau und die Vertiefung von transformativen Industrie- und Investitionspartnerschaften** zur Sicherung und Weiterverarbeitung von Schlüsselrohstoffen für die Transformation zur Klimaneutralität.

Potenzielle Partnerländer	Rohstoffe	Bemerkungen
Australien	Lithium, Leichte und Schwere Seltene Erden, Nickel, Kobalt	Bereits umfassende Lithiumförderung und Minenförderung Seltener Erden
Brasilien	Graphit, Lithium, Mangan	Bereits Minenförderung bzw. Ausbeutung (Lithium) von Tailings
Chile	Lithium, Kupfer	Bereits umfassende Lithium- und Kupferförderung, Lithiumförderung soll ausgebaut werden.
Ghana	Lithium	Noch keine Minenförderung, Bergbauprojekt in Planung
Indonesien	Kupfer, Nickel, Kobalt	Vor allem bestehende Nickel- und Kobaltförderung soll robust ausgebaut werden.
Kanada	Lithium, Nickel, Kobalt, Seltene Erden	Bislang sehr geringe Lithiumförderung soll ausgeweitet werden. Bergbauprojekte für Seltene Erden in Planung und Aufbau.
Kolumbien	Seltene Erden, Nickel	Ausweitung Nickelförderung geplant, Reserven für Seltene Erden
Madagaskar	Graphit	Bestehende Minenförderung
Malawi	Leichte und Schwere Seltene Erden	Noch keine Minenförderung; Bergbauprojekt in der Planung
Mozambique	Graphit	Bestehende Minenförderung
Namibia	Leichte und Schwere Seltene Erden, Lithium	Noch keine Minenförderung, Projekte in Planung und Aufbau
Südafrika	Mangan, Iridium, Platin	Wichtigster Minenproduzent für die drei Rohstoffe
Zimbabwe	Iridium, Platin	Bestehende Minenförderung; allerdings deutlich geringere Produktion im Vergleich zu Südafrika

QUELLE Eigene Zusammenstellung Öko-Institut basierend auf (U.S. Geological Survey, 2023)

Öko-Institut, 2023

Im Falle der Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien (Elektromobilität) ist der notwendige Aufbau einer europäischen Wertschöpfungskette durch die Förderung (durch EU, Bundesregierung etc.) der «Gigafactories» und vorgelagerter Stufen (Lithiumraffinerien, Kathodenmaterialproduktion usw.) bereits angelaufen. Diese Aktivitäten müssen trotz aktueller Herausforderungen wie den Inflation Reduction Act der USA konsequent fortgeführt und auch stärker auf Rohstoffförderung innerhalb Deutschlands und der EU (hier ist vor allem Lithium im Fokus) ausgedehnt werden.

Ebenso müssen für die Wertschöpfungskette der Permanentmagnete (Aufbereitung von Seltenen Erden, Herstellung von Seltenerdmetallen und Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten) als auch der Produktionskapazitäten für Elektrolyseure und DRI-Stahl die Weichen für relevante Produktionskapazitäten in Europa gestellt werden.

Diversifizierung von Bezugsländern

Die Diversifizierung von Bezugsländern (außerhalb der EU) ist vor allem für die Versorgung von Rohstoffen und Zwischenprodukten ein zweiter wichtiger Pfei-

ler zur Steigerung der Resilienz.³ Hier ist einerseits die Stärkung der wirtschaftlichen Zusammenarbeit mit etablierten Partnern wie Chile (Lithium, Kupfer), Kanada (Lithium, Nickel, Seltene Erden), Australien (Lithium, Seltene Erden, Nickel, Kobalt), Brasilien (Graphit, Lithium, Mangan) unbedingt wichtig. Andererseits ist zur weiteren Ausdehnung der Diversifizierung von Bezugsländern der Aufbau neuer Rohstoff- und Technologiepartnerschaften mit Ländern des Globalen Südens unbedingt zu empfehlen. Wichtige Beispiele für eine mögliche künftige Zusammenarbeit sind Ghana (Lithium), Indonesien (Nickel, Kobalt), Namibia (Seltene Erden, Lithium), Malawi (Seltene Erden, inkl. Schwere Seltene Erden) sowie Kolumbien (Seltene Erden, Nickel). In der nachfolgenden Tabelle sind beispielhaft (potentielle) Bezugsländer für Schlüsselrohstoffe aufgeführt. Die Tabelle erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Weiterhin ist wichtig anzumerken, dass zunehmend mehr Länder dem Beispiel Indonesiens folgend keine nicht-verarbeitenden Rohstoffe exportieren werden. Die entsprechenden Länder möchten durch die Weiterprozessierung der Rohstoffe die Wertschöpfungsanteile im eigenen Land damit ausweiten. Hier gilt es faire Partnerschaftsmodelle im Sinne wahrer Transformationspartnerschaften «auf Augenhöhe» zu entwickeln.

Recycling

Recycling als dritter wichtiger Pfeiler zur Stärkung der Resilienz ist auf der zeitlichen Schiene zunächst für die Rückgewinnung von Batterierohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel und Kupfer von Relevanz. Erste Recyclinganlagen sind in Deutschland und Europa in Betrieb und durch die baldige Verabschiedung der neuen EU Battery Regulation ist ein ambitionierter regulatorischer Rahmen gesetzt. Die notwendigen Maßnahmen zur Steigerung der Recyclingaktivitäten müssen jetzt forciert fortgesetzt werden, um ab 2030 und danach die großen sich abzeichnenden Recyclingpotentiale zu er-

schließen. Im Fall der Permanentmagnete (Seltene Erden) ist das Recycling ebenfalls von großer strategischer Relevanz. Allerdings müssen hier noch verstärkte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen und entsprechende technologische Innovationen zu den Recyclingprozessen forciert werden, um hier die Recyclingpotenziale zu erschließen. Durch den Vorschlag der EC zum Critical Raw Materials Act und zur Revision der EU-Altfahrzeug-Richtlinie zeichnen sich hier ebenfalls wichtige regulatorische Weichenstellungen ab, die es unbedingt zu unterstützen gilt. Das Recycling von PV-Modulen und Materialien von Elektrolyseuren (Titan, Iridium, Platin) ist ebenfalls eine Option – allerdings mit Relevanz erst nach 2035.

Reduktion der Rohstoffintensität

Innovationen im Bereich der Reduktion der Rohstoffintensität durch Steigerung der Materialeffizienz bei spezifischen Komponenten sind besonders relevant für die zukünftigen Produktionsausweitungen von PEM-Elektrolyseuren. Eine deutliche Verringerung des spezifischen Iridiumbedarfs von PEM-Elektrolyseuren ist unbedingte Voraussetzung für eine Realisierung einer Massenproduktion dieser Technologie, die für den Aufbau einer globalen Wasserstoffwirtschaft sehr bedeutsam ist. Im Bereich der Permanentmagnete bestehen zumindest noch moderate Potenziale zur Reduktion des Gehalts an Schweren Seltenen Erden durch Innovationen bei der Magnetproduktion. Schwere Seltene Erden sind als sehr kritisch im Sinne dieser Studie einzustufen.

Alternative Technologien

Alternative Technologien zeichnen sich innerhalb der Produktfamilie der Lithium-Ionen-Batterien ab bzw. sind bereits marktreif. Hier sind einerseits die Ausweitung des Einsatzes der kobaltarmen NMC811-Batterien und vor allem der nickel-, kobalt- und manganfreien LFP-Batterien zu nennen. Weitere Alternativen in Entwicklung, die ggf. nach 2030 Relevanz erzielen können, sind hier Feststoffbatterien oder auch Natrium-Ionen-Batterien.

³ Allgemeine Kriterien für eine Priorisierung von Bezugsländern außerhalb der EU sind zu Beginn dieses Hauptkapitels aufgeführt.

5. Politische Empfehlungen

Basierend auf den Untersuchungen zu der Nachfrage- und der Angebotsseite für die im Sinne dieser Studie besonders wichtigen Technologien hat das Projektteam die folgenden möglichen Strategien und Instrumente zur Steigerung der Resilienz der Lieferketten identifiziert. Eine vertiefte Untersuchung der einzelnen Instrumente lag außerhalb des Rahmens dieser Studie. Die nachfolgenden ersten Empfehlungen sollen vielmehr einen Rahmen abstecken, in dem die mögliche Wirksamkeit und prioritäre Anwendbarkeit zur robusten Stärkung der Resilienz wichtiger Lieferketten für die Transformation in nachfolgenden Untersuchungen vertieft werden sollten.

Umfassendes Resilienz-Monitoring einführen

Für alle in dieser Studie als prioritär eingestuften Wertschöpfungs- bzw. Lieferketten (PV, Windkraft, Permanentmagnete, Batterien für Elektromobilität, Elektrolyseure, DRI-Stahl sowie Wärmepumpen) ist es sinnvoll, ein «Resilienz-Monitoring» einzuführen, welches regelmäßig, z.B. jährlich den politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsträgern relevante Informationen zu den strategischen Wertschöpfungsketten liefert. Wichtig ist dabei, dass jeweils die gesamten Lieferketten hinsichtlich ihrer Vulnerabilitäten bzw. Resilienz erfasst werden, dies sowohl aus deutscher als auch europäischer Perspektive geschieht und die Informationen so weit als möglich durch Quantifizierungen untermauert sind. Das Resilienz-Monitoring bedarf einer eigenen institutionellen Verankerung.

Stabile Absatzmärkte für transformative Schlüsseltechnologien schaffen

Die Schaffung eines verlässlichen Heimatmarktes in Deutschland bzw. der EU ist für alle Schlüsseltechnologien auch aus der Resilienzperspektive unabdingbar. Hierfür sind diverse Einzelinstrumente relevant. Dazu zählen die Schaffung attraktiver Rahmenbedingungen

für die Märkte, also möglichst stabile und vorhersehbare regulatorische Maßnahmen (Ordnungsrecht, CO₂-Bepreisung, Infrastrukturausbau und Subventionen), die Unterstützung von grünen Leitmärkten, eine vorausschauende Fachkräftesicherung, schnelle Planungs- und Genehmigungsverfahren, den Abbau belastender Bürokratie sowie auch die Entwicklung bzw. Fortschreibung klarer Exportstrategien (z.B. im Bereich der erneuerbaren Energien bei der Windstromerzeugung auf See).

Resilient-Content-Regelungen etablieren

Resilient Content umfasst die Festsetzung von Standards und Qualitäten, wie z. B. Vorgaben zum CO₂-Fußabdruck oder zu umwelt- und sozialverträglichen Lieferketten. So sind in der neuen EU-Battery-Regulation ab bestimmten Zieljahren entsprechende Vorgaben bereits vorgesehen. Mit dem Instrument könnte der Import von Gütern, die unter schlechten Umwelt- und Sozialstandards produziert werden, begrenzt werden.

Dieses durchaus sensible Instrument bedarf für die prioritär eingestuften Wertschöpfungsketten noch vertiefender Untersuchungen. So ist die die Konformität mit WTO-Regeln relevant. Das Kriterium könnte unterschiedlich genutzt werden, z.B. durch Boni bei Ausschreibungen oder Einspeisevergütungen (in Anlehnung an das Staffelmodell des Inflation Reduction Acts) oder auch als qualitatives Kriterium bei entsprechenden Ausschreibungen.

Im Bereich der Offshore-Windenergie könnten Resilient-Content Vorgaben dazu beitragen, dass insbesondere europäisch abgestimmte Ausbaupfade zu einer Verstetigung in den Fertigungsaufträgen führen. Ausschreibungen sollten auch darauf ausgerichtet werden, den Einsatz europäischer Anlagen zu priorisieren. Dies könnte auch ein wichtiger Beitrag zur notwendigen Exportstrategie sein.

Einkaufsgemeinschaften für strategische Rohstoffe und Güter ermöglichen

Gebündelte Einkaufsgemeinschaften könnten durch ihre größere Einkaufsmacht die Position von deutschen und europäischen Unternehmen auf dem Weltmarkt stärken. Heute verhindert das Kartellrecht zum Teil die Bildung solcher Einkaufsgemeinschaften. Es sollte überprüft werden, ob im Sinne der Stärkung von Lieferketten und Unternehmen das Kartellrecht angepasst werden kann.

Heimische Ansiedlungspolitik im Bereich strategischer Rohstoffe und Güter offensiv vertreten

Grundlage für diese übergreifende angebotsseitige Strategie ist die Tatsache, dass die Schaffung einer Resilienz-Versicherung für die anstehenden Transformationen mit Kosten verbunden sein wird. Für strategische Lieferketten, die für eine resiliente und zukunftsfähige Wirtschaft unverzichtbar sind, werden heimische Marktakteure übergangsweise durch zusätzliche finanzielle Mittel (durch Bundesregierung und/oder Bundesländer und/oder EU) vor strukturell unfairer Konkurrenz außerhalb der EU (Marktvorteile durch diverse staatliche Beihilfen, Steuer- und Zollinstrumente, Unterbietung jeglicher Umwelt- und Sozialstandards usw.) robust unterstützt werden müssen. Diese Unterstützung sollte so weit gewährt werden bis ein echtes Level Playing Field in diesem Bereich erreicht ist.

Zunächst kommen hier Investitionsförderungen (CAPEX) in Betracht. Bekannte Beispiele sind IPCEI-Projekte, also nach von der EU als «Important Project of Common European Interest» eingestufte, besonders förderfähige Investitionen. Für die Ansiedlungsförderung sollten neben regionalen Kriterien auch und besonders Resilienz Aspekte für die Einstufung der Förderfähigkeit explizit etabliert werden.

Ein weiteres angebotsseitiges Instrument der EU ist der «Just Transition Fund», welcher spezielle Förderungen für Investitionsprojekte, für die von der Transformation besonders betroffenen Regionen vorsieht. Ein aktuelles Beispiel ist die Förderung einer Magnet-

fabrik in Estland (kürzlich Baubeginn inkl. Vorstufen) im Rahmen des Just Transition Funds. Die vom Kohleausstieg besonders betroffene Region Lausitz wäre sicherlich beispielhaft eine Region, die hier Argumente für entsprechende Investitionen anführen kann.

Neben CAPEX-Förderungen können jedoch auch zumindest zeitlich begrenzte OPEX-Förderungen notwendig sein. Hier sind alle energieintensiven Produktionen für die prioritären Wertschöpfungsketten in den Blick zu nehmen, die gegenüber Wettbewerbern außerhalb Europas massive Wettbewerbsnachteile auf der Betriebskostenseite haben. Dies kann beispielweise für Batteriezellfabriken, Anlagen zur Herstellung von Permanentmagneten und auch Teile der Wertschöpfungskette für Photovoltaik sowie die Herstellung von grünem Stahl sehr relevant sein. Ein zeitlich und für bestimmte Branchen bzw. Prozesse begrenzter Industriestrompreis könnte Teil einer solchen OPEX-Förderung sein.

Grundsätzlich kann eine beschriebene mit finanziellen Mitteln gestützte Ansiedlungspolitik helfen, Wertschöpfungsketten in Europa zu stärken und durch Economies-of-Scale-Impulse auch zu effizienteren heimischen Produktionen beitragen.

Transformationspartnerschaften auf Augenhöhe ausbauen und stärken

Für viele Produkte wie Lithium-Ionen-Batterien, Permanentmagneten, Elektrolyseure haben die Analysen gezeigt, wie wichtig stärker diversifizierte Lieferbeziehungen mit Ländern außerhalb der EU sind. Im Rahmen dieser Studie wurden für eine Vorauswahl sowohl für Länder des Globalen Nordens als auch des Globalen Südens allgemeine Kriterien formuliert. Es darf hierbei keineswegs nur um den Bezug von Rohstoffen, sondern vielmehr um Zwischenprodukte und Endprodukte gehen. Die Etablierung von sogenannten Transformationspartnerschaften «auf Augenhöhe» ist ein wichtiges Element, damit die Diversifizierungsstrategie auch nachhaltig erfolgreich ist. Gerade Länder des Globalen Südens (z.B. Indonesien, Namibia) machen zukünftige wirtschaftliche Zusammenarbeit von einer größeren Partizipation an der Wertschöpfungskette abhängig.

5. Politische Empfehlungen

Deutschland sollte diese neuen Rohstoff- und Technologiepartnerschaften unbedingt mit Bildungs- und Forschungszusammenarbeit verbinden, um die Partnerschaften auf Augenhöhe mit Substanz zu unterstreichen. Es wird als Ergebnis dieser Studie empfohlen, die vorgeschlagenen Länder in den nächsten Monaten für eine besondere Eignung entsprechender Partnerschaften intensiver zu untersuchen.

Frühzeitiger Kapazitätsaufbau in der Recyclingindustrie

Für eine Reihe von den strategischen Rohstoffen wie Lithium, Nickel, Kobalt und Kupfer aus Batterien, Seltene Erden aus Permanentmagneten stellen die zukünftig verstärkt anfallenden End-Of-Life-Materialströme (z.B. aus abgemeldeten Fahrzeugen, stillgelegten Windkraftanlagen) mittel- und langfristig eine attraktive heimische Versorgungsquelle für strategische Rohstoffe dar. Die europäische Metallrecyclingindustrie repräsentiert in einigen Bereichen Weltniveau (z.B. für Kupfer und Edelmetalle). Dieses gute Ausgangsniveau muss für «neue» bzw. aktuell wachsende Recyclinginfrastrukturen (wie für Lithium-Ionen-Batterien, Permanentmagnete, später auch PV-Module und Elektrolyseure) mit geeigneten Instrumenten auf der Regulierungsebene gestützt werden. Die demnächst in Kraft tretende EU-Battery-Regulation hat hier durch Sammelziele, materialspezifische

End-of-Life-Recyclingquoten (für Lithium usw.) sowie durch Recycled-Content-Vorgaben für zukünftig neu in den Markt zu bringende Batterien den Weg vorgegeben. Hier gilt es nun in den nächsten Jahren den Vollzug in allen EU-Ländern robust umzusetzen, um die ambitionierten Ziele zu realisieren.

Für das zukünftige Recycling von Permanentmagneten bzw. Seltener Erden in der EU hat der Entwurf zum Critical Raw Materials Act wichtige Eckpunkte gesetzt. Ein weiteres wichtiges Regelwerk, welches sich gerade im Revisionsprozess befindet, ist die EU-Altfahrzeug-Richtlinie. Hier sind ebenfalls Vorgaben zur Demontage und Behandlung von Elektromotoren (Permanentmagnete) im Fokus.

Weitere flankierende Instrumente zur Unterstützung des Recyclings innerhalb der EU liegen in Designanforderungen (vgl. EU Ökodesign-Richtlinie), F&E-Förderungen für neue innovative Recyclingverfahren oder gar Exportbeschränkungen für strategische (Zwischen-)produkte aus Recyclingprozessen. Ein aktuelles Beispiel ist die entsprechende Diskussion bzgl. der Einschränkung des möglichen Exports der werthaltigen «Schwarzmasse», ein Zwischenprodukt aus dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien.

Auch wenn die Beiträge aus dem Recycling zur Versorgung Europa mit strategischen Rohstoffen erst mittelfristig (ab 2030) oder langfristig (nach 2035) relevante Größenordnungen erreichen kann, müssen die Instrumente für die Erschließung der Potenziale in den nächsten drei Jahren auf den Weg gebracht werden.

Die Transformation zur Klimaneutralität erfordert in Deutschland und der EU eine schnelle und entschiedene Investitions- und Modernisierungsoffensive. Die resiliente Versorgung mit den notwendigen Rohstoffen und strategischen Gütern ist dafür eine elementare Voraussetzung. Hierbei gilt es neue geopolitische Herausforderungen so zu berücksichtigen, dass Europa und Deutschland nicht erpressbar werden und die notwendige politische Freiheit für souveränes Handeln erhalten bleibt.

Die Studie der Stiftung Klimaneutralität identifiziert für strategisch wichtige Transformationsindustrien entlang der gesamten Wertschöpfungs- und Lieferkette entscheidende Schwachpunkte. Sie liefert Antworten für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, wie die Resilienz gegenüber exogenen Schocks erhöht werden kann.

Die Stiftung Klimaneutralität wurde gegründet, um robuste sektorübergreifende Strategien für ein klimaneutrales und -gerechtes Deutschland zu entwickeln. Auf der Basis von guter Forschung will die Stiftung informieren und beraten – jenseits von Einzelinteressen.

Im Auftrag der



**Stiftung
Klimaneutralität**

Unter diesen QR-Codes steht die Publikation »Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045« als PDF zum Download zur Verfügung.

Kurzfassung



Langfassung



Factsheets



Englische Fassung

