



Stiftung
Klimaneutralität



Souveränität Deutschlands sichern

Resiliente Lieferketten für die
Transformation zur Klimaneutralität 2045

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 Wünsch, Marco Wünsch, 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.

PROJEKTLÉITUNG

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

Marco Wünsch | 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 - Langfassung

Souveränität Deutschlands sichern

Resiliente Lieferketten
für die Transformation zur
Klimaneutralität 2045

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

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.

ABB./ES. 01 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.

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 intensivierte 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.

TAB./ES. 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

1. Motivation, Ziele und Methodik	11	6. Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz	98
2. Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität 2045	15	6.1. Photovoltaik	100
3. Risiken entlang der Lieferkette und Priorisierung von Schlüsseltechnologien	23	6.2. Windkraft	104
4. Zubaupfade von Schlüsseltechnologien in Deutschland bis 2045	29	6.3. Lithium-Ionen-Batterien	107
4.1. Photovoltaik	30	6.4. Permanentmagnete	114
4.2. Windkraft	32	6.5. Elektrolyseure	120
4.3. Batterien für Elektromobilität	34	6.6. Wärmepumpen	127
4.4. Permanentmagnete für Elektromobilität	39	6.7. Stahl	129
4.5. Elektrolyseure und Wasserstoffinfrastruktur	43	6.8. Zusammenfassung	131
4.6. Wärmepumpen	47	7. Politische Empfehlungen	135
4.7. Stahl	48		
5. Kritische Lieferketten	51		
5.1. Photovoltaik	52		
5.2. Windkraft	59		
5.3. Lithium-Ionen-Batterien	62		
5.4. Permanentmagnete	71		
5.5. Elektrolyseure	77		
5.6. Wärmepumpen	85		
5.7. Stahl	88		
5.8. Zusammenfassung	92		

Impressum Umschlagseite 2

Vorwort 05

Executive Summary 06

Anhang 139

Anlage A – Technische Details 140

Anlage B – Weitere Technologien 144

Literaturverzeichnis 155

1. Motivation, Ziele und Methodik



Deutschland hat den Weg zur Klimaneutralität im Jahr 2045 eingeschlagen. Damit transformieren sich ganze Industriezweige und ihre Lieferketten – von der Rohstoffgewinnung bis zum Solarmodul oder zum Elektrofahrzeug. Resiliente Lieferketten gewinnen nicht nur für eine erfolgreiche Transformation an Bedeutung, sondern auch für die Sicherung der politischen Souveränität. Der Überfall Russlands auf die Ukraine hat nicht nur eine Zeitenwende in der Außen- und Energiepolitik eingeläutet. Er hat auch aufgezeigt, welche volkswirtschaftlichen Gefahren eine zu starke Abhängigkeit bzw. unzureichende Diversifizierung von Energieimporten, Rohstoffen und strategischen Gütern bedeuten. Die weltweit gestörten Lieferketten aufgrund der Corona-Maßnahmen in China bestätigen diese Risikoeinschätzung.

Neben den Unternehmen kommt gerade der Politik wesentliche Verantwortung zu, die unterstützenden Rahmenbedingungen für den beschleunigten Aufbau der Zukunftsindustrien und resilienter Lieferketten für die Schlüsseltechnologien der Transformation und damit zukünftigen Wohlstands zu definieren.

Für die Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland bis zum Jahr 2045 sind in vielen Bereichen immense Investitionen in neue Technologien für diese umfassende Transformation notwendig. Vor dem Hintergrund der aktuellen geopolitischen Ereignisse soll im Rahmen dieser Studie aufgezeigt werden, wo heute oder in absehbarer Zukunft Abhängigkeiten vom Ausland bei der Versorgung mit Rohstoffen, Komponenten und strategischen Gütern sind und inwiefern diese kritisch für das Gelingen der Klimaneutralität 2045 sein könnten. Die Studie soll herausarbeiten, mit welchen Maßnahmen die größten Abhängigkeiten verringert und die Resilienz substanziell erhöht werden kann.

Der am 16. März 2023 von der Europäischen Kommission veröffentlichte Vorschlag zum «European Critical Raw Materials Act» (KOM, 2023a) verdeutlicht die Dringlichkeit und Relevanz der Auseinandersetzung mit den kritischen Rohstoffen und strategischen Gütern für das Gelingen der Klimaneutralität in Deutschland. Die Europäische Union (EU) unterstreicht mit diesem Vorgehen, sich strategisch entlang der verschiedenen Stufen der Lieferkette (von der Gewinnung bis zum Recycling) mit Projekten und Initiativen einen möglichst sicheren und nachhaltigen Zugang zu den notwendigen Rohstoffen zu sichern. Da die Implikationen für die deutsche Klimapolitik erheblich sein werden, unterstreicht diese aktuelle Aktivität der EU die Brisanz und Aktualität der in dieser Studie behandelten Fragestellung.

Die vorliegende Studie basiert auf der Grundlagenstudie «Klimaneutrales Deutschland 2045» – KNDE2045 (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021) und setzt auf die dort intensiv behandelten Sektoren wie Gebäude, Verkehr, Energie etc. und den für die Transformation dieser Sektoren relevanten Technologien auf. Die Grundannahmen der Vorgängerstudie wurden beibehalten und nur, wo sich aktuel-

le Entwicklungen ergeben hatten (z. B. im Sektor Verkehr durch die Ziele des Koalitionsvertrags der neuen Bundesregierung im Herbst 2021), wurden Details der zugrundeliegenden Annahmen und Ausgangspunkte angepasst und aktualisiert. Es wird aber auch deutlich, dass eine resilienzorienteerte Politik sich nicht nur auf Rohstoffe fokussieren, sondern auch strategische Güter und Komponenten in den Blick nehmen sollte.

Das Kernziel «Klimaneutrales Deutschland 2045» gilt unverändert. Die vorliegende Studie 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 Fünfjahresschritten – von 2020 bis 2045 – gegenüber. Kennzeichnend ist die Herausforderung, die Transformation in Richtung Klimaneutralität 2045 zu bringen und abzusichern. Daher ist die mittelfristige Zeitperspektive (von heute bis 2030/2035) essenziell. Der Weg zu einem klimaneutralen Deutschland 2045 wird nur gelingen, wenn in den 20er Jahren des 21. Jahrhunderts die zentralen Hindernisse und Engpässe auf Seite der strategischen Lieferketten erkannt und diese durch Maßnahmen angemessen adressiert werden. Diese Studie hat den Anspruch zu dieser zeitkritischen Zielsetzung einen substanziellen Beitrag zu leisten und entsprechende Strategien und Maßnahmen sowie Initiativen anzustoßen.

Methodik

Die quantitative Grundlage für die Studie ist das Szenario «Klimaneutrales Deutschland 2045». Hier wurde für alle Sektoren in einer integrierten Modellierung aufgezeigt, mit welchen konkreten technischen Maßnahmen die Treibhausemissionen bis zum Jahr 2030 um 65 Prozent im Vergleich zu 1990 gesenkt werden können und wie bis zum Jahr 2045 das Energiesystem klimaneutral werden kann. Auf Basis dieses Szenarios wurden in der vorliegenden Studie im ersten Schritt rund 30 Transformationstechnologien identifiziert, die für den Dekarbonisierungspfad von besonderer Bedeutung sind. Es wurde berechnet, welcher konkrete Zubau im Zeitverlauf notwendig ist, um den notwendigen Bestand aufzubauen. Im zweiten Schritt wurde für die einzelnen Technologien in einem ersten Screening die Lieferketten auf mögliche kritische Aspekte bei den einzelnen Wertschöpfungsschritten gefiltert. Bei den Rohstoffen wurde auf jene fokussiert, die von der Europäischen Kommission im Rahmen der CRM-Liste (Critical Raw Material) als kritisch eingestuft wurden. Die Ergebnisse wurden mit Fachexperten diskutiert.

Es ist ein zentrales Anliegen dieser Studie, einen fokussierten Handlungsplan für jene Technologien zu erarbeiten, die eine besonders hohe strategische Bedeutung haben und gleichzeitig eine hohe Kritikalität aufweisen. Bei der Risikobewertung ist vor allem die Zeitkomponente entscheidend: Ein möglicher Engpass bis zum Jahr 2030 erfordert schnelleres Handeln im Gegensatz zu Versorgungsrisiken, die erst ab 2040 relevant werden können und ist folglich als kritischer einzustufen.

Die in dieser Studie betrachteten sieben Schlüsseltechnologien und -komponenten zeichnen sich dadurch aus, dass sie vor allem kurz- bis mittelfristig eine besonders hohe Treibhausgaseinsparung ermöglichen, einen steilen Hochlaufpfad aufweisen, kurzfristig kaum Alternativen haben und eine hohe Angebotskonzentration bei Rohstoffen, Komponenten oder sogar der Produktion ganzer Güter aufweisen:

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

Im vierten Schritt wurden die Lieferketten dieser Schlüsseltechnologien detailliert untersucht. Hierbei wurde für die einzelnen Technologien die gesamten Schritte der Lieferketten – von der Rohstoffproduktion und -verarbeitung, bis zur Produktion von (Teil-)Komponenten und fertigen Gütern – auf kritische Versorgungsengpässe hin untersucht. Darüber hinaus wurde der Bedarf an kritischen Rohstoffen im Zeitverlauf quantifiziert. Im letzten Schritt wurden für die konkreten Herausforderungen politische Handlungsempfehlungen erarbeitet. Die Ergebnisse zu den übrigen Transformationstechnologien werden im Anhang dargestellt.

Die vorliegende Studie ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden über die einzelnen Sektoren die wesentlichen Technologien und Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen erläutert. Kapitel 3 gibt eine Einführung zu Kritikalität bei Klimaschutztechnologien entlang der Lieferketten und priorisiert die sieben relevanten Schlüsseltechnologien. In Kapitel 4 wird dargestellt, wie der konkrete jährliche Ausbaupfad für die Schlüsseltechnologien bis zum Jahr 2045 aussieht. Da bei den einzelnen Schlüsseltechnologien teilweise unterschiedliche Technologieausprägungen möglich sind – bei der Wasserelektrolyse gibt es beispielsweise neben der alkalischen Elektrolyse drei weitere zentrale Technologieausprägungen – werden die Vor- und Nachteile erklärt und dargestellt, wie hoch der angenommene Anteil jeder Technologieausprägung jedes Jahr ist. Im darauffolgenden Kapitel 5 werden dann die Lieferketten beleuchtet und Versorgungsrisiken abgestuft nach «sehr kritisch», «mittel kritisch», «mäßig kritisch» und «nicht kritisch» qualifiziert¹. Der Bedarf an den identifizierten kritischen Rohstoffen wird jeweils in fünf Jahresschritten bis zum Jahr 2045 quantifiziert. Kapitel 6 zeigt dann, welche angebots- und nachfrageseitigen Maßnahmen ergriffen werden können, um diese Risiken zu reduzieren. Hierbei werden auch Drittländer als Diversifizierungsoptionen für kritische Rohstoffe und Komponenten identifiziert. In Kapitel 7 werden konkrete Strategien und politische Instrumente zur Umsetzung der technischen Maßnahmen empfohlen.

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.

Bei der Risikobewertung ist vor allem die Zeitkomponente entscheidend: Ein möglicher Engpass bis zum Jahr 2030 erfordert schnelleres Handeln.

2. Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität 2045



Szenario «Klimaneutrales Deutschland 2045» («KNDE2045») als Basis dieser Studie

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu werden. Zudem sollen im Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um 65 Prozent im Vergleich zu 1990 gesenkt werden. Die Dekarbonisierung des Energiesystems ist eine der größten industriepolitischen Herausforderungen für die nächsten Jahre. Wie diese Transformation gelingt, wurde in den letzten beiden Jahren in verschiedenen Studien umfangreich untersucht. Eine der ersten Studien zu diesem Thema ist die im Jahr 2021 erschienene Studie «Klimaneutrales Deutschland 2045» (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2021). Die Transformation des deutschen Energiesystems basiert im Wesentlichen auf den folgenden Säulen: Ausbau erneuerbarer Energien, Energieeffizienz, umfangreiche Elektrifizierung des Gebäude- und Verkehrssektors und Einsatz von Wasserstoff in den Bereichen, in denen keine Elektrifizierung möglich ist. Auch die danach publizierten Studien, wie die «Klimapfade 2.0» (BDI, 2021) für den Bundesverband der Deutschen Industrie oder die «Langfristszenarien» (Fraunhofer ISI et al., 2022) für das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) zeigen ähnliche Transformationspfade auf.

Fokussiertes Update des Szenarios

Seit der Publikation der Studie «Klimaneutrales Deutschland 2045» (KNDE2045) im Juni 2021 wurden wichtige energiepolitische Weichen für die nächsten Jahre gestellt, die das klimapolitische Zielbild für die nächsten Jahre weiter konkretisieren und teilweise auch beschleunigen:

Nach dem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts vom 29. April 2021 wurde von der damaligen schwarz-roten Regierung das Klimaschutzgesetz (KSG) novelliert, welches dann im August 2021 in Kraft trat. Dieses hat das Zieljahr für die Erreichung der Klimaneutralität auf das Jahr 2045 vorgezogen und das Minderungsziel für Treibhausgase im Jahr 2030 um zehn Prozentpunkte

auf 65 Prozent angehoben. Zudem wurden für die einzelnen Sektoren konkrete Minderungspfade bis 2030 festgelegt. Die Ziele zur Senkung der Treibhausgasemissionen wurden auch im Koalitionsvertrag 2021-2025 der im Herbst 2021 neu gewählten Regierung bekräftigt. Zudem setzt sich der Koalitionsvertrag das Ziel, im Jahr 2030 mindestens 15 Millionen vollelektrische Pkw auf den Strassen in Deutschland zu haben. Beim Ausbau erneuerbarer Energien wurde das Ziel gesetzt, im Jahr 2030 mindestens 80 Prozent des Strombedarfs in Höhe von 680 bis 750 TWh mit erneuerbaren Energien zu decken. Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023 wurden diese Ziele mit Maßnahmen konkretisiert und die Ausbauziele für regenerative Energien deutlich angehoben. Diese neuen Ziele wurden in der Studie übernommen.

Zudem zeichnen sich neue Trends in den einzelnen Sektoren ab, wie z.B. der deutlich stärkere Ausbau bei Photovoltaik und Wärmepumpen aufgrund der Energiekostenkrise 2022. Deshalb wurde punktuell für einzelne wichtige Schlüsseltechnologien Updates vorgenommen, um die aktuellen Entwicklungen widerzuspiegeln. Es wurde jedoch weder ein neues Energiesystem-Szenario modelliert noch eine integrierte Betrachtung über alle Energieträger und Sektoren vorgenommen.

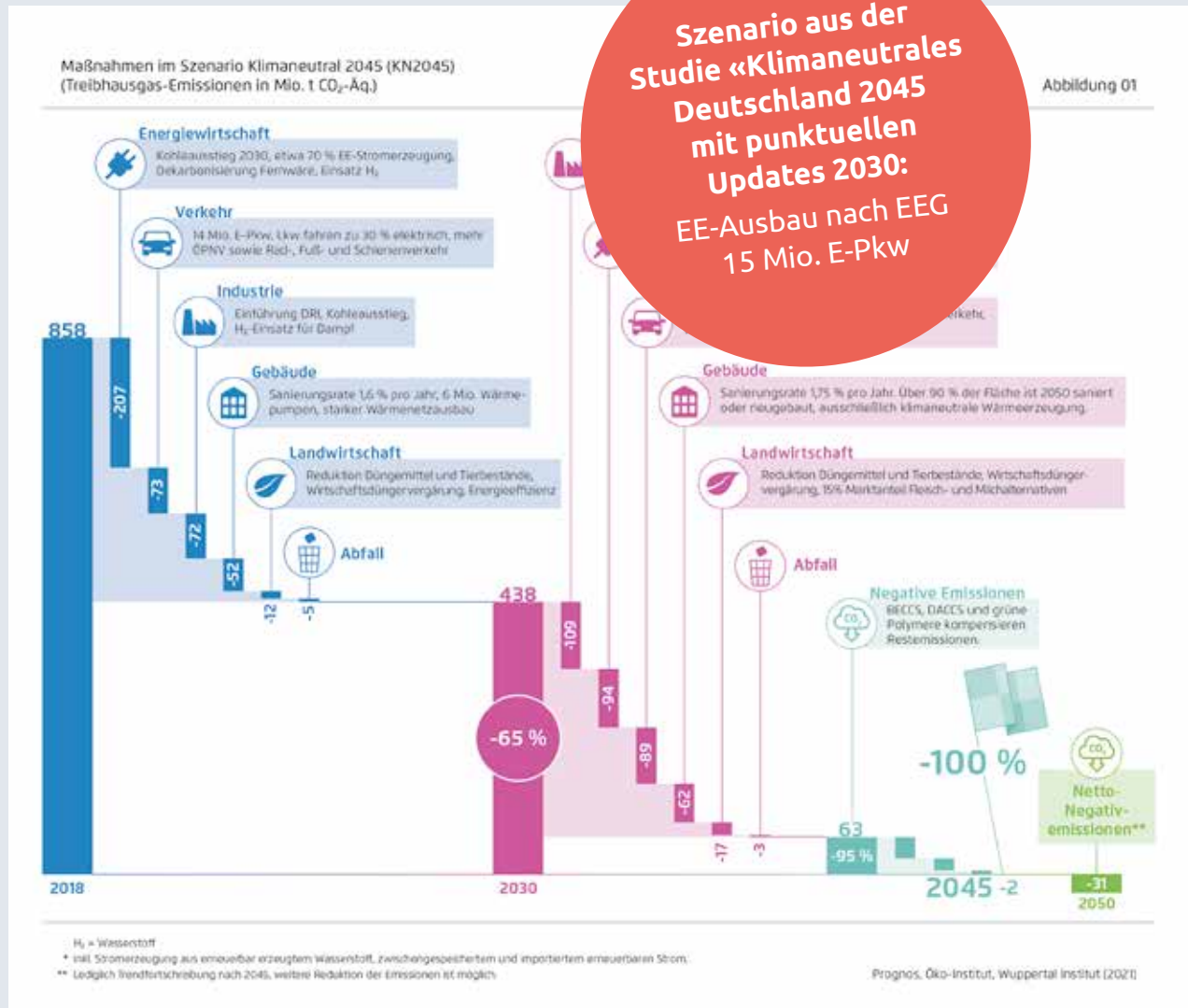
Nachfolgend wird skizziert, welche Herausforderungen in den Sektoren bestehen und welche Technologien und technische Maßnahmen notwendig sind, um die Klimaziele zu erreichen – und welche Transformationstechnologien von herausragendem, strategischem Interesse sind und damit besonders im Fokus der Studien stehen. Aus Gründen der Versorgungssicherheit ist dabei insbesondere der kurz- bis mittelfristige Hochlaufpfad der Technologien bis 2030 und 2035 von besonderem Interesse, da aufgrund der knappen Zeit besonders schnell politisch gehandelt werden sollte.

Das hier aufgezeigte Szenario ist der Ausgangspunkt für die Priorisierung strategischer Schlüsseltechnologien und Komponenten in Kapitel 3 sowie der Quantifizierung der kritischen Rohstoffe für die Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems in Kapitel 4.

ABB. 01 Klimaneutralität im Szenario

«Klimaneutrales Deutschland 2045 (KNDE2045)»

Der schnelle Ausbau erneuerbarer Energien, Elektromobilität und Wärmepumpen sowie die Produktion von grünem Wasserstoff mit Wasserelektrolysen sind von zentraler Bedeutung zur Erreichung der Klimaschutzziele.



QUELLE Eigene Darstellung auf Basis der Studie «Klimaneutrales Deutschland 2045» (KNDE2045). Das Mengengerüst basiert auf der Studie KNDE2045, wobei punktuell bei einigen Technologien Aktualisierungen vorgenommen wurden.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021); Klimaneutrales Deutschland 2045

Energiewirtschaft

Die Energiewirtschaft ist mit 256 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 2022 weiterhin der Sektor mit den höchsten Emissionen. Um das Ziel des Klimaschutzgesetzes (KSG) von 108 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 2030 zu erreichen, ist neben dem

Auslaufen der Kohleverstromung vor allem ein starker Ausbau von Windkraft und Photovoltaik notwendig. Das hier unterstellte Mengengerüst basiert auf dem EEG 2023 und sieht bis zum Jahr 2030 eine Leistung von 215 GW Photovoltaik, 115 GW Windkraft Onshore und 30 GW Windkraft Offshore vor. Bioenergiekraftwerke auf Basis von fester oder gasförmiger Biomasse unterstüt-

2. Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität 2045

zen als regelbare Kraftwerksleistung den Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage.

Der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien bis zum Jahr der Klimaneutralität 2045 entspricht weitgehend dem EEG 2023. Bei Photovoltaik wurde davon abweichend die installierte Leistung ab 2040 nicht konstant gehalten, sondern ein stabiler Zubau von 20 GW fortgesetzt, da bei Dachanlagen und Photovoltaik-Freifläche im Gegensatz zu Windkraft noch weiteres Ausbaupotenzial besteht. Im Jahr 2045 sind dann insgesamt 480 GW Photovoltaik, 160 GW Wind Onshore und 70 GW Windkraftwerke Offshore installiert. Insgesamt erzeugen die erneuerbaren Energien im Jahr knapp 1.100 TWh Strom, der dann für die Elektrifizierung der Nachfragesektoren und der Herstellung von grünem Wasserstoff genutzt wird. Dem Ausbau von Photovoltaik (PV) sowie Windkraft an Land und auf See fällt damit eine ganz entscheidende Schlüsselrolle in der Dekarbonisierung der deutschen Volkswirtschaft zu und steht deshalb besonders im Fokus dieser Studie.

Um zu jedem Zeitpunkt die Stromnachfrage decken zu können, sind zudem Flexibilitätsoptionen notwendig. Neben Gaskraftwerken, die bereits ab 2030 die ersten Mengen an Wasserstoff einsetzen und vor allem längere Dunkelflauten überbrücken, können Batteriespeicher untertägige Schwankungen der erneuerbaren Energien ausgleichen. Zusätzliche Potenziale entstehen durch Nachfrageverschiebungen – insbesondere beim systemdienlichen Laden von Elektrofahrzeugen oder Wärmepumpen in den wärmeren Monaten. Über direktionales Laden und Entladen können die Batterien in den Fahrzeugen auch als direkter Stromspeicher eingesetzt werden. Darüber hinaus können über grenzüberschreitenden Stromhandel Ungleichzeitigen bei der Stromnachfrage oder der erneuerbaren Stromerzeugung bei Nachbarländern genutzt werden.

Um den Strom von den Erzeugungs- zu den Nachfragezentren transportieren und verteilen zu können, müssen sowohl die Übertragungs- als auch die Verteilnetze ausgebaut werden. Lokale und intelligent gesteuerte Heimspeicher in Zusammenhang mit Dach-PV-Anlagen können hier unterstützend wirken.

Für die Dekarbonisierung der Fernwärme stehen im Vergleich zum Stromsektor eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung, die unterschiedliche Eigenschaften haben. Welche Technologien als Grundlastwärme und welche zur Abdeckung von Mittel- und Spitzenlast genutzt werden können, hängt neben den Wärmeprofilen vor allem von den spezifischen Voraussetzungen in den rund 800 Wärmenetzen in Deutschland ab. Geothermie, Abwärme aus Industrie und Müllverbrennung eignen sich zur Deckung der Wärmegrundlast. Stehen ausreichend Flächen für Solarthermie zur Verfügung, kann ein Großteil der Sommer- und Übergangsmonate abgedeckt werden. Flüsse oder Seen sorgen über das ganze Jahr hinweg für vergleichsweise stabile Ausgangstemperaturen, die über den Einsatz von Großwärmepumpen energetisch genutzt werden können. In Zeiten hoher erneuerbarer Stromerzeugung können darüber hinaus Elektro- und Elektrodenkessel überschüssigen Strom in Wärme umwandeln. Zur Abdeckung der Mittellast können wasserstoffbetriebene KWK-Anlagen eingesetzt werden. Müssen nur einzelne Verbrauchsspitzen zusätzlich bedient werden, können wasserstoffbetriebene Heizkessel eingesetzt werden. Ergänzend dazu sorgen Wärmespeicher für den kurz- und mittelfristigen Ausgleich zwischen Wärmenachfrage und -angebot.

Darüber hinaus muss von der Energiewirtschaft grüner Wasserstoff mit Hilfe von Wasserelektrolyseuren bereitgestellt werden. Da die Potenziale für grünen Strom und damit für inländisch erzeugten Wasserstoff begrenzt sind, wird rund zwei Drittel des Bedarfs aus dem Ausland importiert werden.

Je nachdem, ob natürliche Senken aus Wäldern und Mooren bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen angerechnet werden, sind ggf. auch Negativemissionen notwendig für die vollständige Dekarbonisierung. Neben Biomasse-CCS in der Energiewirtschaft oder Industrie kann auch das CO₂ direkt aus der Luft entnommen werden (Direct Air Capture – DAC). In dem hier unterstellten Szenario «Klimaneutrales Deutschland 2045» – «KNDE2045» – kommt diese Technologie aber erst in den 2040er Jahren in großtechnischem Maßstab zur Anwendung.

Verkehr

Der Verkehrssektor war im Jahr 2019 mit 164 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten für rund 20 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Im Vergleich zu 1990 sind die Emissionen damit sogar leicht gestiegen. Nach Klimaschutzgesetz (KSG) dürfen im Verkehrssektor im Jahr 2030 nur noch 84 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente anfallen. Das entspricht knapp der Hälfte der heutigen Emissionen. Dem motorisierten Individualverkehr kommt mit ca. 60 bis 65 Prozent der Treibhausgasemissionen davon ein besonderes Gewicht zu (Öko-Institut et al., 2022).

Um dieses Ziel zu erreichen ist vor allem der Ausbau der Elektromobilität von überragender Bedeutung. Das hier hinterlegte Szenario geht davon aus, dass im Jahr 2030 insgesamt 15 Millionen E-Pkw (BEV – Battery Electric Vehicle) im Bestand auf Deutschlands Straßen fahren (KoaV, 2021). Ab 2035 werden dann nur noch vollelektrische Antriebe neuzugelassen (Council of the European Union, 2023a). Neben der Elektrifizierung beinhaltet das Szenario «KNDE2045» eine deutliche Verlagerung im Personenverkehr auf klimaschonende Verkehrsmittel – dieses führt zu einer Verdoppelung des Schienenverkehrs bis 2045 (KoaV, 2021). Als Folge sinkt der Pkw-Bestand in Deutschland von derzeit rund 50 auf rund 40 Millionen Pkw im Jahr 2045.

Für den Güterverkehr wurde analog zu den Annahmen des Szenarios «KNDE2045» unterstellt, dass ein Drittel der Fahrleistung bis 2030 elektrisch ist (Hartman, R. et al., 2019). Des Weiteren wurden nach dem Vorschlag der Europäischen Kommission die THG-Emissionen bei der schweren Nutzfahrzeug-Flotte in der EU ab 2030 um mindestens 45 Prozent, bzw. ab 2035 und 2040 um 65 bzw. 90 Prozent gesenkt (KOM, 2023b). Außerdem wurde die Vereinbarung der Bundesregierung zur Steigerung des Schienengüterverkehrs auf 25 Prozent bis 2030 berücksichtigt (KoaV, 2021).

Die Klimaschutzziele im Verkehr sind neben der beschriebenen Verlagerung des Modal Split im Personen- wie im Güterverkehr auf die Schiene nur durch einen sehr steilen Hochlauf der Elektrifizierung aller Straßenfahrzeuge (Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, schwere Nutz-

fahrzeuge etc.) bis 2030/2035 zu erreichen. Dies bedingt einen steilen Hochlauf bei den Neuzulassungen batterieelektrischer Fahrzeuge mit entsprechenden Auswirkungen auf die entsprechenden Lieferketten; die gesamte Angebotsseite muss hier in den nächsten zehn bis zwölf Jahren mit einem massiven Nachfragezuwachs Schritt halten.

Industrie

Der Sektor Industrie emittierte im Jahr 2022 164 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, ein Fünftel der deutschen Gesamtemissionen. In den im Hinblick auf die Produktionsaktivität in Deutschland typischeren Vorjahren 2021 und 2019 lag das Emissionsniveau bei etwas über 180 Millionen Tonnen. Für eine Zielerreichung gemäß dem Klimaschutzgesetz muss eine Absenkung des Niveaus auf 119 Millionen Tonnen bis 2030 erreicht werden, das entspricht je nach Referenzjahr einer Minderung um 27 bis 35 Prozent.

Im Sektor Industrie sind gemäß der Definition im Klimaschutzgesetz sowohl die energiebedingten Emissionen aus der Verbrennung von Energieträgern durch Industriebetriebe enthalten als auch die so genannten prozessbedingten Emissionen. Letztere wiederum enthalten auch Emissionen, die nicht mit Produktionsprozessen verbunden sind, sondern erst in der Nutzungsphase von Produkten entstehen.

Für eine schnelle Absenkung des Emissionsniveaus sind vor allem die großen Einzelemittenten relevant: die Stahlhütten und die großen Chemieparks. Um im Stahlsektor schnell Emissionsreduktionen zu erzielen, müssen zuvorderst die Hochöfen ersetzt werden, die große Mengen Koks-kohle verwenden, um Eisenerz zu Eisen zu reduzieren, wobei CO₂ entsteht. Das Szenario «KNDE2045» welche Basis für diese Studie ist, sieht, wie auch die Pläne der Industrie selbst, einen Ersatz von Hochöfen durch DRI-Schachtöfen (Direktreduktion) und Elektrostahlwerke vor, wobei die Schachtöfen sowohl Methan als auch reinen Wasserstoff verwenden können, um Erz zu reduzieren.

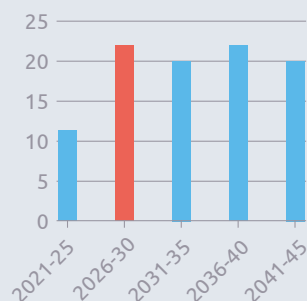
ABB. 02 Notwendiger Zubau der einzelnen Transformationstechnologien im Zeitverlauf bis 2045

Ein schneller Zubau bis 2030 ist vor allem erforderlich bei den Schlüsseltechnologien Photovoltaik, Windenergie, Wärmepumpen, E-Pkw (batterieelektrisch BEV) und DRI-Schachtöfen zur Produktion von Stahl.

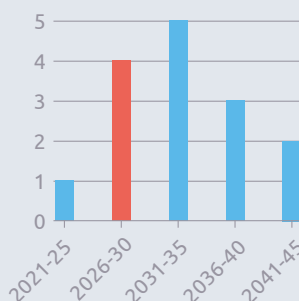
A. Energiewirtschaft *

Bei Photovoltaik und Windkraft an Land und auf See werden bis 2030 jährlich 2- bis 4-Mal mehr Anlagen zugebaut als in der jüngsten Vergangenheit.

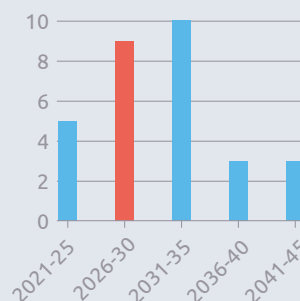
Photovoltaik (GW/a)



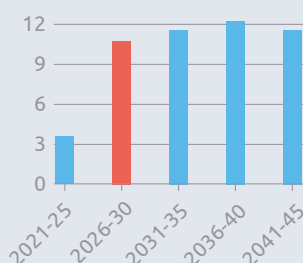
Wind Offshore (GW/a)



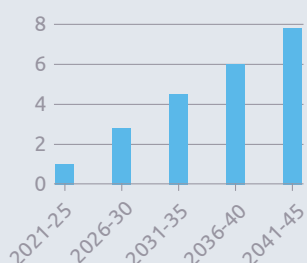
Wind Onshore (GW/a)



Heimspeicher (GWh/a)



Großspeicher (GWh/a)

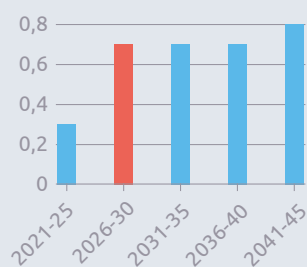


* Zusätzlich werden im Stromsektor Ersatzinvestitionen in Bioenergieanlagen (Biogas und feste Biomasse) benötigt. Bis 2028 werden in Summe 2,4 GW ausgeschrieben, um Stilllegungen von Bestandsanlagen teilweise zu kompensieren. Leistungsziel 2030 sind 8,4 GW (2022: 9 GW). Zur Leistungsabsicherung werden zudem Gaskraftwerke benötigt, die Wasserstoff einsetzen können. Dazu erarbeitet das BMWK derzeit eine Kraftwerksstrategie. Darüber hinaus werden Biomethanaufbereitungsanlagen benötigt sowie zusätzlich in der Fernwärme Solathermieanlagen, Heizkessel, Großwärmepumpen, Geothermieanlagen, E-Kessel und Speicher.

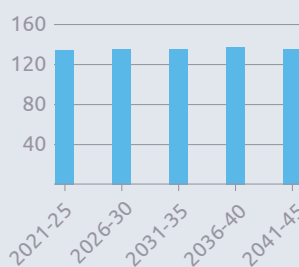
B. Gebäude

Starke Zunahme bei Neuinstallation von Wärmepumpen von 2025 bis 2030 auf im Mittel rund 700.000 Stück pro Jahr. Das entspricht ungefähr dem heutigen Absatz von Gasthermen. In 2022 lag der Bruttuzubau bei rund 240.000 Stück.

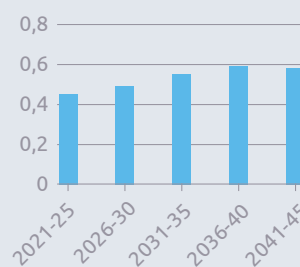
Wärmepumpen (Mio./a)



LED (Mio./a)



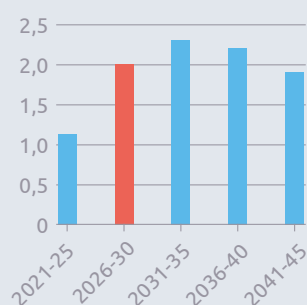
Wärmedämmung (Mio. m³/a)



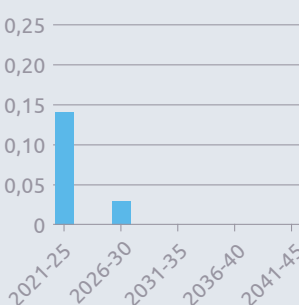
C. Verkehr

Bis 2030 gibt es vor allem einen starken Anstieg in den Neuzulassungen von batterieelektrischen Pkw (BEV) und bei leichten und schweren Nutzfahrzeugen (LNF und SNF – BEV).

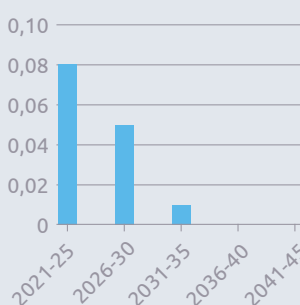
PKW BEV (Mio./a)



PKW PHEV (Mio./a)

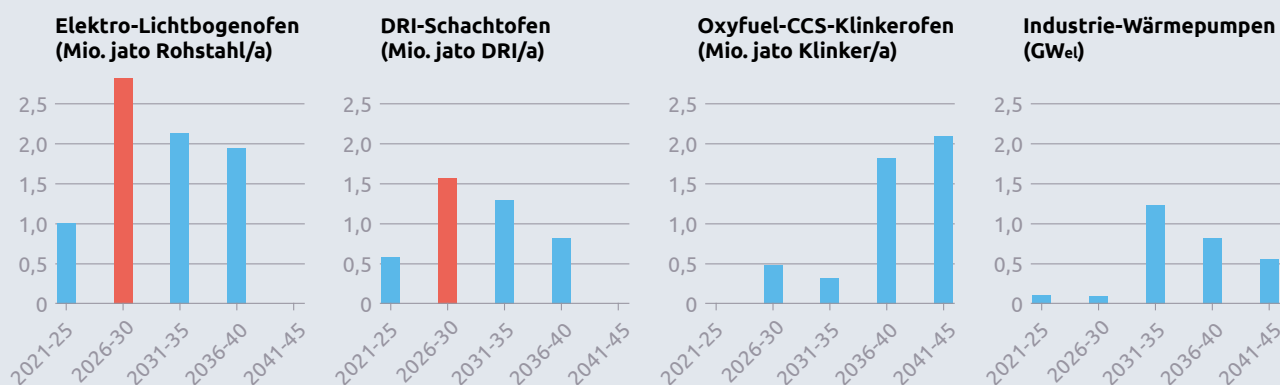


PKW Voll-HEV (Mio./a)



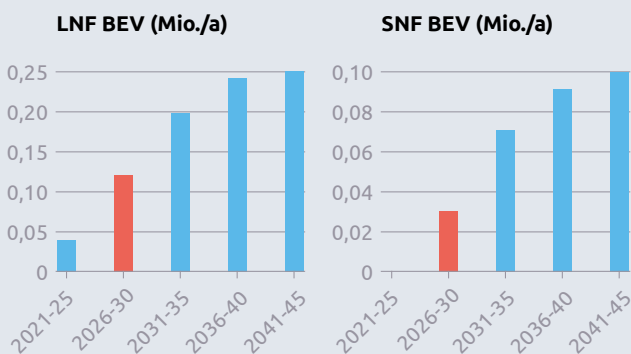
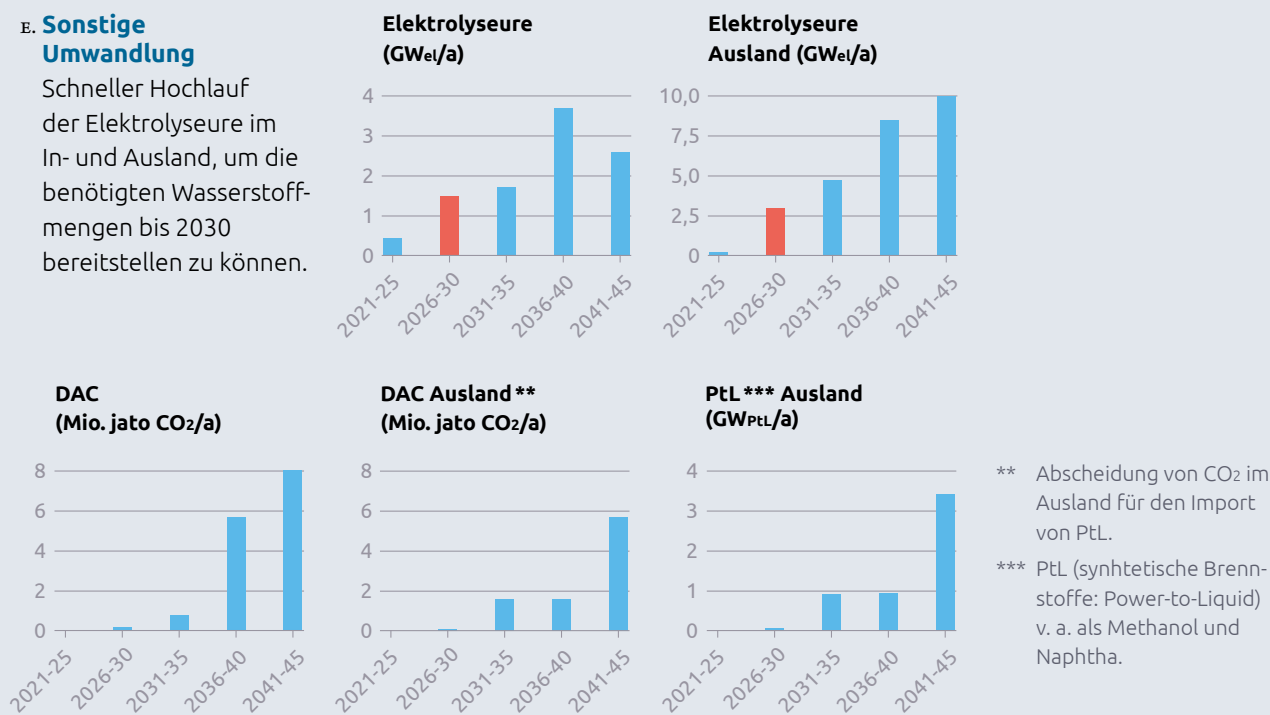
D. Industrie

Schneller Hochlauf bis 2030 vor allem bei der Dekarbonisierung von Stahl mit Hilfe von DRI-Schachtöfen (Direktreduktion) und Elektrolichtbogenöfen (EAF).



E. Sonstige Umwandlung

Schneller Hochlauf der Elektrolyseure im In- und Ausland, um die benötigten Wasserstoffmengen bis 2030 bereitstellen zu können.



QUELLE Eigene Darstellung auf Basis der Studie KNDE2045 und eigenen Berechnungen

ABKÜRZUNGEN BEV: Batterieelektrische Fahrzeuge; PHEV: Plug-In-Hybrid; Voll-HEV: Vollhybrid; LNF: Leichte Nutzfahrzeuge, SNF: Schwere Nutzfahrzeuge; CCS: Carbon Capture and Storage; DAC: Direct Air Capture (CO₂-Abscheidung aus der Luft); PtL: Power2Liquids (synthetisch erstellte, flüssige Brennstoffe); jato: Jahrestonnen

2. Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität 2045

In der chemischen Industrie bildet der Ersatz von Erdgas in der Dampferzeugung und ein damit verbundener stromsystemdienlicher Betrieb der KWK-Anlagen den größten schnell wirkenden Hebel, um das Emissionsniveau spürbar zu senken. Dies kann gelingen durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen (bis etwa 180°C) und für das darüber liegende Temperaturniveau bis 500°C bieten die weniger effizienten Elektrodenkessel eine Lösung, sofern auch sie stromsystemdienlich eingesetzt werden, d. h. nur in Zeiten hoher Einspeisung erneuerbarer Energien bzw. niedriger Strompreise. Das notwendige Backup kann mit Kuppelprodukten aus der chemischen Produktion sowie weiterhin mit Erdgas betrieben werden, wobei vor allem Letzteres auch durch Wasserstoff ersetzt werden kann.

Sobald die infrastrukturellen Möglichkeiten für einen CO₂-Abtransport und eine Einspeicherung gegeben sind, gerät auch die mineralische Industrie, und hier insbesondere die Zementindustrie, in den Fokus, wo Investitionen in neue Klinkeröfen bzw. Retrofits notwendig wären, um auch die prozessbedingten Emissionen zu adressieren. In der Breite wäre dies gemäß dem «KNDE2045»-Szenario erst nach 2030 der Fall. Durch eine Beschleunigung des Aufbaus von CO₂-Netzen im Rahmen der Umsetzung der derzeit erarbeiteten Carbon Management-Strategie des Bundes könnte der Investitionszyklus jedoch auch schneller durchlaufen werden.

Gebäude

Der Gebäudesektor war im Jahr 2022 mit 112 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten für 15 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) dürfen im Gebäudesektor im Jahr 2030 nur noch 67 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente anfallen, dies entspricht einer notwendigen Reduktion um rund 40 Prozent im Vergleich zu heute.

Die THG-Emissionen im Gebäudesektor entstehen überwiegend bei der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser. Prozesswärme und mechanische Energie sind von untergeordneter Bedeutung. Die Dekarboni-

sierung der Wärmeerzeugung und die Reduktion des Wärmebedarfs sind deshalb die Haupthebel für das Erreichen eines klimaneutralen Gebäudebestands.

Für die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung ist neben einer Ausweitung der Fern- und Nahwärmeversorgung vor allem der zügige Ausbau von Wärmepumpen von heute einer Million auf etwa sechs Millionen bis 2030 eine der wichtigsten Maßnahmen.² Hierfür muss die Anzahl der jährlich eingebauten Wärmepumpen von rund 200.000 Stück im Jahr 2022 auf etwa 700.000 Stück erhöht werden.

Das kommende Gebäudeenergiegesetz (GEG) lässt voraussichtlich mehr Spielraum und Zeit für den Ersatz von fossil gefeuerten Heizungen als die ursprünglichen Pläne. Damit hängt die Erreichung des Ausbauziels der Wärmepumpen stärker von der Entwicklung von anderen Instrumenten wie z. B. der CO₂-Bepreisung ab.

Zur Erreichung der Klimaneutralität werden im Jahr 2045 insgesamt 14 bis 16 Millionen Wärmepumpen installiert sein. Eine zweite zentrale Maßnahme ist der Ausbau und die Dekarbonisierung von Nah- und Fernwärmenetzen. Holzheizungen spielen aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse eine untergeordnete Rolle.

Für die Reduktion des Wärmebedarfs in den Gebäuden ist eine Stärkung der Energieeffizienz notwendig: Neubauten mit geringem Wärmebedarf, mehr energetische Sanierungen im Gebäudebestand sowie der Einsatz effizienter Elektrogeräte und Beleuchtung. Im Szenario «KNDE2045» erhöht sich die jährlich sanierte Gebäudelfläche bis zum Jahr 2030 um über 50 Prozent im Vergleich zum Zeitraum 2015 bis 2020. Dadurch steigt die Nachfrage nach Dämmmaterialien bis zum Jahr 2030 markant an und bleibt nach 2030 auf diesem erhöhten Niveau. Für die Beleuchtung werden im Szenario mittel- und langfristig nur noch Lampen mit LED-Technologie eingesetzt. Der Absatz an LED-Lampen und Leuchten nimmt weiter zu.

² Angereizt werden soll der beschleunigte Zubau insbesondere durch die Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) mit einem Mindestanteil an erneuerbaren Energien von 65 Prozent bei neu eingebauten Heizungen sowie durch die attraktive Förderung im Rahmen der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG).

3. Risiken entlang der Lieferkette und Priorisierung von Schlüsseltechnologien



3. Risiken entlang der Lieferkette und Priorisierung von Schlüsseltechnologien

Risikofaktoren für die Sicherung der Versorgungssicherheit

Ob Rohstoffe, Komponenten und Güter, die zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendig sind, als kritisch einzustufen sind, ist von zwei Faktoren abhängig. Zum einen müssen sie eine hohe ökonomische Bedeutung haben (Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., et al., 2020). Zum anderen liegt eine Gefährdung der Versorgungssicherheit vor oder ist absehbar. Für die Transformation des Energiesystems liegt insbesondere bei den Technologien eine hohe wirtschaftliche Bedeutung vor, die zu einer hohen bzw. sehr hohen Einsparung von Treibhausgasemissionen führen.

Gründe für die Gefährdung der Versorgungssicherheit bei der Produktion oder Beschaffung von Rohstoffen, Komponenten oder strategisch wichtigen Gütern können Nachfrageüberhänge, Angebotskonzentrationen, politische Spannungen bis hin zu Kriegssituationen oder auch Naturkatastrophen in wichtigen Lieferländern und zunehmend auch Umwelt- und Sozialrisiken sein.

Nachfrageüberhang: Bei Technologien, die einen großen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen haben, ist oftmals ein besonders schneller Hochlauf der Technologien und der damit verbundenen Lieferketten innerhalb weniger Jahre notwendig. Diese Technologien sind zum Teil weitgehend ausgereift und haben oftmals bereits eine substanzielle Fertigungskapazität vorliegen, wie beispielsweise bei Photovoltaik und Windkraft. Aber es gibt auch Technologien, die erst jetzt auf ein industrielles Fertigungsniveau hochskaliert werden, wie z. B. die PEM-Elektrolyse. Kann das Angebot in kurzer Zeit nicht schnell genug ausgeweitet werden, liegt ein Nachfrageüberhang vor.

Für den schnellen Hochlauf bei allen Technologien ist die entscheidende Herausforderung, dass das Angebot über alle Wertschöpfungsstufen gleichzeitig auf- und ausgebaut werden muss. Zum Beispiel reicht es nicht aus, nur die Kapazitäten der Gigafactories für die Batteriezellproduktion kräftig aufzubauen, sondern es müssen gleichzeitig die Kapazitäten für die Produktion der vorgelagerten Komponenten, wie das Anoden- und

Kathodenmaterial entsprechend wachsen. Jede Lieferkette ist nur so resilient, wie ihr schwächstes Glied.

Gerade der Abbau von Rohstoffen, als erste Stufe der Lieferkette, kann sich zum Engpass entwickeln. Die Realisierungszeit für neue Minen beträgt in der Regel fünf bis 15 Jahre. Grund hierfür sind die aufwändigen Planungs- und Genehmigungsprozesse, der ungewisse Ausgang von Umweltverträglichkeitsprüfungen, die Einbindung der lokalen Nachbarschaft und nicht selten politische Unsicherheiten im jeweiligen Land durch Regierungswechsel. Vor allem ist der Bergbau sehr kapitalintensiv. Investitionen in derartige Projekte benötigen viel Risikokapital. Die stark schwankenden Rohstoffpreise sind eine zusätzliche besondere Herausforderung für die Finanzierung und damit auch kritisch für eine schnelle Umsetzung der Projekte. Das Risiko, dass ein Bergbauprojekt nicht zu Stande kommt, ist aufgrund der verschiedenen Unsicherheiten sehr groß.

Marktmacht und Angebotskonzentration: Viele Rohstoffe sind auf sehr wenige Länder konzentriert oder werden nur von wenigen Unternehmen abgebaut. Das hat zum einen geologische als auch historisch gewachsene Gründe. Insbesondere bei Rohstoffen für strategisch wichtige Schlüsseltechnologien ist eine hohe Konzentration auf wenige Länder zu erkennen. Bei Lithium lagen im Jahr 2021 nach Angaben von United States Geological Survey (USGS) 91 Prozent des Bergbaus in Chile, Australien und China. Kobalt, welches für Kathodenmaterial für die Produktion von Lithium-Ionen-Zellen wichtig ist, wird zu über 70 Prozent in der DR Kongo abgebaut. Der Abbau der natürlichen Rohstoffe findet nicht immer in China statt, allerdings sind beim Abbau oft chinesische Unternehmen beteiligt, die für die weitere Aufbereitung der Erze und Konzentrate nach China exportieren. Man muss dementsprechend über die Lokalisierung des Abbaus der Rohstoffe hinausschauen, wenn es darum geht, die Abhängigkeiten von bestimmten Ländern darzustellen.

Eine hohe Angebotskonzentration auf wenige Länder oder Unternehmen birgt die potenzielle Gefahr des Missbrauchs von Marktmacht. Beispiel dafür ist die Krise bei den Seltenen Erden in den Jahren 2010 bis 2012, als China in Folge politischer Spannungen mit Japan sei-

ABB. 03 **Ursachen für Versorgungsrisiken** Neben den «Klassikern» ökonomische Bedeutung und Versorgungsrisiken wird Dynamik in der Studie betrachtet.



Ökonomische Bedeutung

- Hohe Einsparung von Treibhausgasemissionen
- Mengenrelevanz
- Strategische Bedeutung (z. B. keine Substituierbarkeit)



Versorgungsrisiken

- Nachfrageüberhang
- Marktkonzentration, Länderrisiken
- Nachhaltigkeit



Zeit und Dynamik

- Klimaneutralität erfordert schnelle Transformation
- Hochlauf von Angebot und Nachfrage schwierig zu synchronisieren

QUELLE Eigene Darstellung

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2023

ABB. 04 **Ursachen für Versorgungsrisiken**

Kritische Versorgungssituationen können auf verschiedenen Ebenen entstehen.

	Nachfrageüberhang	— Unzureichende Synchronisierung von Angebot und Nachfrage bei dynamischem Hochlauf
	Marktkonzentration	— Politische Risiken (Länderrisiken) — Marktmacht einzelner Unternehmen
	Nachhaltigkeit	— Umweltschutz — Menschenrechte, Sozialstandards

QUELLE Eigene Darstellung HINWEIS Umwelt- und gesellschaftliche Risiken, wie z.B. die nicht ausreichende Einhaltung von Sozialstandards und Menschenrechten, sind nicht Untersuchungsgegenstand dieser Studie.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2023

ne Exportquoten für Seltene Erden drastisch reduzierte und aufgrund seiner großen Marktmacht den Markt in eine schwere Krise stürzte. Die Preise für Seltene Erden stiegen sprunghaft an und viele Industriebereiche, die auf diese angewiesen waren, hatten akut ein starkes Interesse an der Diversifizierung der Lieferkette. Als China nach wenigen Jahren seine Quoten wieder lockerte und die Preise wieder deutlich sanken, verloren Industrie und Politik zunächst wieder die Motivation, die Diversifizierung der Lieferkette voranzutreiben. Nur Japan zog seine Konsequenzen daraus und förderte die Weiterverarbeitung Seltener Erden außerhalb Chinas, um nicht vollständig von China abhängig zu sein.

Darüber hinaus sind **Umweltbelastungen** und **fehlende bzw. geringe Sozialstandards** eine große Heraus-

forderung. In vielen rohstoffreichen Ländern gibt es nur unzureichende Umweltschutzauflagen, was zu katastrophalen Zuständen führen kann. Rohstoffförderung ist der zentrale Schritt der Lieferkette mit den größten Eingriffen in die Natur und gleichzeitig den stärksten Belastungen der Arbeiter*innen bzw. der lokalen Bevölkerung.

Darüber hinaus müssen neue Bergbauprojekte mit starkem Widerstand rechnen, wenn Umweltbelastungen und gesellschaftliche Teilhabe nicht von Anfang an mitbedacht werden. Es ist ein Zusammenwirken von lokaler Bevölkerung, Politik und Bergbauindustrie schon im Entwicklungsstadium notwendig, um in Zukunft neue Minen, auch in der EU, zu erschließen. Immer wieder gibt es Beispiele für Bergbauprojekte, die aufgrund des Widerstands aus der Bevölkerung nicht zu Stande kamen, oder zumin-

3. Risiken entlang der Lieferkette und Priorisierung von Schlüsseltechnologien

dest zeitweise unterbrochen wurden. Ein Beispiel ist das Lithium-Projekt der Jadar-Mine in Serbien, welches zeitweilig wegen Protesten aus der Bevölkerung von der Regierung gestoppt wurde (TAZ, 2023). In Myanmar hat erst vor kurzem der Protest gegen laufenden Abbau von Seltenen Erden zum Zugeständnis der Minenbetreiber geführt, dass die Produktion vorläufig eingestellt wird, allerdings mit ungeklärtem Ausgang (Benchmark Source, 2023a). Chile untersucht die Möglichkeit der Verstaatlichung seiner Lithiumvorkommen, um in Zukunft mehr Mitspracherecht zu erhalten und insgesamt davon mehr zu profitieren (MiningScout, 2023). Die Frage von Umweltbelastungen und sozialen Fragen sind allerdings nicht Teil dieser Studie, da der Fokus auf der Nachfrage- und Versorgungssituation liegt und sie in verschiedenen Studien zuvor explizit und ausführlich behandelt wurden (Re-Sourcing, 2020, STRADE, 2016, Öko-Institut, 2021).

Lieferketten: von der Rohstoffförderung bis zur Produktion ganzer Güter

Eine kritische Versorgungssituation kann sich entlang der ganzen Lieferkette ergeben: Beim Abbau und der Verarbeitung der Rohstoffe, der Produktion der (Teil-)Komponenten bis hin zur Produktion der einzelnen Güter. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten dargestellt (vgl. ABB. 05).

Rohstoffförderung: Der Abbau von Rohstoffen aus natürlichen Lagerstätten im Bergbau ist der Ausgangspunkt für die Lieferkette.³ Der Abbau aus den Lagerstätten kann dabei im Tagebau oder im Untertagebau stattfinden. Im Tagebau erfolgt der Abbau an der Oberfläche in offenen Gruben. Die Rohstoffe werden meist in Form von Erzen nach dem Abtragen von Erdschichten freigesetzt und z. B. durch Sprengen, Ausbaggern, Mahlen oder Laugen in ersten Schritten behandelt. Im Untertagebau liegen die Lagerstätten tief unterhalb der Erdoberfläche. Die Rohstoffe werden dann in Minen und Stollen extrahiert.

Die wenigsten Rohstoffe sind tatsächlich selten im engeren physischen Sinn. Vielmehr ergeben sich die Knappheiten aus anderen Gründen: Viele Rohstoffe werden nur als Beiprodukte gefördert, wie z. B. Iridium, welches bei der Platinförderung in geringen Konzentrationen mit abgebaut wird. Darüber hinaus sind Rohstoffe oft nur in geringer Konzentration in den natürlichen Lagerstätten vorhanden, die sich wirtschaftlich bzw. technisch nicht abzubauen lohnen. Ein riesiges Problem bei starken Nachfrageanstiegen sind die meist langen Vorlaufzeiten und das finanzielle Risiko, welches mit der Erschließung und dem Aufbau von neuen Produktionskapazitäten im Bergbau einhergeht. Dies kann sehr schnell zu zumindest temporären Knappheiten bei der Versorgung führen.

Rohstoffverarbeitung: Rohstoffe müssen für die Weiterverarbeitung zunächst angereichert und aufbereitet werden. Dies beinhaltet das Entfernen von unerwünschten Begleitstoffen und eine allgemeine Erhöhung der Konzentration. Die Verfahren zur Prozessierung und Veredelung der einzelnen Rohstoffe unterscheiden sich nicht nur sehr stark zwischen den verschiedenen Materialien, sondern auch je nach Vorkommen und anschließender Anwendung.

Zum Beispiel müssen für Batterien die Rohstoffe in sehr hoher Reinheit vorliegen, was für andere Anwendungen nicht unbedingt notwendig ist. Auch sind je nach Anwendung bestimmte Verunreinigungen tolerierbar, für andere nicht. Die erste Anreicherung findet oft vor Ort in den Abbauländern statt, während die eigentliche Raffination und das Erreichen von sehr hoher Reinheit teils nach einem Transport über weite Strecken in anderen Ländern (tendenziell den Standorten für die Produktion der Endprodukte) erfolgt. Je nach Rohstoff und Prozess verlangt die Aufbereitung und Vorbereitung zur Weiterverarbeitung zu bestimmten Komponenten ein hohes technisches Know-how, was nicht immer in der EU breitflächig vorhanden ist.

Produktion von (Teil-)Komponenten: Es ist nicht ausreichend, nur den Abbau und die Veredelung der Rohstoffe zu beherrschen bzw. die Kapazitäten dafür zu besitzen, wenn die Komponenten daraus wiederum

³ Je nach Zwischenprodukt oder Endprodukt können auch unterschiedlich große Anteile an Sekundärrohstoffen aus Recyclingprozessen in der Lieferkette integriert sein.

ABB. 05 Stufen der Lieferkette

Kritische Versorgungssituationen können entlang der gesamten Lieferkette auftreten.



QUELLE Eigene Darstellung

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2023

nur an anderer Stelle gefertigt werden können. Komponenten sind zum Beispiel die Bestandteile der Lithium-Ionen-Batterien, also Anoden- und Kathodenmaterial, Leiterfolien, Zellgehäuse usw. Ein gutes Beispiel für eine bestehende Abhängigkeit ist die Produktion von Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Diese findet zum größten Teil in China, Südkorea und Japan statt, obwohl zum Beispiel in Finnland eine der größten Kobaltraffinerien der Welt lokalisiert ist.

Produktion von Gütern: Der letzte zentrale Schritt ist die Produktion der eigentlichen Güter bzw. Anlagen selbst. Häufig liegt darin der größte Teil der Wertschöpfung. Für diese Studie sind die Güter als die Endprodukte zu verstehen, die wiederum andere Technologien erst ermöglichen. Beispiele für Güter sind Solarpaneele, Batterien oder Permanentmagnete und Elektrolyseure. Natürlich müssen auch dort die Produktion und die Unabhängigkeit von anderen Ländern gestärkt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass ohne die vorherigen Schritte keine Unabhängigkeit ermöglicht werden kann. Auch wenn die vorherigen Schritte nicht unterschätzt werden dürfen, steckt in der Produktion der Güter meist ein hoher Anteil der entscheidenden Technologie, die über die Qualität des Produkts entscheidet. Nur mit exzellenten Prozessen kann zum Beispiel aus qualitativ hochwertigen Komponenten eine Lithium-Ionen-Batterie-Zelle in hoher Stückzahl und gleichbleibender Qualität produziert werden. Allerdings sind die hochwertigen Komponenten eine Mindestanforderung. Der Gesamtprozess ist sehr materialintensiv und die Lieferketten müssen daher sehr gut aufeinander abgestimmt sein. Kleine Veränderungen bei einzelnen Komponenten können schon zu einem Versagen der Zelle führen.

Priorisierung auf strategisch wichtige Schlüsseltechnologien

Für eine Fokussierung der Analyse auf zentrale Schlüsseltechnologien wurden alle Transformationstechnologien hinsichtlich der Faktoren bewertet, die sowohl zu einer hohen strategischen Bedeutung (hohe Einsparung von Treibhausgasemissionen) als auch zu einem hohen Risiko bei der Versorgungssicherheit führen können: schneller Hochlauf bis 2030, kurzfristig kaum bis keine Alternativen und hohe Konzentration bei Rohstoffen, Komponenten oder sogar der Produktion ganzer Güter (vgl. ABB. 06): Hierbei wurden insbesondere sieben Güter bzw. Komponenten als herausragend identifiziert:

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

Neben diesen Gütern bzw. Komponenten sind für die Transformation zur Klimaneutralität auch verschiedene chemische Prozesstechnologien, die unterschiedlichsten Infrastrukturen sowie Informations- und Kommunikationstechnologien – Hardware und Software für die Digitalisierung – von besonderer Bedeutung. Wegen der besonderen Spezifika in diesen Bereichen werden diese in der hier vorgelegten Untersuchung nicht weiter behandelt, sind aber mit Blick auf Resilienz und Souveränität von großer Bedeutung.

ABB. 06 **Kriterien für die Auswahl der priorisierten Schlüsseltechnologien**

Windkraft (inkl. Permanentmagnete für Generatoren), Photovoltaik, Batterieelektrische Fahrzeuge (inkl. Permanentmagnete für Elektromotoren und Lithium-Ionen-Batterie), Wärmepumpen, Wasser-Elektrolyseure und Direktreduktions-Anlagen für die Dekarbonisierung von Stahl spielen eine zentrale Rolle für die Reduktion der Treibhausgase. Aufgrund des sehr schnellen Hochlaufs, den nicht oder kaum vorhandenen technologischen Alternativen und der hohen Konzentration in der Fertigung bei Rohstoffen, Komponenten oder ganzen Gütern sind diese Technologien priorisierte Schlüsseltechnologien in dieser Studie.

	Technologie	Sehr hohe THG-Reduktion bis 2030/35	Starker Hochlauf bis 2030/35	Kaum kurzfristige Alternativen	Aktuell hohe Konzentration bei Rohstoffen (R), (Teil-)Komponenten (K) oder Gütern (G)
Energiewirtschaft	Windkraft	X	X	X	X (x) K: Permanentmagnete für Generatoren , K: Einzelkomponenten
	Photovoltaik	X	X	X	X R, K, G: Ganze Lieferkette
	Gaskraftwerke H ₂ -ready	(x)	X	X	
	Bioenergie	(x)			
	Heimspeicher bis 100 kW	(x)	(x)		
	Großspeicher	(x)			
	Geothermie				
	Solarthermie		(x)		
	Großwärmepumpen		(x)		
	Elektroheizer				
	Elektrolyseure	X	X	X	X R: Iridium
Verkehr	Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV, inkl. Pkw, Leichte und Schwere Nutzfahrzeuge)	X	X	X	X R: Lithium , Mangan, Kobalt, Nickel, Graphit, Seltene Erden , K: Lithium-Ionen-Batterien, Permanentmagnete für Elektromotoren
	Pkw (PHEV)				
	Pkw (Voll-HEV)				
Gebäude	Wärmepumpen	X	X	X	(x) K: Kompressoren
	Wärmedämmung	X	(x)	X	
	LED				
Industrie	Elektro-Lichtbogenofen (Stahl)	X	X	X	
	DRI-Schachtofen (Stahl)	X	X	X	(x) Anlagenbau
	Oxyfuel-CCS-Klinkerofen (Zement)	(x)	(x)		
	Industrie-Wärmepumpen	(x)	(x)	X	(x) Anlagenbau (vor allem bei Hochtemperatur-WP)
Sonstige	DAC				
	PtL-Anlagen (Methanol, Naphtha)				
Infrastruktur	Wasserstoffnetz	(x)	(x)	X	
	Stromnetz	(x)	(x)	X	
	CO ₂ -Netz	(x)		X	

LEGENDE X: sehr relevant; (x): eingeschränkt relevant

ABKÜRZUNGEN BEV: Batterieelektrische Fahrzeuge, PHEV: Plug-In-Hybride, Voll-HEV: Vollhybrid, CCS: Carbon Capture and Storage, DAC: Direct Air Capture (CO₂-Abscheidung aus der Luft). PtL: Power2Liquids (synthetisch erstellte, flüssige Brennstoffe)

QUELLE Eigene Berechnungen auf Basis der Studie KNDE2045 und eigenen Berechnungen

4. Zubaupfade von Schlüsseltechnologien in Deutschland bis 2045



4. Zubaupfade von Schlüsseltechnologien

4.1. Photovoltaik

Im Kapitel 4 werden die priorisierten Schlüsseltechnologien näher beleuchtet. Zum einen werden die hier angenommenen Ausbaupfade skizziert, zum anderen werden die konkreten Technologiepfade beschrieben und die Annahmen dargelegt, um zu berechnen, welche Rohstoffe in welcher Menge jeweils in den einzelnen Technologien enthalten sind:

- **Bruttozubau:** bzw. Nachfrage beschreibt den jährlichen Bruttozubau pro Technologie. Bei Photovoltaik-Anlagen beispielsweise beträgt dieser ab Mitte der 2020er Jahre im Mittel rund 22 GW, die jedes Jahr zugebaut werden müssen, um die im EEG 2023 verankerten Ziele zu erreichen.
- **Technologiepfade:** Bei den jeweiligen Technologien gibt es jeweils unterschiedliche Technologiepfade, die Auswirkungen auf die Rohstoffbedarfe haben. Bei den Hochlaufpfaden von Photovoltaik ist entscheidend, wie sich die Anteile auf siliziumbasierte Waferzellen und Dünnschichtzellen verteilen. Bei Windkraft ist aus Rohstoffsicht interessant, wie hoch der Anteil von Synchrongeneratoren mit Permanentmagneten mit und ohne Getriebe ist. Bei Lithium-Ionen-Batterien entscheidet sich der Bedarf an kritischen Rohstoffen, welche Kathodentechnologien eingesetzt werden. Bei Elektrolyseuren ist die entscheidende Frage, wie schnell PEM-Elektrolyseure (Protonen-Austausch-Membran, mit dem sehr kritischen Rohstoff Iridium) in den Markt diffundieren und ob und wann die Hochtemperatur-elektrolyse – mit den Rohstoffen Scandium (mäßig kritisch) und Yttrium (strategisch relevant, aber nicht kritisch) – Marktreife erzielen.

- **Rohstoffintensität:** Die dritte Einflussgröße ist die Menge an Rohstoffen pro Einheit des hergestellten Gutes. Durch Forschung und Entwicklung oder auch durch Skaleneffekte bei der Produktionssteigerung kann der spezifische Bedarf an Rohstoffen gesenkt werden. Ein starker Rückgang bei der Rohstoffintensität kann dazu führen, dass im Zeitverlauf der Materialbedarf rückläufig ist trotz steigendem Zubau. Die hierzu getroffenen Annahmen sind deshalb für die Interpretation der Ergebnisse wichtig. In der längeren Perspektive wächst die Rolle von Recyclingansätzen. Die Details zur Entwicklung der Rohstoffintensität ist im Anhang in Anlage A dargestellt.

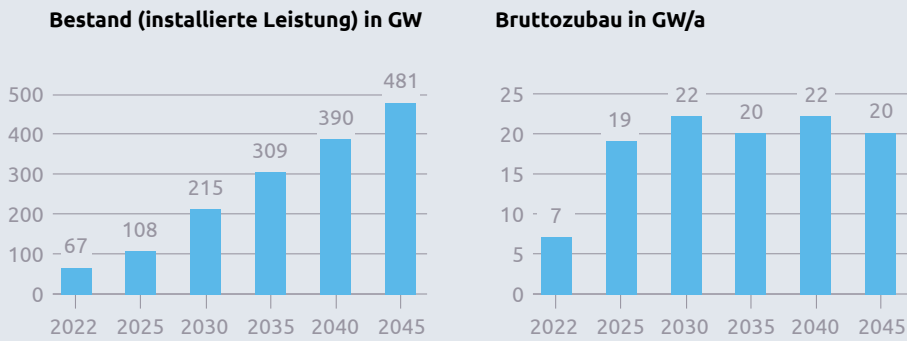
Aus diesen drei Annahmen wird nach der Analyse der Lieferketten in Kapitel 5 der Bedarf an kritischen Rohstoffen für Deutschland bestimmt.

4.1. Photovoltaik

Nachfrage: Zubau steigt vor 2030 auf 22 GW pro Jahr an

Die Photovoltaik ist neben der Windenergie die wichtigste Quelle für klimaneutralen Strom und damit essenziell für die Transformation des deutschen Energiesystems, mit niedrigen Stromgestehungskosten und hohen Ausbaupotenzialen. Entsprechend den Zielen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) 2023 beschleunigt sich der Zubau in den nächsten Jahren deutlich. Ausgehend von durchschnittlich fünf GW pro Jahr in den letzten fünf Jahren (BMWK, 2023a) wird der Zubau bereits 2023 voraussichtlich bei zwölf GW liegen und bis 2027 auf 22 GW pro Jahr steigen. Bis 2045 erhöht sich die installierte Leistung auf rund 480 GW (vgl. ABB. 07). Die Photovoltaik erzeugt damit etwa 450 TWh Strom und stellt etwa 40 Prozent der Stromerzeugung Deutschlands.

ABB. 07 **Photovoltaik**



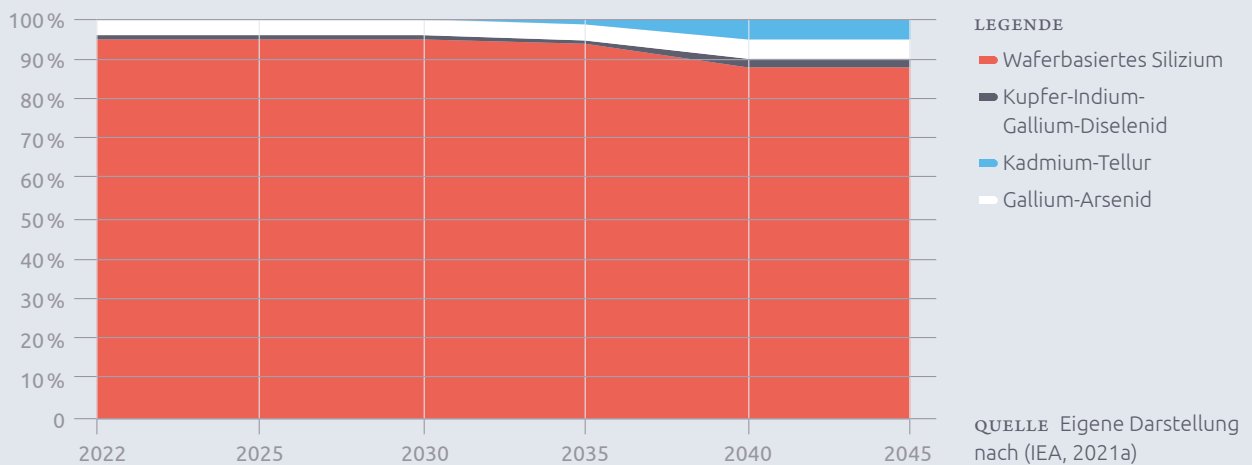
Der Ausbau basiert bis 2040 auf dem EEG 2023. Ab Mitte der 2020er Jahre steigt der jährliche Zubau auf rund 22 GW an.

QUELLE Eigene Darstellung basierend auf EEG 2023 und eigenen Berechnungen

Prognos, 2023

ABB. 08 **Technologie-Mix Photovoltaik**

Die Wafer-basierte PV-Technologie wird auch langfristig den Markt dominieren.



Prognos, 2023

Komponenten

Eine Photovoltaik-Anlage besteht aus verschiedenen Komponenten:

- Photovoltaikmodule, in denen Gleichstrom erzeugt wird
- Wechselrichter zur Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom und zur Einspeisung des Stroms in das Netz
- Unterkonstruktion
- Verkabelung
- Fernüberwachungssystem
- Rundfunksteuergerät
- Stromzähler (Smart Meter)

Die Photovoltaikmodule selbst bilden das Herzstück der Anlage und bestehen u. a. aus mehreren in Reihe oder parallel-geschalteten Solarzellen, einer Glasscheibe zum Schutz gegen Hagel und Verschmutzung, einer transparenten Kunststoffschicht, in die die Solarzellen eingebettet sind und dünnen Silberdrähten, um die Elektronen zu transportieren. Eingefasst werden die Module von einem Profilrahmen.

Technologie-Mix: Wafer-basierte Photovoltaik bleibt auch langfristig dominierend

Für Solarzellen gibt es zwei wesentliche Technologiestränge, welche sich unter anderem in der Dicke der Zellen und dem verwendeten Halbleiter unterscheiden: Wafer-basierte Solarzellen sind Dickschichtzellen mit kristallinem Silizium als Halbleiter (c-Si) und dominieren mit rund 95 Prozent den weltweiten Markt. Dem gegenüber stehen Dünnschichtzellen, in denen auch andere Halbleiter eingesetzt werden. Hierzu zählen z. B. Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS), Cadmium-Tellur (CdTe), Gallium-Arsenid (GaAs) und amorphes Silizium (a-Si). Dünnschichtzellen kommen derzeit auf einen Marktanteil von rund fünf Prozent (IEA, 2021a). Darüber hinaus gibt es noch weitere Zellformen, wie die Perowskit-Zellen, die sich teilweise im Entwicklungsstadium befinden.

Die Technologiestränge unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile. Die kristallinen Siliziumzellen zeichnen sich insbesondere durch ihren höheren Wirkungsgrad (Solarserver, 2021), eine robustere Konstruktion und eine höhere Lebensdauer aus (solarenergie.de, 2021a). Nachteilig zu bewerten sind die gesteigerten Produktionskosten, das höhere Gewicht sowie ihre verringerte Materialflexibilität (solarenergie.de, 2021a). Aufgrund ihrer geringen Dicke weisen Dünnschichtzellen einen verminderten Rohstoffbedarf auf (Photovoltaik.org, o. J.). Sie sind flexibel (solarenergie.de, 2021a) und erzielen auch bei diffusem Licht eine hohe Stromausbeute (Photovoltaik.org, o. J.). Dem stehen geringere Wirkungsgrade gegenüber (solarenergie.de, 2021a). Im hier unterstellten Szenario wird angenommen, dass es bis 2040 zwar eine leichte Verschiebung des Marktanteils zur Dünnschicht-PV geben wird, doch die Wafer-basierte Technologie mit über 85 Prozent auch zukünftig den Großteil der eingesetzten PV-Module ausmachen wird (IEA, 2021a).

4.2. Windkraft

Nachfrage: Jährlicher Zubau bis 2035 von bis zu acht GW Wind Offshore und elf GW Wind Onshore

Windenergie stellt für die Erzeugung von klimaneutralem Strom die mengenmäßig wichtigste Säule dar. In den Berechnungen dieser Studie werden im Jahr 2045 etwa 600 TWh und damit gut 60 Prozent des Stroms in Deutschland mit Windenergie an Land und auf See erzeugt. Von heute etwa 125 TWh Windstromerzeugung ist bis zum Jahr 2045 mehr als eine Vervielfachung der Stromerzeugung zu erwarten.

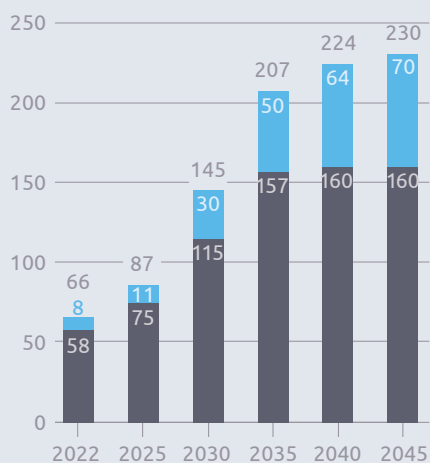
Das aktuelle EEG 2023 sieht dazu ambitionierte Ausbaupfade für die Windenergie vor. Insbesondere in den Jahren 2026 bis 2035 ergibt sich daraus ein hoher jährlicher Zubaubedarf von bis zu acht Gigawatt pro Jahr bei Wind Offshore und elf GW bei Wind Onshore. Zum Vergleich: der bislang höchste erreichte jährliche Zubau wurde im Jahr 2017 mit 5,5 GW erreicht. Zwar sinken durch die zunehmenden Anlagengrößen im Onshore- und Offshore-Bereich die für den gleichen Leistungszubau erforderlichen Anlagenzahlen, jedoch bleibt die Sicherstellung einer stabilen Lieferkette insbesondere im Hinblick auf die kommenden zehn bis 15 Jahre eine zentrale Herausforderung.

Komponenten

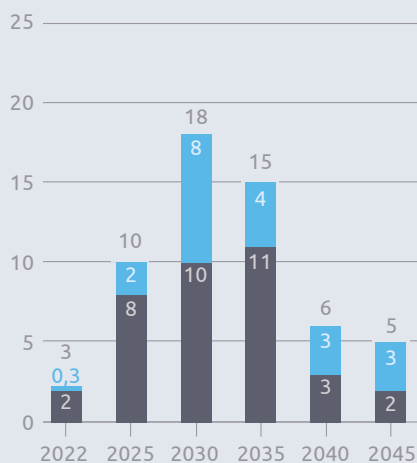
Windenergieanlagen sind komplexe Maschinen. Die beiden wichtigsten Komponenten sind der Rotor mit Nabe und den Rotorblättern, mit denen die kinetische Energie des Windes in Bewegungsenergie umgewandelt wird, sowie der Generator, der die Bewegungsenergie in elektrischen Strom umwandelt. Der Generator selbst besteht aus Kupferspulen und Magneten – entweder aus Elektromagneten oder Permanentmagneten mit Seltenen Erden. Einige Windkraftanlagen verfügen über ein Getriebe. Es befindet sich zwischen Rotor und Generator und wandelt die langsame Bewegung des Rotors in

ABB. 09 **Windkraft**

**Bestand (installierte Leistung)
an Wind Onshore und Wind
Offshore in GW**



**Bruttozubau
an Wind Onshore und
Wind Offshore in GW/a**



Der stärkste Zubau pro Jahr erfolgt in den nächsten zehn Jahren. Um die Ziele aus dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und dem Windenergie-auf-See-Gesetz umzusetzen, ist ab 2030 ein geringerer Zubau notwendig.

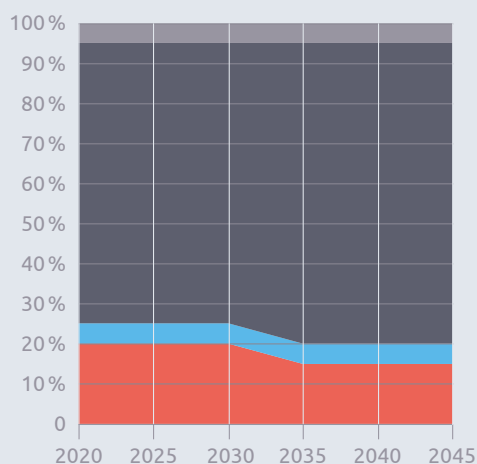
LEGENDE
■ Onshore
■ Offshore

QUELLE Eigene Darstellung basierend auf EEG 2023 und Windenergie-auf-See-Gesetz sowie eigenen Berechnungen

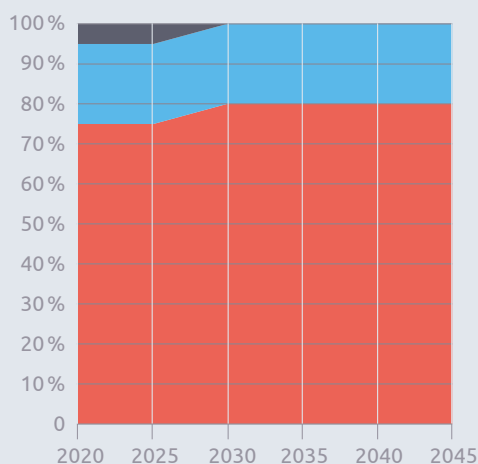
Prognos, 2023

ABB. 10 **Technologie-Mix Windkraft**

Wind Onshore



Wind Offshore



LEGENDE

- DD-PMSG: Synchrongenerator mit Permanentmagnet, ohne Getriebe (sehr hoher Bedarf an Seltenen Erden)
- GB-PMSG: Synchrongenerator mit Permanentmagnet, mit Getriebe (mittlerer Bedarf an Seltenen Erden)
- GB-DFIG: Induktionsgenerator mit Getriebe (geringer Bedarf an Seltenen Erden)
- DD-EESG: elektrisch erregter Synchrongenerator ohne Getriebe (geringer Bedarf an Seltenen Erden)

QUELLE Eigene Darstellung nach (IEA, 2021a)

80 Prozent der Wind-Offshore-Anlagen und 20 Prozent der Wind-Onshore-Anlagen verwenden Generatoren (DD-PMSG), die einen besonders großen Permanentmagneten mit Seltenen Erden haben. Durch den Einsatz von Getrieben (GB-PMSG) kann der Permanentmagnet deutlich verkleinert werden. Damit sinkt der Bedarf an Seltenen Erden.

Prognos, 2023

schnellere Drehbewegungen um. Damit kann der Generator kleiner ausfallen als bei Anlagen ohne Getriebe. Mit Blick auf den Einsatz von Seltenen Erden als kritische Rohstoffe ist dieses relevant. Darüber hinaus gehören zu einer Windkraftanlage Turm, Fundament und Netzanschluss. Insgesamt besteht eine Windkraftanlage aus mehr als 50.000 Einzelteilen.

Technologie-Mix: 80 Prozent der Offshore-Anlagen und 20 Prozent der Onshore-Anlagen verwenden Generatoren (DD-PMSG), die besonders große Permanentmagnete aus Seltenen Erden benötigen

Zur Bewertung der Kritikalität bei erforderlichen Rohstoffen und Teilkomponenten können die heute verwendeten Windenergieanlagen in verschiedene Grundtypen unterteilt werden, die sich hinsichtlich des eingesetzten Generortyps und der Verwendung von Getrieben unterscheiden. Die Auswirkungen der Technologiewahl hat Auswirkungen auf den Einsatz von Seltenen Erden.

Grundsätzlich werden vier verschiedene Anlagentypen verwendet:

- mit Permanentmagnet-Generator und Getriebe (GB-PMSG),
- mit Permanentmagnet-Generator ohne Getriebe (DD-PMSG),
- mit Induktionsgenerator und Getriebe (GB-DFIG)
- mit elektrisch erregtem Synchrongenerator ohne Getriebe (DD-EESG).

Der entscheidende Unterschied liegt im Aufbau des Magnetfeldes im Generator. Anlagen mit Permanentmagnet-Generatoren (DD-PMSG und GB-PMSG) verwenden auf Seltenen Erden basierende Permanentmagnete, während Anlagen mit Induktionsgenerator bzw. Synchrongenerator (GB-DFIG und D-EESG) Elektromagneten bzw. elektromagnetisch induzierte Magnetfelder nutzen. Folglich liegt der Bedarf an Seltenen Erden in ersteren Anlagentypen deutlich höher als bei Letzteren.

Durch den Einsatz von Getrieben kann eine höhere Drehzahl im Generator erzielt werden, wodurch die Generatorgröße und damit auch der Einsatz von Magnetmaterial verringert werden kann. Obwohl der Ein-

satz von Seltenen Erden bei Anlagen mit Permanentmagneten und ohne Getriebe (DD-PMSG) höher ist, bieten diese Typen jedoch technologische Vorteile, die insbesondere im Offshore-Einsatz stark ins Gewicht fallen. Permanentmagnete ermöglichen hohe Wirkungsgrade und eine effiziente Energieumwandlung und das getriebelose Antriebskonzept reduziert das Gondelgewicht, was insbesondere bei großen Turbinenleistungen und schwierigen Installationsbedingungen von Vorteil ist. Heute sind deshalb 75 Prozent der Offshore-Anlagen und 20 Prozent der Onshore-Anlagen als DD-PMSG gebaut. Zudem werden in China auch die Onshore-Anlagen hauptsächlich als DD-PMSG gebaut. Der Rest der Offshore-Anlagen wird als Generator mit Permanentmagnet und Getriebe (GB-PMSG) gebaut. Das heißt, sie haben zwar auch einen Permanentmagneten, welcher jedoch durch den Einsatz des Getriebes deutlich kleiner ausfällt. Ein sehr geringer Anteil entfällt auf GB-DFIG. Diese Technologie ist jedoch dominierend bei Onshore-Anlagen. Sie basieren nicht auf Permanentmagneten und erfordern deshalb einen sehr geringen Einsatz von Seltenen Erden. Für die Berechnung des Rohstoffbedarfs in Kapitel 5 wird davon ausgegangen, dass die aktuellen Marktanteile bei den Technologiefaden sich auch in Zukunft nicht wesentlich verändern werden.

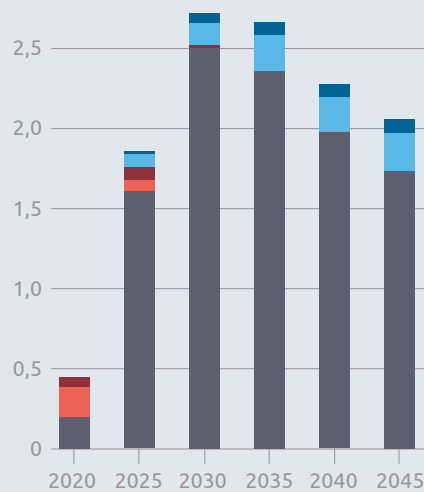
4.3. Batterien für Elektromobilität

Die Verlagerung der auf Verbrennungsmotoren basierten Mobilität hin zu elektrisch betriebenen Fahrzeugen ist ein zentraler Schritt zur Klimaneutralität. Diese beruht auf batteriebetriebenen Fahrzeugen, die mit einer Antriebsbatterie und mit einem Elektromotor⁴ (meist mit Permanentmagneten, vgl. Kap. 4.4) ausgestattet sind. Als Antriebsbatterie hat sich die Lithium-Ionen-Batterie durchgesetzt. Diese wird auch in den kommenden Jahren den Markt dominieren. Alternativen, wie die Natrium-Ionen-Batterie, sind erst in der Entwicklung.

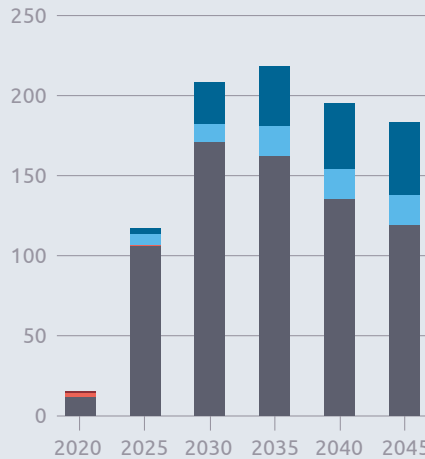
⁴ Nicht wenige batterie-elektrische Pkw-Modelle sind mit mehreren Elektromotoren ausgestattet.

ABB. 11 **Elektromobilität**

Neuzulassungen von elektrischen Fahrzeugen in Millionen Stück



Nachfrage an Batteriekapazitäten in GWh/a



Die Nachfrage nach elektrischen Fahrzeugen steigt bis 2030 steil an. Die Batterienachfrage wird von Pkw dominiert.

LEGENDE

- Schwere Nutzfahrzeuge (BEV)
- Leichte Nutzfahrzeuge (BEV)
- Pkw (Voll-HEV)
- Pkw (PHEV)
- Pkw (BEV)

ABKÜRZUNGEN

EV: Electric vehicle,
HEV: Hybrid electric vehicle,
BEV: battery electric vehicle,
PHEV: Plug-in hybrid electric vehicle,
Voll-HEV: Vollhybrid

QUELLE Eigene Modellierung basierend auf dem Szenario «KNDE2045»

Öko-Institut 2023

Es bleibt abzuwarten, welche Marktanteile sie übernehmen werden. Die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien wird im Wesentlichen durch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotten⁵ bestimmt.

Nachfrage: Gegenüber 2020 wächst die Batterienachfrage im Szenario «KNDE2045» bis 2030 fast um den Faktor 14

Das aktualisierte Szenario «Klimaneutrales Deutschland 2045» – Szenario «KNDE2045» – berücksichtigt die Zwischenziele von 15 Millionen E-Pkw im Bestand im Jahr 2030 (KoaV, 2021) und von 100 Prozent elektrischer Antriebe in den Neuzulassungen ab 2035 (Council of the European Union, 2023a). Neben der Elektrifizierung beinhaltet das Szenario Verkehrsverlagerungen auf klimaschonende Verkehrsmittel (ÖPNV, Bahn etc.), um die THG-Emissionen der Bestandsflotten gemäß

der Zielvorgaben zu senken. Als Folge sinkt der Pkw-Bestand in Deutschland von derzeit ca. 50 Millionen Pkw auf rund 40 Millionen Stück im Jahr 2045 (vgl. ABB. 58 im Anhang). Für eine robuste Abschätzung der Batteriebedarfe geht das Szenario von einem perspektivisch vollständigen Umstieg auf batterieelektrische Antriebe in allen Fahrzeugsegmenten aus.

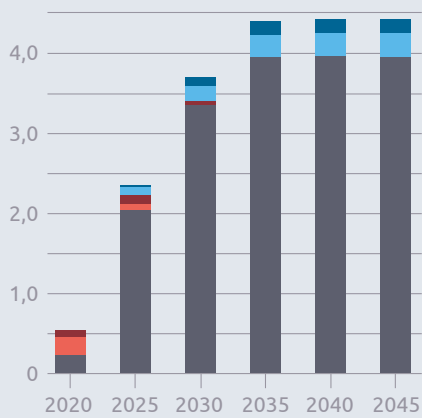
Die modellierte Entwicklung der Neuzulassungen in Abbildung 11 zeigt eine rasche Steigerung des Absatzes batterieelektrischer Fahrzeuge um den Faktor fünf bis zum Jahr 2030. Ab 2025 sind über 90 Prozent der neuen elektrischen Fahrzeuge batterieelektrische (BEV) Pkw. Die Bedeutung von Plugin-Hybriden (PHEV) und Voll-Hybriden (Voll-HEV) nimmt bis 2030 kontinuierlich ab. Unter den schweren Nutzfahrzeugen (SNF) ab 3,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht werden in dem Szenario ab 2040 ausschließlich BEV neu zugelassen. Im Vergleich zu Pkw weisen schwere und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) sehr viel geringere Stückzahlen auf.

Die Nachfrage nach Batterien steigt gemäß dem Hochlauf elektrischer Fahrzeuge bis 2030 rasant an (vgl. ABB. 11). Trotz der größeren Batteriespeicher von E-Lkw, deren Kapazität deutlich höher ist als für E-Pkw, sind die hohen Neuzulassungszahlen von Pkw aus-

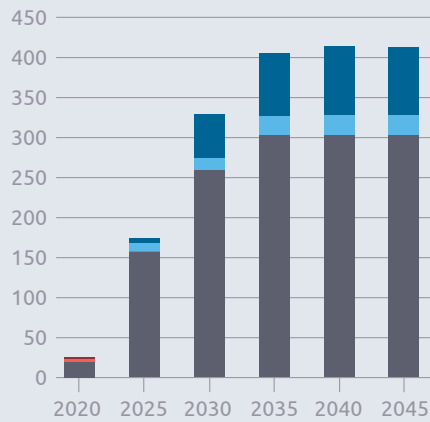
⁵ Lithium-Ionen-Batterien werden auch für andere Anwendungen (portable Geräte, stationäre Speicher usw.) eingesetzt. Allerdings bedingt der rasante Hochlauf der Elektromobilität, dass Einsätze in Fahrzeugen einen überragenden Marktanteil einnehmen. Daher werden diese anderen Anwendungen nicht weiter in dieser Studie betrachtet; (vgl. zum Überblick bzgl. Batterieanwendungen: Stahl, H., Mehlhart, G., Gsell, M., et al., 2021)

ABB. 12 Szenario «Inlandsproduktion»

Inlandsproduktion von elektrischen Fahrzeugen in Millionen Stück/Jahr



Nachfrage an Batteriekapazitäten in GWh/Jahr



Die Inlandsproduktion elektrischer Fahrzeuge geht bis 2035 mit einer rapide steigenden Batterienachfrage einher.

LEGENDE

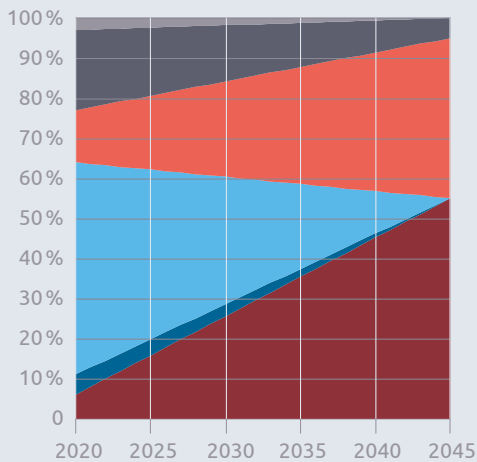
- Schwere Nutzfahrzeuge (BEV)
- Leichte Nutzfahrzeuge (BEV)
- Pkw (Voll-HEV)
- Pkw (PHEV)
- Pkw (BEV)

QUELLE Eigene Modellierung basierend auf dem Szenario «Inlandsproduktion»

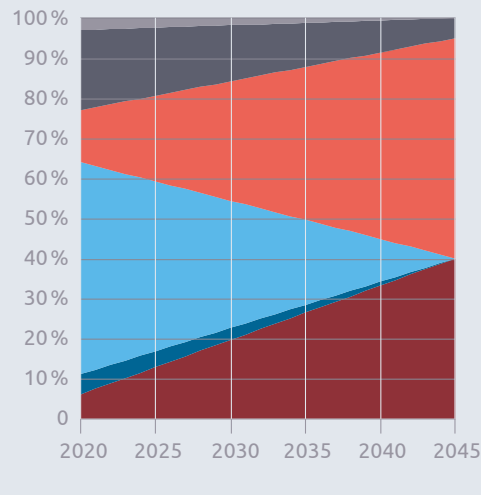
Öko-Institut, 2023

ABB. 13 Marktanteile von Batterietypen für

A. Pkw – klein



B. Pkw – mittel

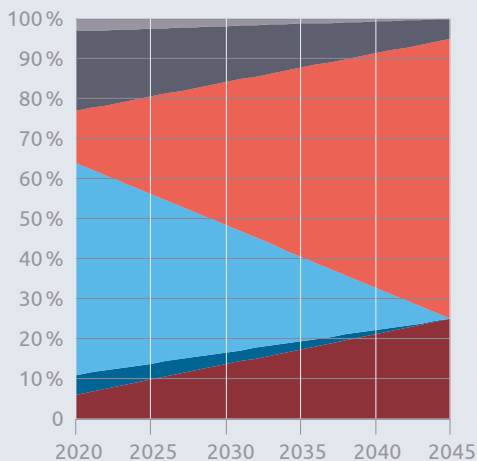


Die Anteile von nickelreichen Batterietypen (NMC 811) und nickel- und kobaltfreien Batterietypen (LFP) nehmen zu.

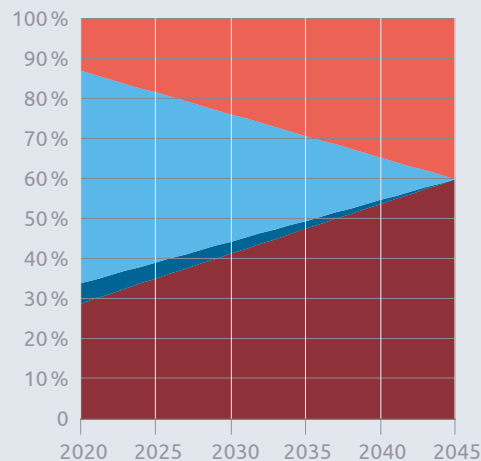
LEGENDE

- LMO
- NCA
- NMC622
- NMC111
- NMC811
- LFP

C. Pkw – groß



D. Leichte Nutzfahrzeuge



QUELLE Eigene Prognose basierend auf aktuellen Marktanteilen und Daten von Benchmark Minerals

Öko-Institut, 2023

schlaggebend für die Gesamtnachfrage an Batterien⁶. Insgesamt steigt die Nachfrage an Batteriekapazität für Elektro-Fahrzeuge im Zeitraum von 2020 bis 2030 fast um den Faktor 14. Für eine detaillierte Abschätzung der Batterie- und Rohstoffbedarfe von Kleinwagen bis zum Sattelschlepper wurden Pkw und Lkw in Größenklassen unterteilt (vgl. TAB. 11 im Anhang). Im Vergleich der Größenklassen dominiert die Nachfrage bei großen Pkw, d. h. Pkw der Mittelklasse oder größer.

Szenario «Inlandsproduktion»

Die Automobilindustrie ist ein zentraler Pfeiler des Wirtschaftsstandorts Deutschland. Insgesamt stehen etwa sieben Prozent aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigungsverhältnisse in Deutschland in direktem Zusammenhang mit der Automobilindustrie (Agora Verkehrswende, 2021). Die Frage des Rohstoffbedarfs für die inländische Produktion von Fahrzeugen in Deutschland ist daher von hoher Bedeutung und wird in einem zusätzlichen Szenario adressiert.

In dem Szenario «Inlandsproduktion» bleibt die Entwicklung des Antriebsmixes aus den modellierten Neuzulassungen erhalten. Bezüglich der Mengengerüste wird davon ausgegangen, dass sich nach der Überwindung der Coronakrise die Pkw-Produktion erholt und die absoluten Pkw-Stückzahlen wieder nahe an das Niveau der Vorkrisenzeit (rund vier Millionen produzierte Pkw pro Jahr in Deutschland) herankommen werden⁷. Somit wird Deutschland auch weiterhin als ein Nettoexporteur von Pkw agieren. Die Produktion ist zudem überwiegend durch große Pkw (ab Mittelklasse) geprägt, wodurch diese

Segmente für den Rohstoffbedarf ein noch höheres Gewicht erhalten als für die Rohstoffnachfrage der Neuzulassungen.

Abbildung 12 zeigt eine rasant wachsende Zahl an E-Fahrzeugen, die in Deutschland zukünftig produziert werden. Wie in der Entwicklung der Neuzulassungen dominieren Pkw sowohl die Stückzahlen der Inlandproduktion als auch die Nachfrage nach Batteriekapazität. Letztere liegt für die Inlandsproduktion im Jahr 2035 um rund 80 Prozent über den Bedarfen der Fahrzeug-Neuzulassungen.

Komponenten

Lithium-Ionen-Batterien haben sich als Standard für die Antriebsbatterie der Elektrofahrzeuge etabliert. Sie setzen sich neben sogenannten Peripheriekomponenten (Batteriegehäuse, Kabel, Batteriemanagementsystem/Elektronik) vor allem aus oft hunderten einzelnen Lithium-Ionen-Zellen zusammen. Die Lithium-Ionen-Zelle als eigentliches Herzstück der Lithium-Ionen-Batterie besteht jeweils aus diversen Einzelkomponenten wie Zellhülle, Kathoden- und Anodenmaterial, Stromsammel (Ableiter), Elektrolyt und Separator. Anoden- und Kathodenmaterial stellen dabei die Aktivmaterialien und damit das Herz der Batterie dar. Die chemischen Reaktionen der Kathode und Anode ermöglichen die Energieaufnahme und -abgabe. Die Anoden- und Kathodenmaterialien sind auch hinsichtlich des Bedarfs an kritischen bzw. strategischen Rohstoffen relevant. Für ihre Produktion werden die meisten zentralen Rohstoffe Lithium, Nickel, Kobalt, Mangan (Kathodenmaterial) und Graphit (Anodenmaterial) verwendet. Kupfer ist nicht Bestandteil des Kathoden- und Anodenmaterials. Kupfer ist jedoch relevant in anderen Komponenten (Stromsammel, Kabel, etc.) der Lithium-Ionen-Zellen.

6 In dem Szenario wurde auch der Batteriebedarf für weitere Fahrzeuge wie Pedelecs, Elektro-Busse und batterie-elektrische angetriebene Züge bilanziert. Aufgrund der marginalen Relevanz auf die Batterienachfrage und die damit verbundene Rohstoffnachfrage werden diese Fahrzeuge im Rahmen dieser Studie nicht weiter berücksichtigt.

7 Die Prognosen der Inlandsproduktion basieren auf Daten und Einschätzungen des VDA.

Technologie-Mix

Lithium-Ionen-Batterien haben sich für Antriebsbatterien für Pkw, Lkw usw. aufgrund ihrer Eigenschaften technologisch gegenüber Alternativen (z. B. Nickel-Metallhydrid-Batterien) klar durchgesetzt und werden auf absehbare Zeit (mindestens bis 2030 oder auch darüber hinaus) die globalen Märkte für diesen stark wachsenden Anwendungsbereich dominieren. Mögliche Marktanteile von technologischen Sprüngen wie Festkörper-Elektrolyten (SSE) oder auf Natrium-Ionen basierenden Batterien⁸ (Hopf, E., 2023) sind hier in der Studie bewusst nicht berücksichtigt. Deren mögliche Marktanteile gerade für den anspruchsvollen deutschen Pkw- und Lkw-Markt (Bedarf an hohen Reichweiten, vergleichsweise hohe Preissegmente usw.) sind heute noch nicht seriös abschätzbar und aller Voraussicht nach werden Alternativen für die Lithium-Ionen-Batterie in der mittelfristigen Betrachtung (bis 2030) für Deutschland keine oder bestenfalls nur eine untergeordnete Rolle spielen können.

Einhergehend und grundlegend für die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugflotte ist die technologische Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien. Dabei sind insbesondere die zum Einsatz kommenden Kathodenaktivmaterialien⁹ bedeutend. Es hat entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der Batterie, weshalb die Art des Kathodenmaterials dazu dient, zwischen verschiedenen Lithium-Ionen-Batterien zu unterscheiden. Darüber hinaus beeinflusst die Wahl des Kathodenmaterials die kritischen Rohstoffe, die für die

Batterie benötigt werden.¹⁰ Die Mengen pro Pkw, abhängig von Kathodenmaterial, sind in Tabelle 13 im Anhang dargestellt.

Abhängig vom Anforderungsprofil kommen verschiedene Batterietypen bezogen auf das Kathodenmaterial in unterschiedlichen Fahrzeugtypen zum Einsatz. In den folgenden Graphiken wird basierend auf der aktuellen Verteilung der eingesetzten Kathodenmaterialien prognostiziert, welche Kathodenmaterialien in welchen Anteilen zukünftig zum Einsatz kommen werden. Dabei werden internationale Vergleiche, (angekündigte) Produktionskapazitäten und eine Abschätzung der Technologieentwicklungen berücksichtigt. Zu beachten ist, dass die Abschätzung der zukünftig zum Einsatz kommenden Technologien in einem so dynamischen Feld wie Lithium-Ionen-Batterien mit großen Unsicherheiten verbunden ist.

Wie zuvor geschildert hängt die Menge an kritischen Rohstoffen direkt mit dem Batterietyp zusammen. Zukünftig werden nach Expertenmeinungen NMC 811¹¹ (kobalt- und manganarm, hoher Nickelgehalt) und LFP-Batterien¹² (kobalt-, mangan- und nickelfrei) den Markt dominieren. Im Vergleich ist LFP zurzeit deutlich günstiger, da keine der teuren Rohstoffe Kobalt und Nickel sowie Mangan enthalten sind. Allerdings ist die Energiedichte in NMC-basierten Batterien höher. Das heißt, Autos mit der gleichen Batteriegröße haben mit LFP statt NMC 811 eine verringerte Reichweite. Daher ist LFP insbesondere für Kleinwagen und kleinere

8 Gerade Natrium-Ionen-Batterien erfahren durch Entwicklungen vor allem in der VR China in jüngster Zeit viel Aufmerksamkeit. Allerdings sind die geschätzten Produktionshochläufe zumindest aktuell noch überschaubar; so wird in der Quelle für 2030 für Natrium-Ionen-Batterien von einer globalen Kapazität von über 100 GWh/a ausgegangen – bei einem Gesamtbedarf von dann 4.700 GWh/a. Dies würde nur einem Marktanteil von weniger als drei Prozent im Jahr 2030 entsprechen.

9 Aktuell gängige Kathodenmaterialien sind Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid in verschiedenen Zusammensetzungen: ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, mit $x+y+z=1$, z. B. NMC 111, NMC 622 oder NMC 811), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$, NCA), Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO_4 , LFP), Lithium-Mangan-Oxid (LiMn_2O_4 , LMO)

10 Als Anodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien hat sich Graphit als Standard etabliert, wobei es einen kleinen Anteil an weiteren Materialien gibt (Lithiumtitanoxid, LTO, andere Kohlenstoffbasierte Anoden, Graphitanoden mit einem Anteil an Silizium). Für den Fokus dieser Studie sind diese anderen Anodenmaterialien weder qualitativ noch quantitativ von Relevanz und werden hier daher nicht weiter betrachtet.

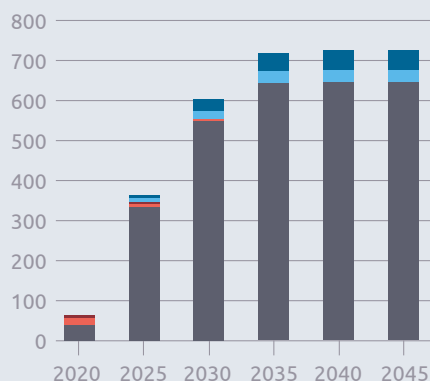
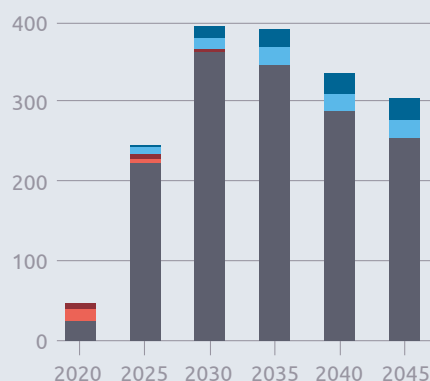
11 Wie zuvor erläutert steht NMC für Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan-Oxide. Die Zahl dahinter ergibt das Verhältnis von Nickel, Cobalt und Mangan. Während NMC 811 für einen großen Nickelüberschuss steht ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$) steht, bedeutet NMC 111 gleiche Anteile an Cobalt, Nickel und Mangan ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$). NMC 622 hat dementsprechend die Zusammensetzung $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$.

12 LFP steht für Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO_4).

ABB. 14 **Jährliche Nachfrage nach Elektromotoren (in GW) für Fahrzeugantriebe**

Szenario «KNDE2045»

Szenario Inlandsproduktion



Pkw bestimmen nahezu gänzlich die Nachfrage nach E-Motoren in elektrischen Fahrzeugen.

LEGENDE

- Schwere Nutzfahrzeuge (BEV)
- Leichte Nutzfahrzeuge (BEV)
- Pkw (Voll-HEV)
- Pkw (PHEV)
- Pkw (BEV)

QUELLE Eigene Modellierung

Öko-Institut, 2023

Nutzfahrzeuge interessant. NMC 811 hingegen wird vor allem für Mittelklasse und insbesondere Oberklasse Fahrzeuge (Pkw groß) verwendet. Dennoch soll Ankündigungen nach auch in diesem Bereich LFP nach und nach Einzug erhalten, besonders getrieben durch Fahrzeughersteller aus China.

Insbesondere in der Größenklasse Pkw klein wird eine starke Zunahme an LFP am Marktanteil prognostiziert (s. Abbildung 13). Der Anteil an NMC (NMC 111, NMC 622, NMC 811) nimmt bei den kleinen Pkws insgesamt ab und wird zunehmend von NMC 811 dominiert, während die Marktanteile des heute vielverwendeten NMC 622 stark abnehmen. In der Größenklasse Pkw mittel steigt der Anteil an LFP nicht ganz so stark an. Dafür spielen die nickelbasierten Systeme NMC 811 und NMC 622 eine größere Rolle. Bei der Größenklasse Pkw groß ist dieser Trend den Annahmen nach noch größer ausgeprägt. Bei den leichten Nutzfahrzeugen (LNF) wird LFP bereits viel verwendet und wird auch zukünftig den größten Anteil haben. NMC 622, welches aktuell den größten Anteil der Batterien ausmacht, nimmt deutlich ab und wird durch NMC 811 ersetzt.

Bei Lkws spielen ökonomische Faktoren aber auch höhere Anforderungen an die Speicherkapazität und Robustheit gegenüber einer Vielzahl von Ladevorgängen eine Rolle. Trotz der Kostenvorteile von LFP-Zellen gehen Branchenexperten daher insbesondere für schwere Lkw und Sattelzüge von einer weiterhin hohen Bedeutung von NMC-Zellen aus. Da zeitliche Trends für die gerade beginnende Elektrifizierung der Nutz-

fahrzeugflotten aus heutiger Sicht schwierig abzuschätzen sind, ist in den Annahmen keine zeitliche Änderung des Technologie-Mixes der Batteriechemien hinterlegt (vgl. TAB. 14 im ANHANG). Es wurde ein zunehmender Anteil von LFP angenommen, je leichter der LKW ist (von 50 Prozent bis 100 Prozent LFP-Anteil).

4.4. Permanentmagnete für Elektromobilität

Permanentmagnete kommen sowohl für Elektrofahrzeuge in Elektromotoren als auch in Windkraftanlagen in den Generatoren zum Einsatz (vgl. KAP. 4.2.). Da die Grundlagen der Generatoren schon zuvor beschrieben wurden, konzentriert sich dieses Kapitel auf den Einsatz von Permanentmagneten in Antriebsmotoren von Elektrofahrzeugen. In Fahrzeugen werden Permanentmagnete zwar nicht nur für den Antrieb benötigt¹³ (Rizos, V. et al., 2022). In Elektrofahrzeugen dominiert jedoch bei weitem der Bedarf für die Antriebsmotoren.

¹³ Weitere Anwendungen sind z. B. Servolenkungen, Fensterheber oder Lautsprecher. Daher sind auch konventionelle Fahrzeuge ein relevanter Einsatzbereich von Neodym-Eisen-Bor-Magneten. Eine Gegenüberstellung der Anteile unterschiedlicher Anwendungen findet sich beispielsweise in (Rizos, V. et al., 2022). Danach besteht ein breiter Konsens darüber, dass der Einsatz in elektrischen Fahrzeugantrieben und Windkraftanlagen die beiden am schnellsten wachsenden Anwendungsbereiche für Neodym-Eisen-Bor-Magnete sind.

Nachfrage nach Antriebsmotoren

Die Nachfrage nach Elektroantrieben und den darin verbauten Permanentmagneten ergibt sich aus den jährlichen Neuzulassungszahlen der Elektrofahrzeuge (vgl. KAP. 4.3.) sowie der Art, Anzahl und Antriebsleistung der Motoren. Ausführungen zu den angenommenen Motortechnologien und Leistungsklassen der Fahrzeuge sind im Abschnitt «Technologie-Mix» dargestellt. Abbildung 14 zeigt die auf dieser Basis berechnete jährliche Nachfrage nach Antriebsleistung für Neuzulassungen in Deutschland nach dem Szenario «KNDE2045» und für die Herstellung von Fahrzeugen in Deutschland basierend auf dem Szenario «Inlandsproduktion» (vgl. KAP. 4.3.).

Es wird deutlich, dass die Nachfrage nach Antriebsleistung aus dem Bereich der Elektromobilität wie bei den Batterien durch die Pkw dominiert wird, wobei die Pkw aus dem oberen Fahrzeugsegment bei den Neuzulassungen gut 50 Prozent der Gesamtnachfrage ausmachen; bei der Inlandsproduktion sind es sogar ca. 70 Prozent. Der Zubau an Motorleistung liegt für das Szenario «Inlandsproduktion» bis 2030 um etwa den Faktor 1,5 höher, langfristig sinken in Einklang mit dem Szenario «KNDE2045» die Pkw-Neuzulassungen in Deutschland, während für das Szenario «Inlandsproduktion» konstante Mengen bis 2045 angenommen werden (vgl. 4.3. Batterien für Elektromobilität). Der Anteil der leichten und schweren Nutzfahrzeuge erreicht erst ab 2030 relevante Anteile und steigt bis 2045 auf 16 Prozent der Gesamtnachfrage beim Szenario «KNDE2045» bzw. 11 Prozent beim Szenario «Inlandsproduktion». LNF und SNF liegen beim Szenario «KNDE2045» in der gleichen Größenordnung. Beiden Szenarien liegt eine vollständige Elektrifizierung der Neuzulassungen im Güterverkehr ab dem Jahr 2040 zugrunde (Pkw bereits ab 2035), wobei die Stückzahlen für Verbrenner-Lkw zwischen 2035 und 2040 nur noch sehr gering sind.

Technologie-Mix

Permanentmagnete werden bei den Elektroantrieben nur in permanent erregten Synchronmotoren (PMSM) eingesetzt. Ihr Marktanteil liegt im Pkw-Bereich jedoch aktuell bei 95 Prozent (ERMA; Gauß et al., 2021), da sich diese gegenüber anderen Motortypen durch eine höhere Leistungsdichte, sowohl im Hinblick auf das Gewicht als auch das Volumen, auszeichnen (REIA, 2022). Die wesentlichen kommerziellen Alternativen sind aktuell fremderregte Synchronmotoren (FESM) und Asynchronmotoren (ASM), die den Einsatz Seltenen Erden durch erhöhten Kupfereinsatz vermeiden. Neben einem etwas höherem Gewicht und Volumen ist dabei der Wirkungsgrad etwas geringer.¹⁴ Als weitere Alternativen werden Reluktanzmaschinen untersucht, die sich jedoch derzeit noch im Entwicklungsstadium befinden und mögliche Marktpotenziale für die Zukunft heute noch nicht seriös angenommen werden können (Agamloh, E. B. et al., 2020).

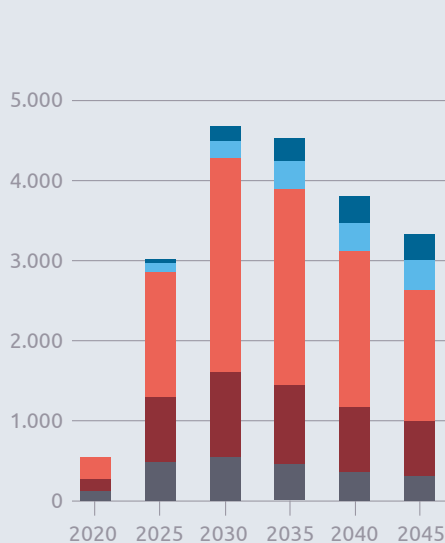
Prinzipiell können Permanentmagnete aus verschiedenen Metalllegierungen gefertigt werden, wobei die wesentlichen Vertreter Neodym-Eisen-Bor (NdFeB), Samarium-Kobalt, Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo) und Ferrit sind. In elektrischen Antriebsmotoren für Fahrzeuge hat sich jedoch der Neodym-Eisen-Bor-Magnet trotz seiner Abhängigkeit von Seltenen Erden klar durchgesetzt, da er den hohen Anforderungen durch seine besonders hohe Energiedichte am zuverlässigsten genügt (VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, 2014, Arnold Magnetic Technologies, 2023, Rizos, V. et al., 2022).

Für die vorliegende Studie wird daher für den Pkw-Bereich ein aktueller Anteil von 95 Prozent PMSM mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten angesetzt, und basierend auf (Gielen, D.; Lyons, M., 2022) und der Diskussion mit Experten aus der Magnet- und Automobilbranche angenommen, dass ihr Anteil bis 2045

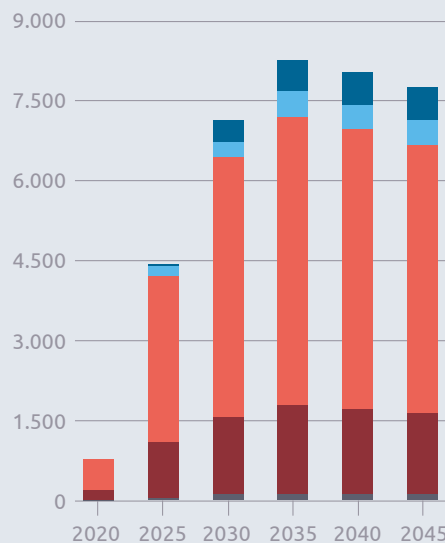
¹⁴ Nach Expertenangaben aus dem Bereich der E-Motorentwicklung (10th Annual Advanced E-Motor Technology 2023, München) sind ASM ca. 10-20 Prozent schwerer als PMSM, der Wirkungsgrad im Betrieb liegt bei ca. 90 Prozent (ASM) gegenüber 95 Prozent (PMSM). FESM liegen dazwischen.

ABB. 15 **Jährliche Nachfrage nach Permanentmagneten für Fahrzeugantriebe**

Szenario «KNDE2045» in t/a



Szenario Inlandsproduktion in t/a



Haupttreiber der steil zunehmenden Nachfrage an Permanentmagneten ist die Produktion von «großen» Pkw

LEGENDE

- Pkw klein
- Pkw mittel
- Pkw groß
- LNF (BEV)
- SNF (BEV)

QUELLE Eigene Modellierung

Öko-Institut, 2023 und (Nordelöf et al., 2017)

kontinuierlich moderat auf 80 Prozent zurückgeht. Da bei Lkw im Hinblick auf Batteriegröße, Reichweite und hohe Fahrleistungen der Wirkungsgrad sowie die Leistungsdichte eine noch größere Rolle spielen, wurde die Annahme getroffen, dass hier auch in Zukunft 100 Prozent Permanentmagnete bei den Antriebsmotoren zum Einsatz kommen. Vereinfachend wurde diese Annahme auch für leichte Nutzfahrzeuge (LNF), sowie im Pkw-Bereich für Hybridfahrzeuge¹⁵ übernommen.

Auf Basis der dieser Studie zugrunde gelegten Antriebsleistung für die verschiedenen Fahrzeuge (siehe TAB. 17 im ANHANG) und einem Permanentmagnetbedarf von ca. 12-13 g/kW (Nordelöf et al., 2017) ergibt sich damit die in Abbildung 15 dargestellte Nachfrage.

Wie bei der Antriebsleistung zeigt sich, dass die Nachfrage für das Szenario «Inlandsproduktion» mittelfristig ungefähr doppelt so hoch ist wie für die Neuzulassungen nach dem Szenario «KNDE2045». Bei den Neuzulassungen wird der Peak durch den sehr schnellen Hochlauf der Elektromobilität zur Erreichung der u. a. im Koalitionsvertrag festgelegten Klimaschutzziele bereits 2030 erreicht, danach sinken sie entsprechend der Neuzulassungen und dem Einsatz alternativer Motorkonzepte. Im

Szenario «Inlandsproduktion» wird die maximale Nachfrage 2035 erreicht und die Permanentmagnetnachfrage geht nur durch den Shift zu alternativen Motorkonzepten wie fremderregte Synchronmotoren (FESM) oder Asynchronmotoren (ASM) leicht zurück.

Den Berechnungen liegt eine Leistungsdichte von gut 2 kW/kg_{Motor} zugrunde. Basierend auf Experteninterviews ist die erzielbare Leistungsdichte in den letzten Jahren durch die Optimierung verschiedener physikalischer Parameter¹⁶ deutlich gestiegen, so dass heute ca. 4 kW/kg_{Motor} erzielt werden können, was eine entsprechende Reduktion des spezifischen Magnetmaterial-einsatzes beinhaltet. Allerdings ist die Umsetzung auch eine Frage der Kosten. Zudem ist im Markt ein Trend zu steigender Motorisierung, d. h. höheren Leistungen, zu beobachten. Insbesondere im oberen Pkw-Segment¹⁷ liegen schon heute die Leistungen teilweise deutlich über 200 kW. Die in dieser Studie zugrunde gelegten Leistungen für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen sind im Anhang – Anlage A aufgeführt. Da die Effekte der gegenläufigen Entwicklungen von Materialeffizienz

15 Keine Neuzulassungen ab 2035

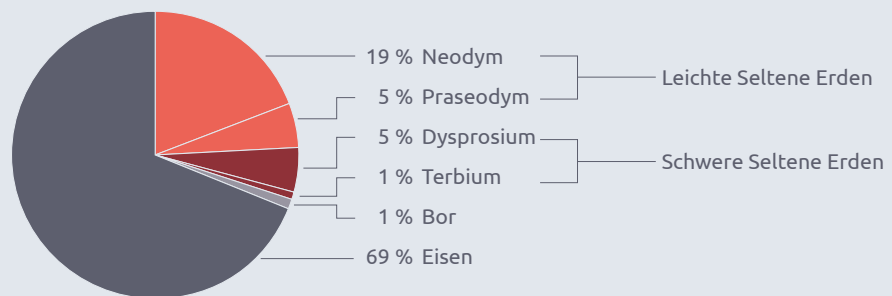
16 Z. B. Kreisspannung, Motordrehzahl, Kühlsystem, Magnetflusspfad

17 Ca. 50 Prozent Anteil am Bedarf für die Neuzulassungen (Szenario «KNDE2045») und ca. 70 Prozent Anteil am Bedarf für die Produktion (Szenario «Inlandsproduktion»)

ABB. 16 **Zusammensetzung der Neodym-Eisen-Bor-Magnete in permanent-erregten Synchronmotoren für Elektrofahrzeuge**

Eisen macht den größten Anteil an Permanentmagneten aus, die Seltenen Erden sind jedoch ausschlaggebend.

HINWEIS: Zusammensetzung «heutiger Wert» im Szenario «KNDE2045» nach (Buchert, 2019) und Expert*innenbefragung

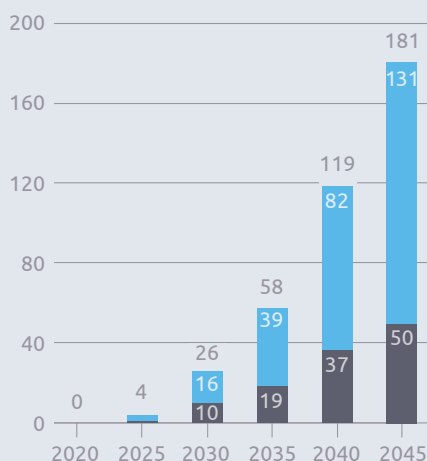


QUELLE: Eigene Darstellung

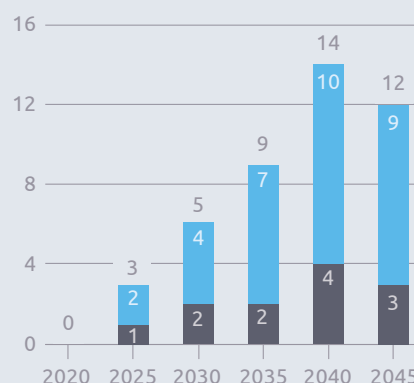
Öko-Institut, 2023

ABB. 17 **Elektrolyseure**

Bestand an Elektrolyseuren im In- und Ausland in GWel



Bruttozubau an Elektrolyseuren im In- und Ausland in GWel/Jahr



Ausbau der Elektrolyseleistung in Deutschland auf 10 GW bis 2030.

LEGENDE
■ Inland
■ Ausland

QUELLE: Eigene Berechnungen

Prognos, 2023

und steigender Motorisierung nicht quantifiziert werden konnten, wurden sie für die vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt. Es scheint jedoch sowohl in Bezug auf die Reduktion des spezifischen Materialeinsatzes als auch in Hinblick auf mögliche Einsparungen beim Einsatz von Schweren Seltenen Erden (s. folgender Absatz) Potenzial durch die Motorentwicklung zu geben. Diese steht jedoch vor der Herausforderung, die Vorgaben der Automobilhersteller zu erfüllen, die kleine, kompakte und preiswerte Motoren bei möglichst hoher Leistung fordern. Auch hinsichtlich der Designoptimierung scheint der Spielraum für die Zulieferer gering zu sein. So geben die OEMs (Original Equipment Manufacturer) üblicherweise den verfügbaren Raum

vor, in denen beispielsweise ein Elektromotor eingebaut werden kann.

Komponenten

Neodym-Eisen-Bor-Magnete bestehen neben Seltenen Erden zu gut zwei Dritteln aus Eisen sowie einer geringen Menge an Bor (ca. ein Prozent des Gewichts). Der verbleibende Anteil teilt sich in Leichte und Schwere Seltene Erden auf, wobei das Verhältnis je nach Anwendungsfall schwankt. Als Leichte Seltene Erde (LSE) kommt neben Neodym auch Praseodym zum Einsatz, da beide in natürlichen Vorkommen vergesellschaftet vorkommen und eine energieaufwändige Abtrennung

nicht nötig ist. Das gleiche gilt bei den Schweren Seltenen Erden (SSE) für Dysprosium und Terbium. Der Anteil an Schweren Seltenen Erden ist für die Temperaturbeständigkeit der Magnete notwendig und kann auch heute noch bis zu 10 Gewichtsprozent des Permanentmagneten betragen.¹⁸ Laut Experten könnten in Fahrzeugantrieben bei guter Kühlung bereits jetzt permanenterregte Synchronmotoren mit sehr geringen Anteilen an SSE (~0,4 Gewichtsprozent im Permanentmagnet) auskommen, wenn diese weniger kompakt gebaut werden müssten, d. h. größere Volumina und/oder geringere Leistungen umgesetzt werden könnten. REIA (REIA, 2022) geht von 28 Prozent LSE und 3,5 Prozent SSE aus. Für die vorliegende Studie wurde als realistischer aktueller Mittelwert die in Abbildung 16 dargestellte Zusammensetzung angesetzt.¹⁹

Da der Einsatz von Permanentmagneten in BEV aufgrund der damit verbundenen Vorteile (hoher Wirkungsgrad und Kompaktheit bei etwas geringerem Gewicht) voraussichtlich auf hohem Niveau bleiben wird, wird auch weiter an der Optimierung von Neodym-Eisen-Bor-Magneten geforscht. Der Anteil an Schweren Seltenen Erden (SSE) wurde bereits im letzten Jahrzehnt, ausgelöst durch die chinesischen Exportsperrung und den damit verbundenen drastischen Preisanstieg im Jahr 2011, durch technische Optimierung deutlich gesenkt. Für die Zukunft gehen Hersteller von Permanentmagneten für Elektromotoren davon aus, dass realistische Optimierungspotenziale zur Reduktion des Anteils an SSE noch bei etwa 25 Prozent Minderung gegenüber heute liegen.²⁰ Dies wurde für die vorliegende Studie berücksichtigt, indem eine entsprechende lineare Reduktion des Dysprosiumanteils bis zum Zieljahr 2045 berücksichtigt wurde. Für das Jahr 2045 ergeben sich daraus Anteile von 4,8 Prozent SSE, bei einem entsprechend erhöhten Anteil an LSE von 25,2 Prozent.

18 Expertenaussage im Rahmen der 10th Annual Advanced E-Motor Technology Februar 2023 in München

19 Nach (Buchert, 2019) und Expert*innenbefragung.

20 Expertenaussage im Rahmen der 10th Annual Advanced E-Motor Technology Februar 2023 in München, Furgeri (2021)

4.5. Elektrolyseure und Wasserstoffinfrastruktur

Grüner Wasserstoff ist eine zentrale Säule für die Erreichung der Klimaneutralität und wird überall dort eingesetzt, wo eine Elektrifizierung nicht möglich ist oder wo Wasserstoff für chemische Reaktionen benötigt wird. Das Herzstück für die Produktion von grünem Wasserstoff ist der Wasser-Elektrolyseur. Hier wird mit Hilfe von erneuerbarem Strom und Wasser Wasserstoff produziert.

Nachfrage: 10 GW Elektrolysekapazitäten bis 2030

Der Bedarf an Elektrolyseanlagen wächst mit dem Einsatz von grünem Wasserstoff ab 2025 stark an. Wasserstoff kommt im treibhausgasneutralen Deutschland vorwiegend in den Bereichen Absicherung des Strom- (und Fernwärme-)systems und der Stahl- und Chemieindustrie zum Einsatz. Der Bedarf an Wasserstoff (ohne direkt genutzte Derivate) wächst in dem hier berechneten Szenario auf etwa 265 TWh (Heizwert) im Jahr 2045 an.

Es wird angenommen, dass etwa ein Drittel des Wasserstoffs im Inland erzeugt werden kann und etwa zwei Drittel importiert werden muss. Neben der direkten Nutzung als Energieträger kommt Wasserstoff auch für die Synthese strombasierter Kohlenwasserstoffe (Power-to-Liquid, PtL) zum Einsatz, die dem «KNDE2045»-Szenario nach im Jahr 2045 in einem Umfang von 158 TWh in Form von Methanol, grünem Naphtha und anderen Fischer-Tropsch-basierten Kohlenwasserstoffen vollständig importiert werden müssen.

Der Hochlauf der notwendigen Elektrolysekapazität ergibt sich unter Annahme mittlerer Elektrolyse-Vollbenutzungsstunden von 3.000 h im In- und 4.500 h im Ausland. Für das Szenario «KNDE2045» werden der Hochlauf und der jährliche Zubau in Abbildung 17 dargestellt.

Im Jahr 2025 ist diesem Szenario nach für die inländische Wasserstoffproduktion das erste Gigawatt Elektrolysekapazität in Deutschland installiert, im Jahr 2030 bereits zehn GW. Dieser Wert entspricht der Zielmarke der nationalen Wasserstoffstrategie (BMW, 2023b).

4. Zubaupfade von Schlüsseltechnologien

4.5. Elektrolyseure und Wasserstoffinfrastruktur

Bis zum Jahr 2045 wächst die in Deutschland installierte Kapazität in diesem Szenario auf 50 GW an. Für die Produktion der Wasserstoff- und PtL-Importe sind weitere rund 130 GW Elektrolyse im Jahr 2045 im Ausland notwendig, davon rund 60 GW für Wasserstoff-Direktnutzung und rund 70 GW für die PtL-Produktion.

Um diese Kapazitäten aufzubauen, sind mittlere Zubauraten in der Größenordnung von 2,5 Gigawatt Elektrolysekapazität pro Jahr in Deutschland und 6,5 Gigawatt im Ausland in den Jahren 2025 bis 2045 nötig, wobei die Zubauraten in den Jahren 2040 bis 2045 ihr Maximum erreichen.

Komponenten und Technologien

Es gibt verschiedene Arten von Wasserelektrolyseuren: Alkalische Elektrolyse (AEL), Polymerelektrolytmembranelektrolyse (PEMEL), Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) und Anionen-Austauschmembranelektrolyse (AEM). Das grundlegende Prinzip ist jedoch bei allen gleich: Durch Anlegen einer Gleichspannung an zwei Elektroden wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Die Technologien unterscheiden sich aber bezüglich Entwicklungsstand, Aufbau, Materialeinsatz und technischen Eigenschaften:

- **Alkalische Elektrolyse (AEL):** Die AEL ist die älteste und seit Jahrzehnten etablierte Elektrolysetechnologie, im Maßstab mehrerer MW verfügbar und marktreif. Die Alkalische Elektrolyse kommt ohne kritische Materialien²¹ aus und ist dadurch vergleichsweise kostengünstig, benötigt allerdings auch viel Platz (geringe Leistungsdichte), ist vergleichsweise träge und nur eingeschränkt teillastfähig und dadurch weniger geeignet auf flexibles Stromdargebot zu reagieren.

21 In der AEL kommt Kalilauge als Elektrolyt zum Einsatz, die Hydroxid-Ionen (OH⁻) als Ladungsträger zur Verfügung stellt. Kathode und Anode auf Nickelbasis werden durch ein für Wasserstoff und Sauerstoff undurchlässiges Diaphragma (Zirkoniumoxidmaterialien) getrennt. Liegt Spannung an, bilden sich an der Kathode Wasserstoff und Hydroxidionen, die durch das Diaphragma passieren können und an der Anode wieder zu Wasser rekombinieren, wobei Sauerstoff entsteht.

- **Polymerelektrolytmembranelektrolyse (PEMEL):** Die PEMEL, auch Protonenaustauschmembran-Elektrolyse, ist die zweite marktreife Elektrolysetechnologie²², aber noch deutlich jünger als die AEL. An der Anodenseite ist die PEMEL stark oxidativ und damit auch korrosiv. Die Anode wird deshalb mit dem korrosionsresistenten Iridiumoxid als Katalysator beschichtet. Darüber hinaus wird Platin auf der Kathodenseite und als dünne Schicht auf den Bipolarplatten zur Reduktion des elektrischen Widerstandes eingesetzt. Aufgrund der Platinmetalle ist die PEMEL vergleichsweise teuer, hat aber aufgrund höherer Stromdichten und dem laugenfreien Verfahren eine höhere Leistungsdichte und außerdem ein flexibleres Lastverhalten.
- **Hochtemperaturelektrolyse (HTEL):** auch Festkörperoxid-Elektrolyse²³. Sie enthält die Elemente Yttrium und/oder Scandium. Die Hochtemperaturelektrolyse ist bereits im dritten Jahrzehnt ihrer Entwicklung und verschiedene Pilotanlagen befinden sich in industrieller Erprobung, sodass die Entwicklung zur Marktreife kurzfristig erwartbar ist. Hauptvorteil der HTEL ist die hohe Effizienz. Aufgrund des Bedarfs an Hochtemperaturwärme von über 700 °C sind die Anwendungsgebiete aber beschränkt und das Kaltstart- sowie Teillastverhalten vermutlich

22 In der PEMEL kommt eine polymerbasierte Festelektrolytmembran zum Einsatz, die für Protonen (positiv geladene Wasserstoff-Ionen, H⁺) aber nicht für die Gase Wasserstoff und Sauerstoff durchlässig ist. Durch elektrische Spannung wird an der Anode Sauerstoffgas erzeugt, das Wasserstoffion wandert durch die Membran zur Kathodenseite, wo Wasserstoffgas gebildet wird

23 In der HTEL kommt ein Sauerstoff leitender Feststoffelektrolyt zum Einsatz. Durch das hohe Temperaturniveau, bei dem die Hochtemperaturelektrolyse arbeitet (>700 °C), kann der elektrische Energieeinsatz für die Wasserspaltung reduziert werden und dadurch sehr hohe elektrische Wirkungsgrade erreicht werden. Durch die elektrische Spannung zerfällt Wasserdampf an der Kathode in Protonen und Sauerstoffionen. Die Sauerstoffionen wandern durch den Festelektrolyten zur Anode und bilden dort durch Elektronenabgabe Sauerstoff, die Protonen bilden an der Kathode durch Elektronenaufnahme Wasserstoff.

TAB. 01 **Überblick über die vier zentralen Elektrolyseverfahren**

PEMEL hat gegenüber der heute gängigen AEL den entscheidenden Vorteil, dass sie sehr effizient ist und sehr flexibel gefahren werden kann. Gerade in Stromsystemen mit fluktuierenden Erneuerbaren Energien ist dieses entscheidend. Nachteilig ist der Bedarf an Iridium.

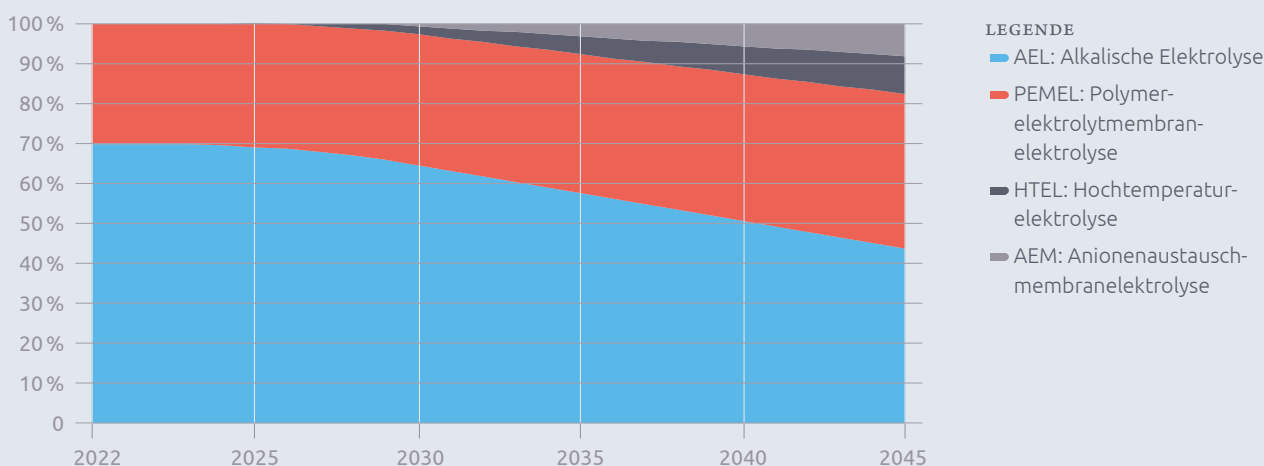
Elektrolyseverfahren	Technologische Reife	Vorteile	Nachteile
Alkalische Elektrolyse (AEL)	ausgereift	relativ kostengünstig, keine kritischen Rohstoffe, hohe Langzeitstabilität	geringe Leistungsdichte, Trägheit, Teillastverhalten, Kalilauge als Elektrolyt (korrosiv, ätzend)
Polymerelektrolytmembranelektrolyse (PEMEL)	ausgereift	hohe Flexibilität und große Leistungsdichte bei hoher Effizienz, hohe Gasreinheit	benötigt Platingruppenmetall Iridium (sehr kritisch) sowie Titan und Platin
Hochtemperaturelektrolyse (HTEL)	Pilotstatus	sehr hohe Effizienz bei Verfügbarkeit von Hochtemperaturwärme	Seltenerdmetalle Scandium und Yttrium, Hochtemperaturwärmebedarf (>700 °C) ist nicht für alle Anwendungen geeignet
Anionenaustauschmembranelektrolyse (AEM)	Entwicklung	vereint Vorteile von AEL und PEMEL, keine kritischen Materialien	noch nicht marktreif, fehlende Erfahrungswerte, noch zu hoher Energiebedarf

QUELLE Eigene Berechnungen

Prognos, 2023

ABB. 18 **Technologiemix Elektrolyseure**

Rund 70 Prozent der heutigen Elektrolyseure sind AEL. Der Anteil der PEMEL beträgt heute 30 Prozent und steigt sukzessive an. PEMEL benötigen Iridium.



QUELLE Eigene Berechnungen

Prognos, 2023

4. Zubaupfade von Schlüsseltechnologien

4.5. Elektrolyseure und Wasserstoffinfrastruktur

nicht optimal für die Kombination mit erneuerbarer Stromerzeugung geeignet.

- Die **Anionenaustauschmembranelektrolyse (AEM)** ist eine junge Elektrolysetechnologie und noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Sie verspricht die Vorteile der PEMEL und der AEL zu verbinden, also hohe Flexibilität und Leistungsdichte bei hoher Langzeitstabilität, geringen Kosten und ohne den Einsatz kritischer Materialien. Eine AEM entspricht im Wesentlichen einer PEMEL mit dem entscheidenden Unterschied, dass ein alkalischer Festelektrolyt den Transport von Hydroxid-Ionen (OH⁻) ermöglicht.²⁴ Die AEM kommt ohne kritische Materialien aus, benötigt aber noch weitere Entwicklungsarbeit bis zur Marktreife, u. a. im Hinblick auf die Katalysatorentwicklung zur Reduktion des Energiebedarfes.

Tabelle 1 stellt die Eigenschaften der verschiedenen Technologien gegenüber.

Technologie-Mix: Anteil der PEM-Elektrolyseure steigt langsam an

Im hier berechneten Szenario wird eine Annahme zur Entwicklung der Technologieverteilung getroffen, ausgehend von der heutigen Technologieverfügbarkeit und der Perspektive zur weiteren Entwicklung. Abbildung 18 stellt die angenommene Entwicklung des Technologieanteils im jährlichen Elektrolysezubau dar.

Gegenwärtig sind ausschließlich AEL und PEM-Elektrolyse mit relevanten und wachsenden Fertigungskapazitäten marktverfügbar mit einem Anteil von ca. 70 Prozent der Fertigungskapazität bei AEL und ca. 30 Prozent bei PEMEL, letztere mit wachsender Tendenz. Dieser Trend wird fortgeschrieben. Zusätzlich werden ab 2026 langsam wachsende Anteile an Hochtemperaturelektrolyse und ab 2028 auch der Anionen-

Austauschmembranelektrolyse im Elektrolysezubau angenommen, sodass bis zum Jahr 2045 der jährliche Zubau auf folgende Verteilung der Elektrolysetechnologien hochläuft: 41 Prozent AEL, 39 Prozent PEMEL, elf Prozent HTEL und neun Prozent AEM.

Wasserstoff(-infrastruktur)

Für viele Bereiche, wie z.B. beim Stahl, ist der Einsatz von Wasserstoff eine zentrale Maßnahme zur Dekarbonisierung. Wie die benötigten Mengen rechtzeitig bereitgestellt werden können, ist eine zentrale Herausforderung. Das Thema wird seitens der Bundesregierung über die «Nationale Wasserstoffstrategie» begleitet und in verschiedenen Studien untersucht und ist deshalb nicht Untersuchungsgegenstand dieser Studie.

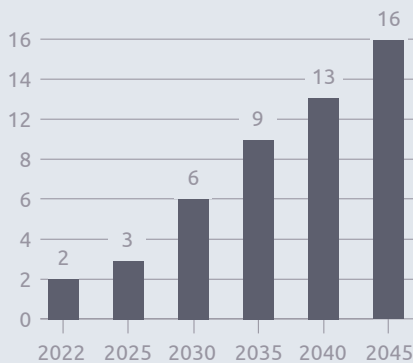
Hierbei ist zu beachten, dass zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft neben der Bereitstellung von Wasserstoff auch der Aufbau der Infrastruktur für die Verteilung und Zwischenspeicherung der Wasserstoffmengen eine zentrale Voraussetzung ist. Dazu gehören ein Fernleitungsnetz zur überregionalen Verteilung, ein Verteilnetz zum Anschluss der relevanten Verbraucher, Verdichter zum Aufbringen der Transportenergie, Kavernenspeicher für die Zwischenspeicherung, sowie Importterminals und Anbindungen an noch zu errichtende Importpipelines.

Engpässe können sich vor allem aufgrund des zeitlichen Hochlaufs ergeben, wie z.B. bei den Kapazitäten zum Neubau von Kavernenspeichern oder der Aufbau der Erzeugungs-, Transport- und Importkapazitäten. Bei den Verdichtern könnten sich Engpässe ergeben, da Verdichter zum Transport so großer Wasserstoffmengen bisher nicht existieren und die aktuellen Erdgasverdichter nicht für 100 Prozent Wasserstoff geeignet sind (Adam, Engelshove, Thiemann, Heunemann, & von dem Bussche, 2020). Die Kritikalität beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur muss detaillierter untersucht werden.

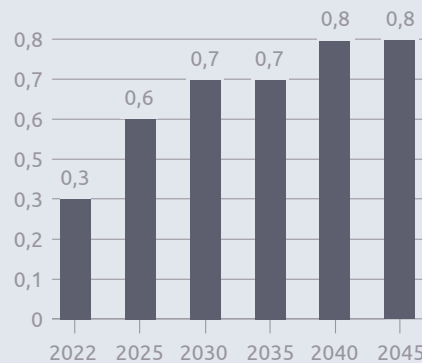
²⁴ Durch die elektrische Spannung wird an der Kathode Wasserstoff gebildet, der durch die Gasdiffusionsschicht abgeleitet wird. (OH⁻)-Ionen wandern durch die Membran zurück zur Anode, wo sie mit Wasserstoffatomen wieder zu Wasser rekombinieren, wobei Sauerstoff entsteht, der durch die Gasdiffusionsschicht abgeleitet wird.

ABB. 19 **Wärmepumpen**

**Bestand an Wärmepumpen
in Millionen Stück pro Jahr**



**Bruttozubau an Wärmepumpen
in Millionen Stück pro Jahr**



Im Jahr 2030 sollen rund sechs Millionen Wärmepumpen installiert sein. Zur Erreichung der Ziele sind nach 2025 700.000 neue Wärmepumpen pro Jahr notwendig.

QUELLE Eigene Berechnungen

Prognos, 2023

4.6. Wärmepumpen

Nachfrage: jährlicher Zubau muss sich ab 2025 auf 700.000 Anlagen erhöhen

Wärmepumpen sind neben der Nah- und Fernwärme die wesentliche Schlüsseltechnologie für die Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudebereich. Etwa 75 Prozent der 43 Millionen Wohnungen in Deutschland werden aktuell mit Erdgas oder Öl geheizt. Die bestehenden etwa 1,3 Million Heizungswärmepumpen haben im Gebäudebestand bisher nur einen Anteil von drei Prozent. Das Ziel der Bundesregierung ist es, bis 2030 die Anzahl der Wärmepumpen auf sechs Millionen zu steigern. Auf dem 2. Wärmepumpengipfel Ende 2022 hat sich ein Bündnis aus u. a. Politik, Wissenschaft, Handwerk und der Heizungsindustrie zu dem Ziel bekannt, bereits im Jahr 2024 500.000 neue Wärmepumpen einzubauen. Ab 2025 ist ein mittlerer jährlicher Zubau von etwa 700.000 Geräten notwendig, um bis Ende des Jahres 2030 im Bestand sechs Millionen Geräte zu erreichen. Dies wäre eine deutliche Steigerung im Vergleich zum bisherigen Markthochlauf, von 236.000 Geräten im Jahr 2022 und unter 100.000 Geräten im Mittel der letzten zehn Jahre.

Komponenten

Eine Wärmepumpe besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Verdichter (Kompressor) mit Elektromotor (inkl. Ansteuerung und Regelung)

- Wärmetauscher
- Umwälzpumpe mit Elektromotor
- Rohrleitungen
- Ventile
- Gehäuse
- Kältemittel

Technologie-Mix

Es gibt verschiedene Wärmepumpen-Technologien. Luft-Wasser-Wärmepumpen haben mit über 90 Prozent den größten Anteil am Markt. Bei den seltener genutzten Wasser-Sole und Grundwasserwärmepumpen wird Umweltwärme über flächig verlegte Wärmetauscher (Sole) oder Bohrungen (Grundwasser) erschlossen.

Darüber hinaus unterscheiden sich die Wärmepumpen nach den Motoren in den Kompressoren und den Umlaufpumpen. Hier ist zu unterscheiden zwischen Asynchronmotoren und Synchronmotoren, wobei letztere das magnetische Feld entweder strominduziert aufbauen oder mit Hilfe eines Permanentmagneten. Der Einsatz von Permanentmagneten führt zu einer höheren Effizienz der Anlagen. Das heißt, zur Deckung des Wärmebedarfs ist bei diesen Anlagen weniger Strom notwendig. Eine zahlengestützte Aufteilung der Motoren nach Technologien liegt nicht vor. Es ist aber davon auszugehen, dass der Anteil der Wärmepumpen mit Permanentmagneten aus Effizienzgründen steigen wird.

4.7. Stahl

Nachfrage

In Deutschland wurden im Mittel in den letzten 20 Jahren jedes Jahr zwischen 35 und 40 Millionen Tonnen Stahl-Halbfertigprodukte nachgefragt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Walzstahl-, Stahlguss- und Schmiede-Produkte, die von Industriebranchen in Deutschland wie der Bau- und Automobilindustrie weiterverarbeitet werden. Die hiermit korrespondierende Rohstahlnachfrage liegt aufgrund der Verluste beim Umformen etwas höher und liegt in etwa auf dem Niveau der Produktion in Deutschland, d. h. die Netto-Handelsbilanz Deutschlands in Bezug auf Stahlprodukte ist in etwa ausgeglichen. Andere EU-Länder weisen dagegen teilweise inzwischen deutliche Importüberschüsse aus, so dass die Bilanz der EU insgesamt seit Mitte der 2010er Jahre ein Handelsdefizit ausweist.

Der in Deutschland hergestellte Stahl stammt zu 70 Prozent (28 Millionen Tonnen) aus der Primärstahlroute, wo heute in Hochöfen aus Eisenerzen und Koks-Eisen produziert und im Sauerstoffblasverfahren weiter – unter Zugabe von bis zu 20 Prozent Schrott – zu Stahl verarbeitet wird. Die restlichen 30 Prozent (12 Millionen Tonnen) entfallen auf die Elektrolichtbogenroute (electric arc furnace, EAF), durch die Stahl mit dem Einschmelzen von Stahlschrott produziert wird. Um Verunreinigungen im Schrott auszugleichen, wird bereits heute etwa knapp eine Million Tonnen direktreduziertes Eisen (DRI) eingesetzt, um auch im EAF höhere Stahlqualitäten zu erzielen. In Hamburg wird die derzeit einzige kommerzielle DRI-Anlage in Europa betrieben. Darüber hinaus importieren Deutschland und andere Länder (v. a. Italien und Spanien) aber bereits auch heute schon DRI aus Ländern außerhalb der EU (in der Vergangenheit v. a. aus Russland).

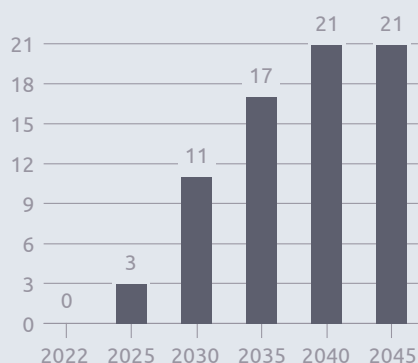
In Deutschland gibt es vier Unternehmen, die Primärstahl erzeugen. Darunter sind mit thyssenkrupp steel, Salzgitter und Saarstahl drei deutsche Unternehmen, die im globalen Maßstab zu den kleinen Unternehmen gehören. Als einziger Global Player ist ArcelorMittal²⁵ in Deutschland vertreten. Diese Unternehmen weisen mit ihren 15 Hochöfen (davon einer derzeit in Reserve) zusammen eine Produktionskapazität von 33 Millionen Tonnen Roheisen und 35 Millionen Tonnen Rohstahl pro Jahr auf (Datenbank des Wuppertal Instituts zu Produktionsanlagen). Der Großteil der Hochöfen wurde in den 1970er und 1980er Jahren gebaut und erreicht in den nächsten fünf bis zehn Jahren das Ende der so genannten Hochofenreise, nach der zumindest die Ausmauerung erneuert werden müsste, was mit einem mehrwöchigen Anlagenstillstand und einer je nach Hochofengröße zwei- oder dreistelligen Millionen-Investition verbunden wäre. Dieses Investitionszeitfenster soll genutzt werden, um die Eisenerzeugung auf DRI-Schachtöfen umzustellen, in denen statt Koks und Kohle klimaneutral erzeugter Wasserstoff (oder vorübergehend noch Erdgas) eingesetzt werden soll. Zu dieser Technologieumstellung gehört auch die Errichtung von EAF oder sogenannten Einschmelzern, mit denen das in DRI-Anlagen erzeugte Zwischenprodukt (Eisenschwamm, HBI) weiterverarbeitet wird.

Nach aktuellen Analysen von Agora Industrie und dem Wuppertal Institut stünde knapp 40 Prozent der deutschen Hochofenkapazität bis 2029 zur Reinvestition an, die restlichen 60 Prozent bis 2035, was gegenüber dem in Abbildung 20 dargestellten Szenario «KNDE2045» noch einmal eine Beschleunigung des Reinvestitionszyklus bedeuten würde. Derzeit sind DRI-Kapazitäten in Höhe von knapp 15 Millionen Jahrestonnen (jato) in Deutschland bis 2030 in Planung (Agora Energiewende, o. J.), was sechs Anlagen im derzeitigen World-Scale-Format entspricht und sogar etwas über den Hochofenabgängen bis 2030 in Höhe von 13 Millionen Jahrestonnen liegt. Auch aufgrund

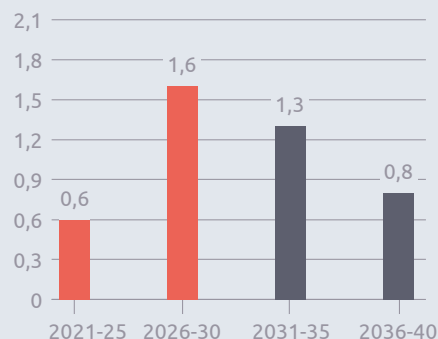
25 Im Bereich der Sekundärstahlproduktion sind außerdem mehrere mittelständische Unternehmen vertreten, die teilweise auch international aufgestellt sind und ihren Sitz im Ausland haben.

ABB. 20 **DRI-Schachtöfen**

**Bestand an DRI-Schachtöfen
in Millionen Jahrestonnen DRI**



**Bruttozubauf (Jährlicher Mittelwert)
an DRI-Schachtöfen in Millionen
Jahrestonnen DRI**



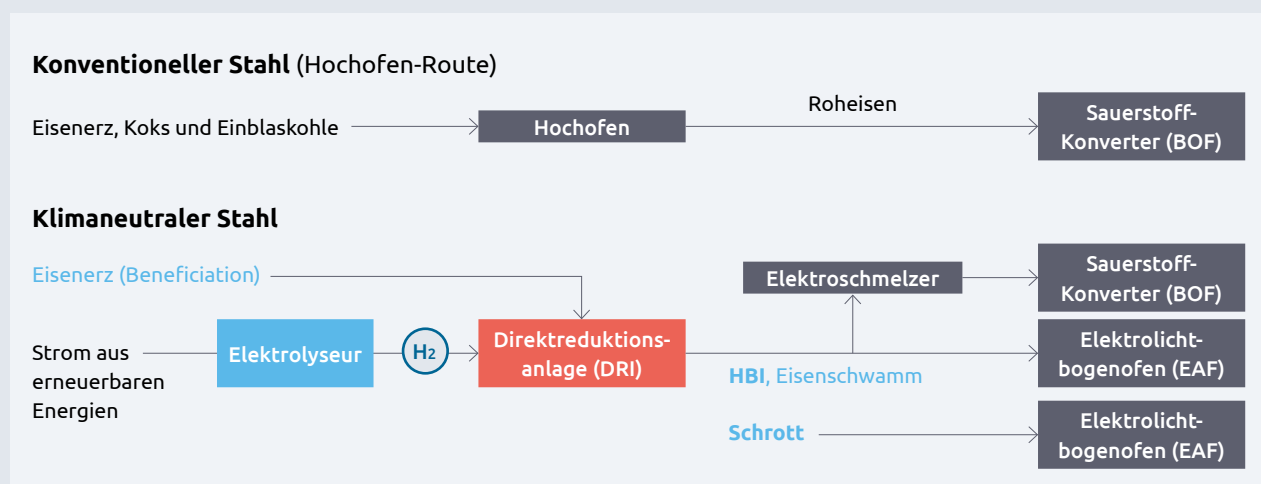
Der größte Teil des Zubaus an DRI-Schachtöfen erfolgt bis 2030, da in diesem Zeitraum viele Hochofen aus den 1970er und 1980er Jahren das Ende der Hochofenreise erreichen.

QUELLE Eigene Berechnungen

Wuppertal Institut, 2023

ABB. 21 **Verfahren zur Produktion von konventionellem und klimaneutralem Stahl**

Direktreduktionsanlagen (DRI-Schachtöfen), in denen Eisenerze mit Hilfe von Wasserstoff (oder Erdgas) reduziert werden, sind der Ausgangspunkt für die Produktion von grünem Stahl



LEGENDE Beneficiation: Anreicherung von eisenarmen Erzen und Pelletierung; HBI: hot briquetted Iron – Eisenschwamm, der erhitzt und brikettiert wird. Er kann gut transportiert und gelagert werden.

QUELLE Eigene Darstellung

Wuppertal Institut, 2023

der Möglichkeit, den Eisenschwamm bzw. HBI-Bedarf durch höhere Schrottanteile zu reduzieren, ist es aktuell unklar, ob dieses Projektvolumen bis 2030 vollständig realisiert werden kann. Mit Blick auf die bisherige Genehmigungs- und Umsetzungsgeschwindigkeit sowie die Konkurrenz um die Kapazitäten im Anlagenbau ist ein Volumen zwischen sieben und elf Mio. Jahrestonnen bis zum Jahr 2030 aus heutiger Sicht wahrscheinlicher. Über die DRI-Projekte hinaus ist ein Umbau der

Stahlproduktionskapazitäten zentral. Um diese auch nach 2035 in Deutschland sicherzustellen, ist bis dahin die Installation zusätzlicher Elektrolichtbogenöfen notwendig. Gegenüber heute dürfte eine zusätzliche Kapazität von etwa 25 Mio. Jahrestonnen nötig sein, um sowohl die DRI-Route vollständig zu etablieren als auch den Sekundärstahlanteil deutlich zu erhöhen.

Komponenten und Anlagen

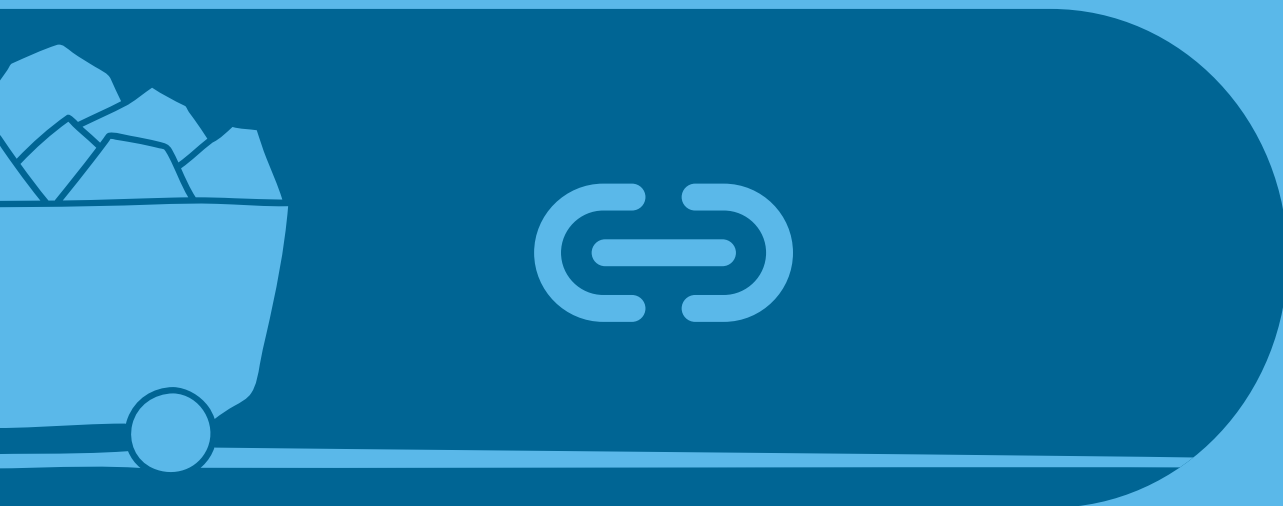
Seit den 1960er Jahren wurde Primärstahl in Europa hauptsächlich über die sogenannte Hochofen-L/D-Konverterroute hergestellt. Hierbei wird aus Eisenerzen im Hochofen zunächst Roheisen hergestellt. Um diese Reduktion zu erzielen, wird Koks und Einblaskohle als Reduktionsmittel eingesetzt, bei ihrer Oxidation entstehen im wesentlichen CO und CO₂. Der Hochofenkoks muss vorher in Kokereien aus besonders hochwertiger, d. h. kohlenstoffreicher, Kohle hergestellt werden. Im Hochofen wird das Roheisen durch die sehr hohen Temperaturen aufgeschmolzen und danach (noch in der Flüssigphase) im L/D-Konverter unter Zugabe von Sauerstoff zu Stahl weiterverarbeitet und dabei oder hernach legiert. Dabei wird zur Kühlung auch bis zu 20 Prozent (in der Regel hochreiner Produktions-)Schrott eingesetzt. Nach der Stahlherstellung im Konverter (oder auch im EAF) wird der Stahl je nach gewünschter Weiterverarbeitung direkt in Brammen, Knüppel oder Blöcke gegossen. Der überwiegende Teil der Weiterverarbeitung geschieht durch das Umformen in Warmwalzprozessen zu Blechen, Trägern, Draht oder Stäben. V. a. Feinbleche und Draht stellen hohe Ansprüche an die Reinheit des Stahls im Hinblick auf eine niedrige Kupfertoleranz. Da Kupfer aufgrund der nur relativ groben Sortierung in zunehmendem Maße in Stahlschrotten enthalten ist, wird der nahezu kupferfreie Primärstahl vor allem zur Herstellung der Halbfertigprodukte Feinblech und Draht verwendet.

Um Primärstahl klimaneutral zu produzieren, wird das Reduktionsmittel Koks bzw. Kohle durch Wasserstoff ersetzt. Bei der sogenannten Direktreduktion von Eisenerz mit Wasserstoff reagiert im sogenannten DRI-Schachtofen das sauerstoffhaltige Eisenerz mit Wasserstoff zu Eisenschwamm und Wasser (vgl. ABB. 21). Eisenschwamm ist ein poröses Material mit einem Eisengehalt von über 92 Prozent. Wird dieser erhitzt und brikettiert kann er als HBI (hot briquetted iron) gut transportiert und gelagert werden. Eisenschwamm und HBI enthalten jedoch noch unerwünschte Gangarten sowie ggf. Kohlenstoff. Um diese zu entfernen, ist ein weiterer Aufbereitungsschritt notwendig: Entwe-

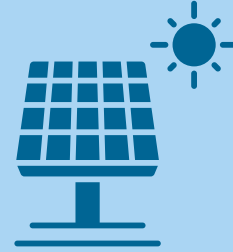
der kann der Eisenschwamm direkt im Elektrolichtbogenofen aufgeschmolzen und zu Stahl veredelt werden, oder alternativ zunächst in einem Elektro-Schmelzer verflüssigt und mit Kohlenstoff angereichert und dann im Konverter zu Stahl verarbeitet werden. Die zweite Route über den Konverter hat den Vorteil, dass die bestehenden Anlagen aus der Hochofenroute noch weiterverwendet werden können und damit auch das gesamte Produktspektrum heutiger Stähle hergestellt werden kann. Zudem können auch geringerwertigere Erze verwendet werden, weil eine gewisse Nachreduktion im Elektro-Schmelzer möglich ist, zum Preis eines noch höheren Kohlenstoffbedarfs. Das macht auch den zentralen Nachteil der Konverterroute aus: In Richtung Klimaneutralität wird ein relativ aufwändiges Kohlestoffmanagement erforderlich mit einem Einsatz von biogenen Quellen, Kohlenstoffrecycling oder auch CO₂-Abtrennung und Einspeicherung (CCS).

Die deutschen Stahlproduzenten haben hierzu für die erste Welle der Transformation ein klares Bild. Während thyssenkrupp am Sauerstoff-Blasstahlverfahren im Konverter festhalten möchte, um alle bisherigen Stahlqualitäten bedienen zu können, sollen in den anderen Standorten Elektrolichtbogenöfen eingesetzt werden. In beiden Verfahren kann alternativ auch bis zu 100 Prozent Schrott eingesetzt werden.

5. Kritische Lieferketten

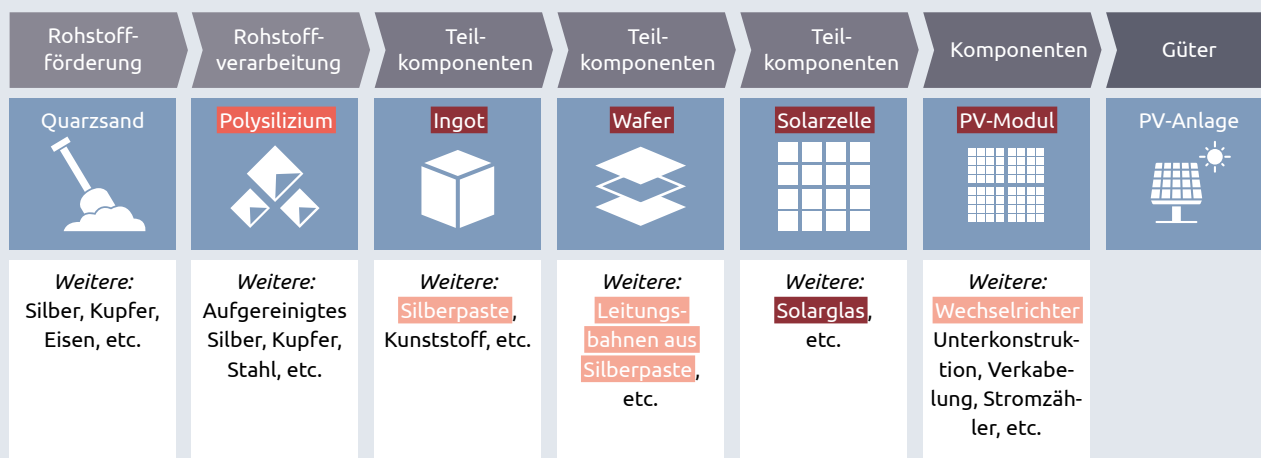


5.1. Photovoltaik



- Die Produktion von Wafer-basierten Photovoltaikmodulen aus Silizium wird entlang der gesamten Lieferkette von China dominiert. Polysilizium, Ingots, Wafer, Solarglas, Zellen, Wechselrichter und Module: In allen Stufen der Lieferkette hat China einen Marktanteil von mindestens 73 Prozent.
- Bei der Produktion von Polysilizium liegt Chinas Marktanteil bei etwa 79 Prozent, jedoch gibt es mit *Wacker Chemie* in Deutschland den einzigen europäischen Produzenten mit einer Fertigungskapazität von 20 GW pro Jahr.
- Am höchsten ist die Kritikalität bei der Produktion von Ingots und Wafern. Hier weist China einen Marktanteil von 97 Prozent auf. Es gibt nur sehr geringe Kapazitäten (weniger als 2 GW) in Europa. Ebenso kritisch ist die Modulproduktion, hier wird der Markt zu 75 Prozent von China dominiert.
- Es ist zu erwarten, dass sich die Marktkonzentration noch weiter verschärfen wird, da in China derzeit massive Fertigungskapazitäten entlang der gesamten Lieferkette aufgebaut werden.

ABB. 22 **Lieferkette zur Herstellung Wafer-basierter Photovoltaik-Anlagen**
Sehr hohe Kritikalität bei Ingots, Wafern, Solarglas, Solarzellen und PV-Modulen.



LEGENDE Kritikalität: ■ Sehr kritisch ■ Mittel kritisch ■ Mäßig kritisch QUELLE Eigene Darstellung

Prognos, 2023

Im Kapitel 5 werden nun für die priorisierten Schlüsseltechnologien die Versorgungsrisiken untersucht. Die Versorgungsrisiken entstehen zum einen durch eine hohe Konzentration des Angebots auf wenige Lieferländer oder Unternehmen. Zum anderen können Versorgungsengpässe durch kurz- und mittelfristige Nachfrageüberhänge entstehen (vgl. KAP. 3). Bei der Analyse hier stehen nicht nur die dafür benötigten Rohstoffe im Fokus, sondern die gesamte Lieferkette – von der Förderung der Rohstoffe, über deren Verarbeitung, bis hin zur Produktion von Teilkomponenten, Komponenten und ganzen Gütern.

In diesem Kapitel wird darüber hinaus aufgezeigt, wie hoch der ermittelte Bedarf an kritischen Rohstoffen für die Transformation des deutschen Energiesystems von heute bis 2045 ist.

Vom Quarzsand bis zur Photovoltaik-Anlage

Ausgangspunkt für die Produktion von Wafer-basierter PV-Anlagen ist der Rohstoff Quarzsand (Siliziumdioxid). Dieser wird zunächst geschmolzen und gereinigt. Das hierbei entstehende hochreine Polysilizium wird in einen säulenförmigen Block gezogen, den sogenannten Ingot, welcher anschließend in dünne Scheiben (Wafer) gesägt wird. Der Weiterverarbeitung der Wafer zu Solar-Zellen, unter anderem durch das Aufbringen von Leitungsbahnen aus Silberpaste, folgt die abschlie-

ßende Modulfertigung (IEA, 2022a; solarenergie.de, 2021b). Hierbei kommen Solarglas, Trägerkonstruktionen sowie Wechselrichter samt Verkabelung zum Einsatz (DENA, 2022). Abbildung 22 zeigt die wichtigsten Schritte der Lieferkette im Überblick.

Lieferkette: Sehr hohe Kritikalität bei Ingots, Wafern und Zellen und Modulen

Für die Photovoltaik liegt die Kritikalität mit Ausnahmen, wie z. B. Silber, weniger bei den verwendeten Rohstoffen, sondern bei der nachgelagerten Lieferkette der (Teil-)Komponenten. Entlang der gesamten Kette dominiert China zurzeit die Weltmarktproduktion. Aktuell liegt der Marktanteil chinesischer Unternehmen auf allen Stufen der Lieferkette zwischen 73 und 97 Prozent (IEA, 2021b; Statista, 2022). Die Länderkonzentration könnte noch weiter steigen, da China massiv in neue Fertigungskapazitäten investiert. Für das Jahr 2023 werden weltweit insgesamt 800 Gigawatt Fertigungskapazität erwartet, 2024 könnten die Kapazitäten bei 1.000 GW liegen (Sánchez Molina, P., 2023). Dem gegenüber stehen deutlich niedrigere, aktuelle Nachfrageprognosen. Nach dem World Energy Outlook 2022 beträgt der durchschnittliche jährliche weltweite Zubau bis 2030 etwa 250 GW im Stated-Policy-Szenario und 500 GW im Szenario Net-Zero-by-2050. Auch bei einem deutlich höheren weltweiten Bedarf ist aus heuti-

ger Sicht nicht mit einem Nachfrageüberhang zu rechnen, sondern mit einem Angebotsüberhang und einem möglichen weiteren Preiswettbewerb bei den Anlagen.

Rohstoffförderung

Wafer-basierte Photovoltaikzellen bestehen zum größten Teil aus Quarzsand (Siliziumdioxid) (Carrara, Alves Dias, Plazzotta, & Pavel, 2020). Quarzsand ist eines der häufigsten Elemente auf der Erde. Es gibt ihn sprichwörtlich wie Sand am Meer. Der Rohstoff selbst ist daher nicht kritisch, sehr kritisch zu bewerten sind jedoch die nachgelagerten Wertschöpfungsschritte, von der Aufbereitung zu Polysilizium bis hin zur Fertigstellung der PV-Module, da sie fast ausschließlich in China erfolgen. Im Zuge seiner ökonomischen Bedeutung wird der Rohstoff daher von der Europäischen Kommission in der Liste der Kritischen Rohstoffe (Critical Raw Materials) als kritisch eingestuft (Grohol, M., Veeh, C., 2023).

Für Dünnschichtzellen werden neben Silizium (a-Si) je nach Technologie auch Gallium (CIGS, GaAs) und Germanium (a-Si) verwendet (Carrara, Alves Dias, Plazzotta, & Pavel, 2020). China ist das wichtigste globale Lieferland dieser Rohstoffe, weshalb sie ebenfalls in der Liste der Kritischen Rohstoffe der Europäischen Kommission enthalten sind (Grohol, M., Veeh, C., 2023).²⁶ Der Marktanteil von Dünnschicht-Modulen ist sehr gering (IEA, 2021a). Aufgrund der niedrigeren Wirkungsgrade wird hier unterstellt, dass sie auch zukünftig nur einen Nischenmarkt bedienen werden. Damit weisen sie nur eine vergleichsweise geringe wirtschaftliche Bedeutung sowie Kritikalität auf und stehen nicht im Fokus dieser Studie.

Eine Photovoltaik-Anlage besteht weiterhin aus Stahl oder Aluminium für die Trägerkonstruktion, aus Silber für Silberpaste, aus Kupfer für die Verdrahtung/Verkabelung und aus speziellem eisenarmem Glas (Carrara, Alves Dias, Plazzotta, & Pavel, 2020). Aktuell werden rund 15 Prozent der weltweiten Silberförderung in

der Photovoltaik-Produktion eingesetzt. Aufgrund von Nutzungskonkurrenzen mit anderen Technologien, wie der Elektromobilität oder der 5G-Technologie, und des hohen Preises des Edelmetalls, sollte auch die Versorgung von Silber berücksichtigt werden (Fraunhofer ISE, 2022a). Kupfer ist nach Ansicht der EU-Kommission strategisch relevant, jedoch ist hier das Versorgungsrisiko deutlich geringer als bei den anderen hier untersuchten Rohstoffen.

Photovoltaik in Deutschland: Bedarf an Schlüsselrohstoffen bis 2045

Abbildung 23 zeigt die Bedarfe für Silizium, Gallium und Germanium für das in der Studie berechnete Szenario. Diese Rohstoffe werden in der Liste der Kritischen Rohstoffe der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft (Grohol, M., Veeh, C., 2023). Hierbei ist zu beachten, dass in den hier getroffenen Annahmen Dünnschicht-Module, die Gallium und Germanium enthalten, aufgrund des geringeren Wirkungsgrads auch zukünftig eine Nischenrolle einnehmen werden. Die Bedarfe für Gallium und Germanium werden in dieser Studie deshalb als nicht kritisch eingestuft.

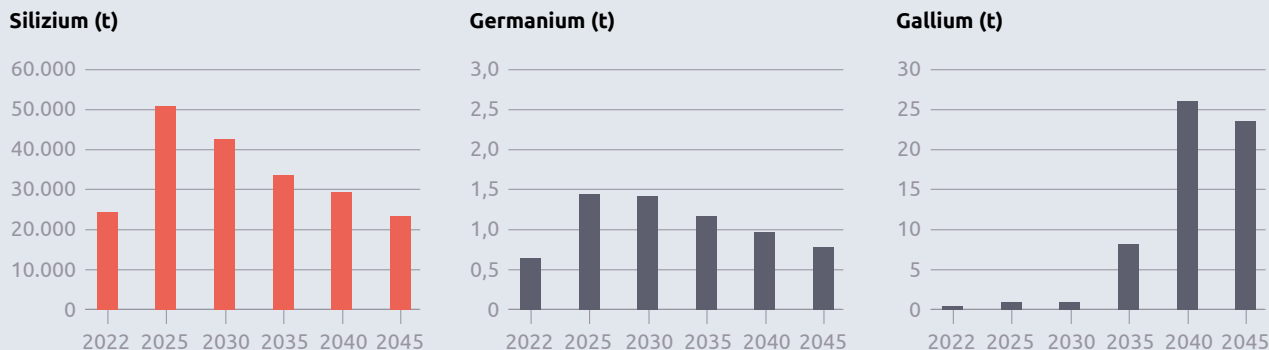
Die hier dargestellten Bedarfe ergeben sich aus dem jährlichen Brutto-Zubau an Photovoltaik (vgl. ABB. 07 in KAP. 4.1. Photovoltaik), den getroffenen Annahmen zur Aufteilung des Zubaus auf Wafer-basierte Photovoltaik und Dünnschicht-Zellen (vgl. ABB. 08 in KAP. 4.1. Photovoltaik) sowie den Annahmen zur Verringerung der Materialintensitäten (vgl. TAB. 10 in ANLAGE A: Technische Details).

Aufgrund des hohen Marktanteils kristalliner Siliziumzellen übersteigt der Bedarf an Silizium die Bedarfe an Gallium und Germanium bei weitem. Nach einer Verdoppelung des heutigen Bedarfs auf rund 50.000 Tonnen sinkt der Bedarf in den folgenden Jahren wieder ab – trotz eines konstant hohen jährlichen Zubaus. Grund hierfür ist vor allem die stark rückläufige Materialintensität. Der Bedarf an

²⁶ Anmerkung: Bis 2020 wurde auch Indium als kritisch eingestuft.

ABB. 23 **Bedarf an Schlüsselrohstoffen für Ausbau von Photovoltaik in Deutschland**

Der Siliziumbedarf nimmt ab 2030 aufgrund der stark sinkenden Materialintensität ab, trotz eines konstant hohen Zubaus an Silizium-basierten Waferzellen. Die Bedarfe an Gallium und Germanium sind aufgrund des geringen Marktanteils von Dünnschicht-Modulen klein und werden hier nicht als kritisch betrachtet.



QUELLE Eigene Berechnungen

Prognos, 2023

Germanium liegt zu den betrachteten Zeitpunkten zwischen 0,6 und 1,4 Tonnen pro Jahr. Aufgrund des angenommenen Anstiegs des Marktanteils der GaAs-Technologie auf fünf Prozent, erhöht sich der Bedarf an Gallium nach 2035 und erreicht ein Niveau von etwa 23 Tonnen pro Jahr.

Die vier größten Hersteller von Polysilizium (Tongwei, GCL-Poly, Daqo und Xinte) stammen aus China (Bellini, E., 2023). Die beiden Marktführer planen für dieses Jahr weitere enorme Kapazitätserweiterungen (Enkhardt, S., 2022). Es ist daher davon auszugehen, dass es zukünftig zu einer weiteren Konzentration des Marktes durch chinesische Unternehmen kommen wird.

Rohstoffverarbeitung: Polysilizium

Rund 80 Prozent der Produktion von Polysilizium, als Ausgangsstoff für die kristallinen Module, entfallen auf chinesische Unternehmen (IEA, 2021b). Das einzig verbleibende deutsche bzw. europäische Unternehmen, Wacker Chemie, vor drei Jahren noch weltweiter Marktführer (Enkhardt, S., 2022), ist nun auf Rang fünf zurückgefallen (Bellini, E., 2023). Die Fertigungskapazitäten von Wacker Chemie betragen derzeit rund 20 GW (SolarPower Europe, 2023). Neben der Herstellung in China gibt es weitere kleine Produktionsstätten verschiedener Unternehmen in Nordamerika und im Asien-Pazifik-Raum (ohne China), die zusammen knapp 12 Prozent der weltweiten Jahresproduktion bereitstellen (IEA, 2021b). Die geschätzte weltweite Jahresproduktionskapazität beträgt derzeit rund 500 GW und könnte laut Presseberichten auf 975 GW im Jahr 2023 ansteigen. Es ist jedoch zu erwarten, dass die tatsächliche Produktion geringer ausfallen wird (Santos, B., 2022).

Teil-Komponenten: Ingots, Wafer, Zellen und Solarglas

Die Marktkonzentration chinesischer Hersteller ist vor allem bei der Ingot- und Wafer-Produktion mit 97 Prozent sehr hoch (IEA, 2021b). Aufgrund der zukünftig stark steigenden Nachfrage nach PV-Modulen plant eine Vielzahl von Unternehmen Kapazitätserweiterungen. So gab Trina Solar im Frühjahr 2023 die Planung einer neuen Produktionsstätte mit einer jährlichen Ingot-Produktionskapazität von 35 GW bekannt (Shaw, V., 2023a). JinkoSolar eröffnete bereits im letzten Jahr ein neues Ingot-Werk mit 20 GW Kapazität (Shaw, V.; Hall, M., 2022). Zum Vergleich: Die gesamte Produktionskapazität der drei verbleibenden Ingot- und Wafer-Produzenten in Europa (die norwegischen Unternehmen NorSun, Norwegian Crystals und das französische Unternehmen Photowatt) liegt bei unter zwei GW pro Jahr (Hall, M., 2021). In Deutschland gibt es

ABB. 24 **Produktionskapazitäten und Lieferkette Wafer-basierter PV-Module nach Regionen im Jahr 2021**

Die Herstellung von Ingots/Wafern, Zellen, Solarglas und Modulen ist aufgrund der hohen Abhängigkeit von China sehr kritisch.

		Größte Produktionskapazität	Zweitgrößte Produktionskapazität	Drittgrößte Produktionskapazität	Europa	
Rohstoff (verarbeitet)	Polysilizium	China 79,4 %	Deutschland 8 %	Asien-Pazifik 6 %	Deutschland 8 %	Restliches Europa -
	Ingots / Wafer	China 96,8 %	Asien-Pazifik 2,5 %	Europa 0,5 %	Deutschland -	Restliches Europa 0,5 %
Teilkomponente	Solarzelle	China 85,2 %	Asien-Pazifik 12,2 %	Indien 1,2 %	Deutschland 0,2 %	Restliches Europa 0,4 %
	PV-Module	China 74,6 %	Asien-Pazifik 15,3 %	Indien 3,1 %	Deutschland 0,4 %	Restliches Europa 2,4 %
Komponente	Wechselrichter	China 73 %	Europa 15,7 %	RoW 11,8 %	Deutschland 6 %	Restliches Europa 9,8 %

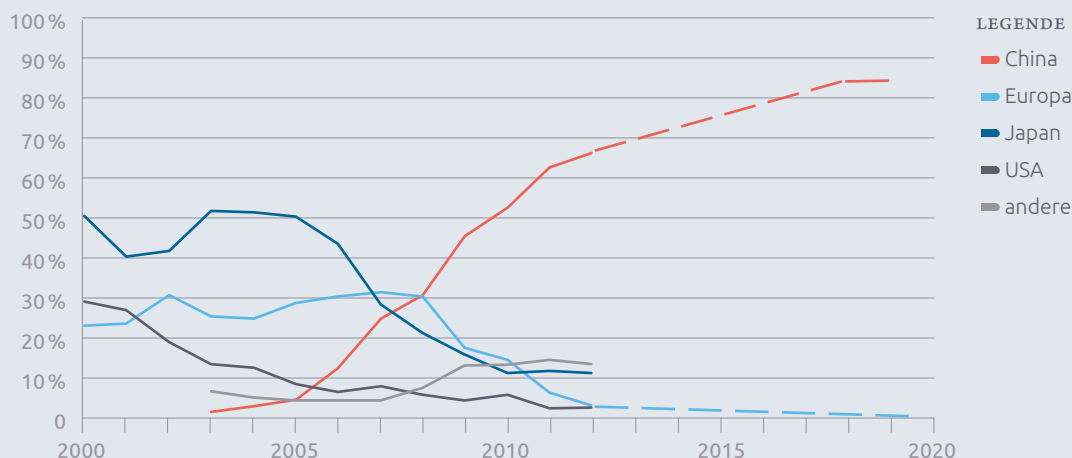
HINWEIS Solarglas: hierzu liegen keine umfassenden Daten vor. Es ist davon auszugehen, dass der Anteil Chinas aufgrund des hohen Transportgewichts ähnlich hoch ist wie bei anderen Komponenten. Der Anteil Deutschlands am Weltmarkt liegt unter 0,5 Prozent.

LEGENDE China Andere Länder QUELLE Eigene Darstellung nach (IEA, 2021b; Statista, 2022)

Prognos, 2023

ABB. 25 **Globale PV-Lieferungen zwischen 2000 und 2019 nach Regionen**

China hat in den 2000er Jahren innerhalb weniger Jahre ein Quasi-Monopol aufbauen können.



QUELLE Eigene Darstellung nach (Beneking, C., 2023). Dies ist ein Werk, das von Prognos aus dem Werk des Urhebers Claus Beneking, mit Daten u. a. von Timur Ergen, abgeleitet wurde.

Prognos, 2023

aktuell weder eine Ingot- noch eine Wafer-Produktion (SolarPower Europe, 2023).

Auch bei der Zellproduktion besteht eine deutliche Marktkonzentration von rund 85 Prozent in China (IEA, 2021b). Die aktuelle chinesische Jahresproduktionskapazität wird auf rund 600 GW geschätzt (Bellini, E., 2022). In den restlichen asiatisch-pazifischen Staaten werden etwas mehr als zwölf Prozent der Zellen produziert (IEA, 2021b). Mit Meyer Burger, 3SUN, EcoSolifer und Valoe gibt es in Europa aktuell vier Unternehmen, welche weniger als 2 GW kumulierte Produktionskapazität bereitstellen können. Die Kapazität von Meyer Burger in Deutschland liegt dabei unter 1 GW (SolarPower Europe, 2023).

Ebenfalls bei der Fertigung des für die Module benötigten Solarglases scheinen chinesische Unternehmen den Weltmarkt zu dominieren. Aufgrund einer unvollständigen Datenlage kann für die chinesische Produktion auf dieser Wertschöpfungsstufe kein valider Konzentrationswert angegeben werden. Jedoch ist anzunehmen, dass die Marktkonzentration ähnlich hoch ist wie auf den anderen Stufen. Auf die beiden chinesischen Marktführer Xinyi und FGG entfallen laut eigenen Aussagen mehr als 50 Prozent der weltweiten Produktion. Zusammen stellen die beiden Unternehmen knapp 40.000 Tonnen Solarglas pro Tag her (Xinyi Solar, 2022; FGG, 2022). Das einzige in Deutschland verbliebene Unternehmen, GMB Glasmanufaktur Brandenburg in Tschernitz, produziert aktuell 300 Tonnen pro Tag und wurde im Jahr 2022 an den indischen Konzern Borosil verkauft. Die gesamte europäische Produktionskapazität für Solarglas reicht aktuell für die Fertigung von Modulen mit einer geschätzten Kapazität von 3 bis 4 GW pro Jahr (Photovoltaik, 2022).

Komponenten: Module und Wechselrichter

Die chinesische Marktkonzentration innerhalb der Modulproduktion liegt mit 75 Prozent auf einem hohen Niveau, ist jedoch im Vergleich zu den anderen Wertschöpfungsstufen etwas niedriger (IEA, 2021b). Die geschätzte Jahresproduktionskapazität Chinas entspricht rund 600 GW (Bellini, E., 2022). Die restlichen 25 Prozent verteilen sich insbesondere auf die asiatisch-pazifischen Staaten sowie Indien, Europa und Nordamerika (IEA, 2021b). In Deutschland und Europa gibt es zwar viele Unternehmen die PV-Module herstellen, jedoch sind deren Produktionskapazitäten sehr beschränkt und nur einige der Unternehmen führen aktuell Kapazitätserweiterungen durch (Fuhs, M., 2023a). Derzeit besteht in Europa für die Fertigung von PV-Modulen insgesamt eine Kapazität von knapp zehn GW, wovon rund 3,5 GW auf Deutschland entfallen (SolarPower Europe, 2023). Der Großteil der dafür benötigten Zellen stammt aus dem außereuropäischen Ausland – insbesondere China, weshalb die Kritikalität ebenfalls als besonders hoch eingestuft wird. Gleichzeitig planen chinesische Unternehmen deutliche Kapazitätserweiterungen. So strebt eine Tochterfirma des drittgrößten chinesischen Herstellers, Jinko Solar, die Errichtung neuer Produktionslinien mit einer jährlichen Kapazität von 56 GW an, wobei die Umsetzung der ersten beiden Phasen mit insgesamt 28 GW Kapazität Mitte 2024 und die beiden weiteren Phasen im Jahr 2025 abgeschlossen sein sollen (Ernst, R., 2023).

Weitere für den Betrieb von PV-Anlagen benötigte Komponenten sind Wechselrichter/Inverter. Auch hier besteht aktuell mit rund 73 Prozent eine starke Konzentration auf chinesische Unternehmen (Statista, 2022). Allerdings handelt es sich bei Wechselrichtern um elektrische Geräte, die weltweit gefertigt werden können. In Deutschland gibt es mit SMA einen der bekanntesten Hersteller von Wechselrichtern. Zwar hat das Unternehmen in den letzten Jahren zwischenzeitlich Marktanteile an andere Produzenten verloren, jedoch gibt es viele Unternehmen in Europa und dem Rest der Welt, die ähnlich hohe Stückzahlen produzieren (Diermann,

R., 2019). Auch der Markt für Wechselrichter wächst aufgrund der weltweit steigenden PV-Nachfrage. So will SMA die Produktionskapazität in Deutschland bis zum Jahr 2025 auf 40 GW verdoppeln (Enkhardt, S., 2023). Die Marktkonzentration auf chinesische Hersteller wird von den Autoren im Vergleich zur Wafer- oder Zellherstellung als mäßig kritisch eingestuft.

Erfolgsmodell China

Abbildung 24 verdeutlicht, dass China innerhalb weniger Jahre ein Quasi-Monopol im PV-Markt aufbauen konnte. Der PV-Ausbau wird auch kurz- bis mittelfristig in Deutschland sowie weltweit vollkommen von China abhängig sein.

Die Produktionskapazitäten in China übersteigen den inländischen Bedarf derzeit um ein Vielfaches. So wurden im Jahr 2022 knapp 90 GW an Photovoltaik installiert bei einer Modulfertigungskapazität von geschätzten 600 GW (Shaw, V., 2023b). Aufgrund bereits geplanter Erweiterungen chinesischer Produktionskapazitäten für die nächsten Jahre, wird es weiterhin zu einem deutlichen Überangebot entlang der gesamten Lieferkette kommen. Angesichts ihrer enormen Produktionskapazitäten besitzen chinesische PV-Hersteller einen deutlichen Kostenvorteil gegenüber anderen Unternehmen. Die International Energy Agency (IEA) geht davon aus, dass chinesische Unternehmen zehn Prozent günstiger als indische, 20 Prozent günstiger als amerikanische und bis zu 35 Prozent günstiger als europäische Unternehmen produzieren können. Diese Unterschiede können unter anderem durch abweichende Energie-, Arbeits-, Investitions- und Betriebskosten erklärt werden (IEA, 2022a). Für den zu erwartenden Auf- und Ausbau einer PV-Produktion außerhalb Chinas bleibt die große Herausforderung bestehen, ein ähnliches Kostenniveau zu erreichen. Chinesische Unternehmen übernahmen in den letzten Jahren in vielen Bereichen der Lieferkette die Technologieführerschaft. Entsprechende Patente und benötigtes Know-how liegen nicht nur in den einzelnen Produktionsschritten, sondern auch in der Fertigung der für die entsprechenden Schritte erforderlichen Anlagen. Hierzu diskutiert die chinesische Regierung

aktuell über Export-Beschränkungen für Equipment zur Herstellung von Polysilizium und Wafern (Enkhardt, S.; Shaw, V., 2023).

Der Erfolg der chinesischen PV-Industrie ist unter anderem auf eine sehr umfangreiche, ausdauernde und verlässliche staatliche Unterstützung der Unternehmen zurückzuführen. Nach einem zunächst rein unternehmerisch geprägten Wachstumspfad entwickelte die chinesische Regierung ab 2011 mit diversen Ministerien, regionalen Behörden und der nationalen Energie Agentur eine Vielzahl von Anreizprogrammen, um die inländische Nachfrage nach PV-Modulen zu steigern. Gleichzeitig konnten sich Unternehmen insbesondere in den Verlustphasen des globalen Verdrängungswettbewerbs auf eine staatliche Unterstützung verlassen und somit ihre Marktführerschaft ausbauen (Shaw, V., 2023c; Beneking, C., 2023).

Eine ähnliche Form der staatlichen Unterstützung wird aktuell mit dem Inflation Reduction Act (IRA) in den USA und den Production-Linked Incentives (PLI) in Indien angestrebt. Ein Ziel dieser (Klimaschutz-)Programme ist die industriepolitische Unterstützung von Unternehmen, um unter anderem die Produktion von Schlüsseltechnologien (z.B. Photovoltaik und Wind) deutlich auszubauen. Somit sollen die Abhängigkeiten von ausländischen Importen reduziert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Programme sowohl in den USA als auch in Indien zu einem Ausbau der dort ansässigen PV-Industrie führen können. So soll die Produktionskapazität von PV-Modulen in Indien von heute 38 GW auf 110 GW im Jahr 2026 gesteigert werden. Parallel dazu soll eine eigene Polysilizium- sowie Ingot-/Wafer-Produktion aufgebaut und die Zellherstellung massiv ausgebaut werden (IEEFA, 2023).

5.2. Windkraft



- Windkraftanlagen sind komplexe Anlagen aus tausenden Einzelkomponenten.
- Die sehr kritischen Komponenten sind Permanentmagnete aus Neodym-Eisen-Bor, die in 95 Prozent der Offshore-Generatoren und rund einem Viertel der Onshore-Generatoren verbaut werden.
- Die sehr hohe Kritikalität der Permanentmagnete ergibt sich aus der sehr starken Dominanz von China. Alle Stufen der Lieferkette sind als sehr kritisch einzustufen: von der Rohstoffförderung der Seltenen Erden (insbesondere der Schweren Seltenen Erden), über die Aufbereitung der Leichten und Schweren Seltenen Erden bis zur Produktion der Permanentmagnete (vgl. dazu Kapitel 5.4.).
- Darüber hinaus werden viele andere Komponenten aus Kostengründen von chinesischen Unternehmen bezogen, für die es jedoch auch Lieferanten außerhalb Chinas gibt.

Tausende Einzelkomponenten für eine Windkraftanlage

Windkraftanlagen bestehen aus vielen tausend Einzelkomponenten. Dementsprechend viele Rohstoffe werden dafür benötigt. Der mengenmäßig größte Teil sind Eisenerze, Kupfer und Bauxit (Aluminium), die in verschiedenen Komponenten verbaut werden – wie z. B. als Stahl im Turm, in der Maschinengondel und als rostfreier Stahl im Getriebe und Lagern. Die Rotoren bestehen aus Carbon, Glasfaser und Epoxidharz. Für die Elektronik, die sich in der Gondel befindet, werden große Mengen an Kupfer benötigt.

Lieferkette: Sehr hohe Kritikalität bei Permanentmagneten

Für die Windkraftanlagen liegt eine hohe Kritikalität in den Anlagen, die Permanentmagnete in den Generatoren verwenden (DENA, 2022). Vor allem bei Offshore-Windkraft dominieren diese Anlagen mit 95 Prozent der neugebauten Anlagen (vgl. KAP. 4). Die Permanentmagnete wiederum benötigen Seltene Erden. Diese werden als Oxide im Bergbau gewonnen, zu Metallen in chemisch aufwändigen Verfahren aufbereitet und dann zusammen mit Eisen und Bor zu Permanentmagneten hergestellt (Neodym-Eisen-Bor-Magnete). Die Kritikalität hierbei ergibt sich entlang der gesamten Lieferkette – von der Förderung der Seltenen Erden, über die Weiterverarbeitung bis zu Produktion der Permanentmagnete, da chinesische Firmen bei allen Stufen einen Marktanteil von über 90 Prozent haben. Bei der Produktion von Permanentmagneten liegt die Konzentration sogar bei 94 Prozent. In Europa hingegen gibt es keinen Bergbau und keine Weiterverarbeitung. Abbildung 26 zeigt die wichtigsten Schritte der Lieferkette im Überblick.

Permanentmagnete werden nicht nur in Generatoren, sondern auch in Synchronmotoren verwendet, die in Elektro-Fahrzeugen verbaut werden und z. T. auch in Kompressoren der Wärmepumpen und Umwälzpumpen. Im Kapitel 5.4. wird deshalb übergreifend die Risikolage bei Permanentmagneten beleuchtet.

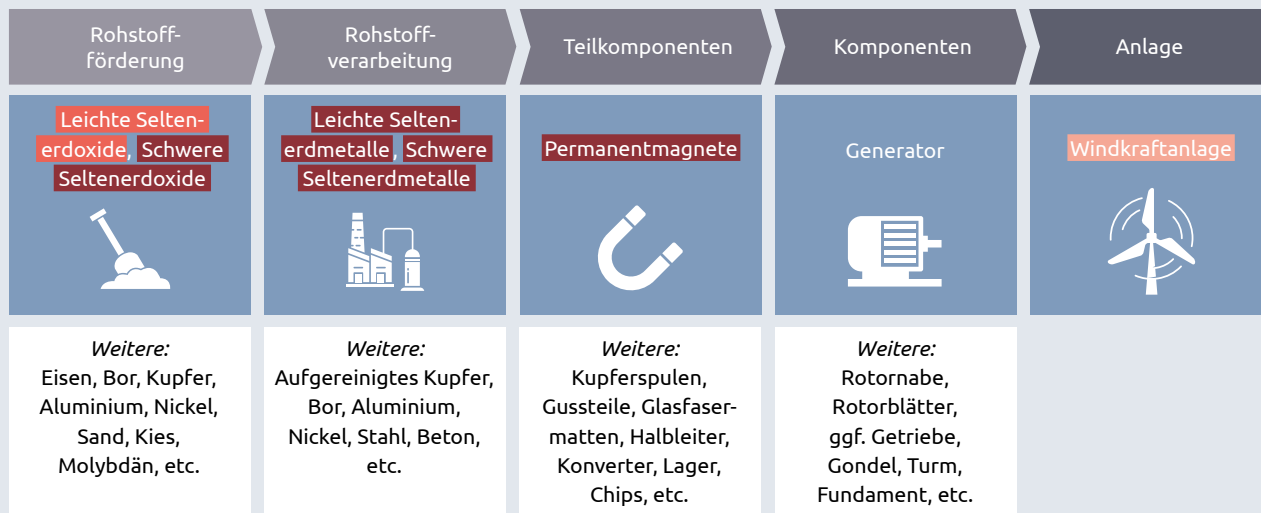
Darüber hinaus werden, wie in den meisten Branchen, viele Einzelteile aus Kostengründen bei chinesischen Unternehmen eingekauft, obwohl für sie auch Hersteller außerhalb Chinas existieren. Beispiele hier sind z. B. Glasfasermatten oder Gussteile. Für diese Komponenten ist die Kritikalität geringer zu bewerten, weil es andere Anbieter gibt und (noch) keine Konzentration der Produktionskapazitäten in China vorliegt. Mittel- bis langfristig besteht jedoch das Risiko, dass aufgrund von Kostenvorteilen und dem Aufbau von Kapazitäten andere Anbieter aus dem Markt gedrängt werden und monopolartige Verhältnisse entstehen.

Im Bereich der Hersteller und der Hauptkomponentenfertigung existieren in Europa für Onshore-Windenergie ausreichend Produktionskapazitäten, um den Ausbaubedarf auch mittelfristig bedienen zu können. Im Offshore-Bereich bestehen derzeit ebenfalls noch ausreichende Fertigungskapazitäten, allerdings zeichnen sich mit den in ganz Europa stark angehobenen Ausbauzielen zum Zieljahr 2030 enorme Herausforderungen zum Hochfahren der Produktionskapazitäten ab (siehe auch KAP. 6). Dies betrifft insbesondere das Turbinensegment mit Leistungen von mehr als 12 MW. Die wichtigsten Hersteller im Bereich Offshore-Windturbinen im europäischen Markt sind Siemens Gamesa, Vestas und GE.

Windkraft in Deutschland: Bedarf an kritischen Rohstoffen bis 2045

Abbildung 27 zeigt den Bedarf für Leichte (Neodym, Praseodym) und Schwere Seltene Erden (Dysprosium, Terbium). Während die Rohstoffförderung von Neodym und Praseodym als mittel kritisch eingestuft wird, wird die Rohstoffförderung von Dysprosium und Terbium als sehr kritisch eingestuft. Der

ABB. 26 **Lieferkette zur Herstellung von Windkraftanlagen mit Permanentmagneten**
Die Kritikalität ergibt sich vor allem beim Herstellungsprozess für Permanentmagnete



HINWEIS Rohstoffförderung von Seltenen Erden: Die Rohstoffe kommen jeweils in unterschiedlichen Zusammensetzungen vor. Der Anteil der Seltenen Erdelemente ist in den jeweiligen Lagerstätten sehr unterschiedlich. Generatoren mit Permanentmagneten werden vor allem bei Wind-Offshore-Anlagen eingebaut. Hier liegt der Anteil bei nahezu 100 Prozent. 20 Prozent der Wind Onshore-Anlagen verwenden ebenfalls Generatoren mit Permanentmagneten (Vgl. Kapitel 4.2.).

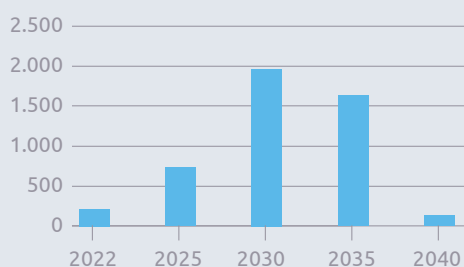
LEGENDE Kritikalität: ■ Sehr kritisch ■ Mittel kritisch ■ Mäßig kritisch **QUELLE** Eigene Darstellung

Prognos, 2023

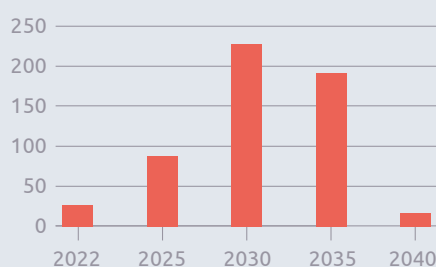
ABB. 27 **Bedarf kritischer Rohstoffe für Ausbau von Windkraft in Deutschland in Tonnen**

Seltene Erden sind als Rohstoff sowohl bei der Gewinnung (hier insbesondere die Schweren Seltenen Erden) als auch bei der Verarbeitung kritisch. Der Bedarf der Seltenen Erden in Deutschland wird vor allem vom jährlichen Bruttozubau von Wind Offshore bestimmt.

Leichte Seltene Erden (t)



Schwere Seltene Erden (t)



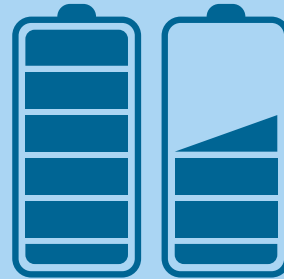
QUELLE Eigene Berechnungen

Prognos, 2023

hier dargestellte Bedarf ergibt sich aus den jährlich gebauten Windkraft-Anlagen – insbesondere Wind Offshore (vgl. ABB. 09), den hier getroffenen Annahmen zur Aufteilung des Zubaus auf die einzelnen Generatortypen sowie den Annahmen zur Senkung der Materialintensität (siehe ANHANG). Die Nachfrage nach den Rohstoffen wird vor allem getrieben vom jährlichen Bruttozubau bei Offshore-

Anlagen: nach dem starken Hochlauf bis in die 2030er Jahre sinkt der jährliche Zubau und damit der Bedarf an Seltenen Erden.

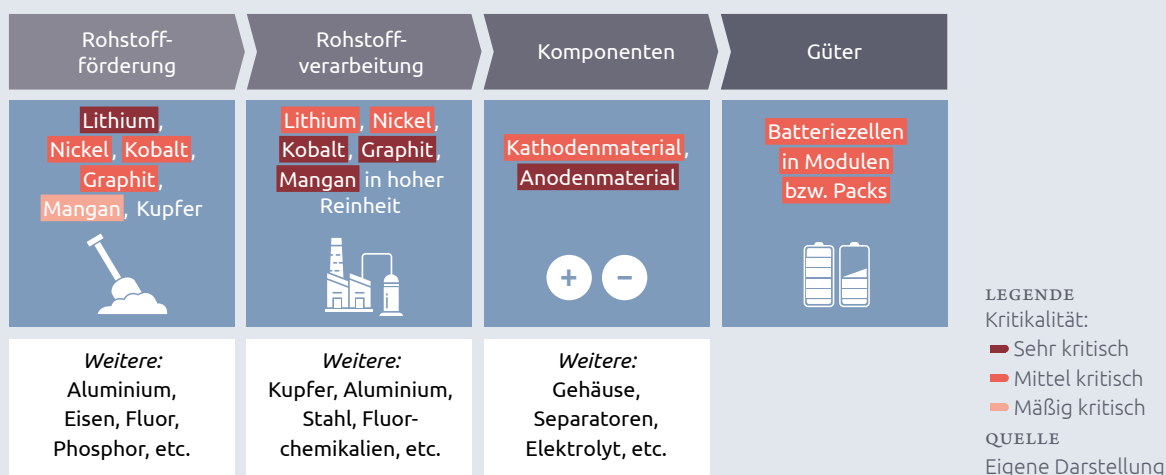
5.3. Lithium-Ionen-Batterien



- Die Lithium-Ionen-Batterien werden über komplexe Wertschöpfungsketten im großindustriellen Maßstab produziert: die wesentlichen Schritte sind (vereinfacht) Rohstoffgewinnung, Weiterverarbeitung der Rohstoffe, Komponentenherstellung und Produktion der Lithium-Ionen-Batteriezellen («Gigafactories»).
- Aufgrund des rasanten Nachfragewachstums sowohl in Deutschland als auch im globalen Rahmen müssen sämtliche Wertschöpfungsstufen in erheblichem Tempo massiv ausgebaut werden.
- Für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien sind bei der Rohstoffförderung in erster Linie Lithium (sehr kritisch), in zweiter Linie Kobalt, Nickel und Graphit (mittel kritisch) und in dritter Priorität Mangan (mäßig kritisch) relevant.
- Bei den Rohstoffen wird vor allem bei Lithium in den nächsten Jahren (bis 2030) eine globale Angebotslücke erwartet, falls die globalen Förderkapazitäten nicht schnell und in großen Volumina ausgebaut werden.
- Die VR China dominiert bei der Rohstoffgewinnung vor allem bei Graphit, bei der Weiterverarbeitung bei allen kritischen Rohstoffen und hat über inländische Kapazitäten und global operierende chinesische Unternehmen eine sehr starke Position bei der Herstellung der Komponenten und der Lithium-Ionen-Batteriezellen.
- Der Aufbau von Produktionskapazitäten für Gigafactories sowie Komponenten und vorgelagerte Stufen ist in Deutschland und der EU angelaufen; allerdings müssen zur Nachfragebefriedigung die entsprechenden Kapazitäten bis 2030 massiv ausgebaut werden.
- Die Erschließung von Lithium in der EU und Deutschland sollte forciert werden.

ABB. 28 **Lieferkette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien**

Neben Lithium als Rohstoff sind besonders die Verarbeitung von Kobalt, Graphit und Mangan und bestimmte Komponenten als sehr kritisch einzustufen



Öko-Institut, 2023

Lieferkette: Die Kritikalität der Lieferkette von Lithium-Ionen-Batterien unterscheidet sich von Schritt zu Schritt

Von den in Lithium-Ionen-Batterien enthaltenen Rohstoffen werden im Rahmen dieser Studie die folgenden Schlüsselrohstoffe näher untersucht: Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit, Mangan. Zusätzlich wird Kupfer zum Vergleich betrachtet. Darüber werden noch weiteren Rohstoffe, wie z. B. Stahl eingesetzt. Die Gewinnung der Rohstoffe ist die erste Stufe der Lieferkette. Im nächsten Schritt findet die Aufreinigung zu Ausgangsstoffen (Prozessierte Materialien) für die Produktion von Komponenten (Anoden- und Kathodenaktivmaterial, usw.) statt. Aus den Komponenten werden anschließend in sogenannten «Giga-Factories» die Batteriezellen hergestellt.

Rohstoffe und Reserven

Aus Abbildung 29 wird sehr deutlich, dass der Anstieg des globalen Bedarfs beim Batterierohstoff Lithium ausgehend von 2020 über 2030 bis 2040 besonders stark ist. Durch den Hochlauf der Elektromobilität ist eine Verfünffachung des Bedarfs bis 2030 gegenüber 2020 zu erwarten. Die Bedarfsanstiege bei den drei Rohstoffen Graphit, Kobalt und Nickel sind auch bemerkenswert und ihre Verfügbarkeit gilt es zu sichern. Dem Batterierohstoff Lithium sollte aber besondere Aufmerksamkeit

zukommen. Dies wird auch durch jüngste Veröffentlichungen der DERA unterstützt (Al Barazi, S., 2022). Für Mangan und Kupfer sind global nur geringe Nachfrageresteigerungen zu erwarten.

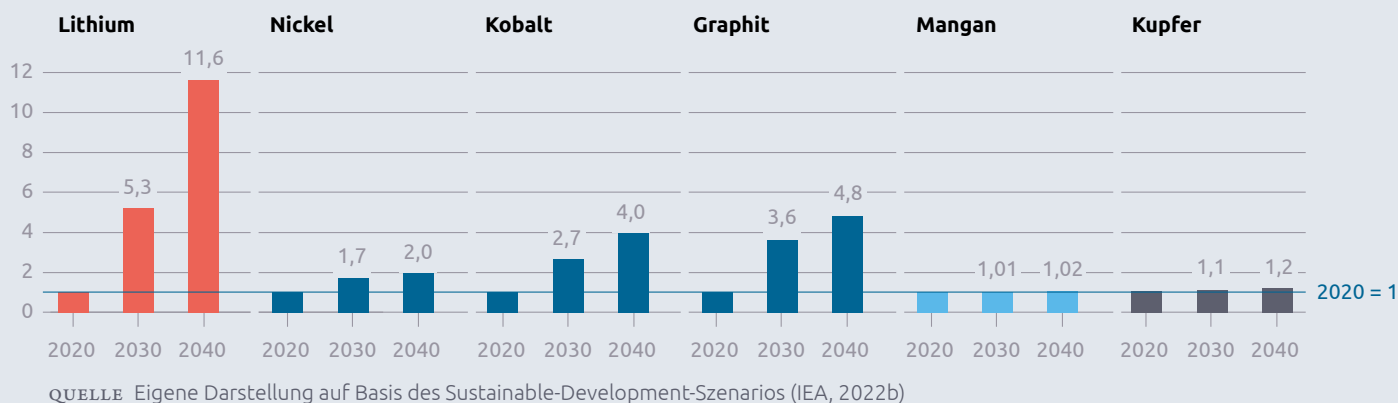
Nicht nur Nachfrageüberhänge sondern auch hohe Länderkonzentrationen bei der Rohstoffförderung könnten zu einer kritischen Versorgungssituation führen. Bei der Betrachtung der weltweiten Produktion im Bergbau für ausgewählten Rohstoffe mit Relevanz für Lithium-Ionen-Batterien (Abbildung 30) fällt auf, dass viele der Rohstoffe hinsichtlich der Minenproduktion von einigen wenigen Ländern dominiert werden. Nach USGS spielten im Jahr 2021 (U.S. Geological Survey, 2023)²⁷ Länder wie Australien und Chile (Lithium), Indonesien und Philippinen (Nickel) oder die Demokratische Republik Kongo (DR Kongo) eine sehr relevante Rolle. Zudem sind die Umwelt- und sozialen Bedingungen beim artisanalen Kleinbergbau²⁸ (Al Barazi, S. et al., 2017) in der DR Kongo in den letzten Jahren immer wieder Gegenstand ausführlicher Berichte und Studien gewesen (Schüler, D. et al., 2018, BGR, 2020).

²⁷ Bei Graphit wurde nur natürlicher Graphit dargestellt, wobei auch synthetischer Graphit für die Batterieproduktion eine große Rolle spielt.

²⁸ Die Schätzungen für den Anteil des artisanalen Kleinbergbaus in der DR Kongo variieren zwischen 15-20 Prozent der Gesamtkobaltproduktion in diesem Land.

ABB. 29 **Anstieg der Weltnachfrage für Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit, Mangan und Kupfer aufgrund von Elektromobilität im Vergleich zur Weltproduktion 2020**

Insbesondere bei Lithium steigt die weltweite Nachfrage bis 2040 um den Faktor zwölf

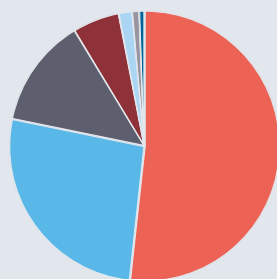


Öko-Institut, 2023

ABB. 30 **Förderung von Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit, Mangan und Kupfer**

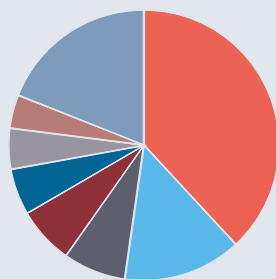
Die Produktion (2021) findet je nach Rohstoff sehr konzentriert in bestimmten Ländern statt (Graphit, Kobalt, Lithium)

QUELLE Eigene Darstellung auf Basis von (U.S. Geological Survey, 2023). Die Massen geben den jeweiligen Rohstoffgehalt an. Darstellung in Kilotonnen (kt)



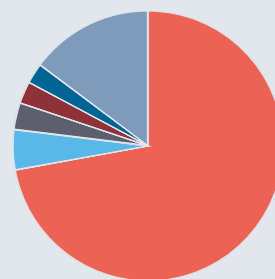
Lithium (107 kt)

- Australien 52 %
- Chile 26 %
- China 13 %
- Argentinien 6 %
- Brasilien 2 %
- Portugal 1 %
- Simbabwe 1 %



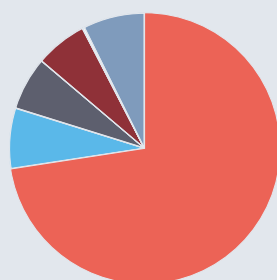
Nickel (2.730 kt)

- Indonesien 38 %
- Philippinen 14 %
- Russland 8 %
- Neukaledonien 7 %
- Australien 6 %
- Kanada 5 %
- China 4 %
- Andere Länder 19 %



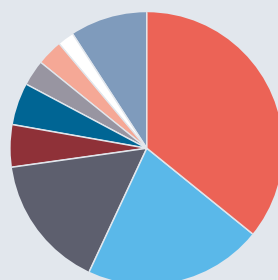
Kobalt (165 kt)

- Kongo 72 %
- Russland 5 %
- Australien 3 %
- Kanada 3 %
- Kuba 2 %
- Andere Länder 15 %



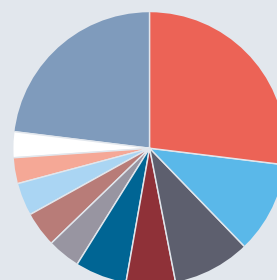
Graphit (1.130 kt)

- China 73 %
- Brasilien 7 %
- Mosambik 6 %
- Madagaskar 6 %
- Türkei <1 %
- Andere Länder 7 %



Mangan (20.100 kt)

- Südafrika 36 %
- Gabun 21 %
- Australien 16 %
- China 5 %
- Ghana 5 %
- Ukraine 3 %
- Brasilien 3 %
- Indien 2 %
- Andere Länder 9 %



Kupfer (21.200 kt)

- Chile 27 %
- Peru 11 %
- China 9 %
- Kongo 6 %
- USA 6 %
- Russland 4 %
- Sambia 4 %
- Mexiko 4 %
- Indonesien 3 %
- Kanada 3 %
- Andere Länder 23 %

Öko-Institut, 2023

Deutlich werden auch die sehr unterschiedlichen Mengen an Rohstoffen, die jährlich aus dem Bergbau gewonnen werden. Die Menge von 107 kt Lithium ist in einer ganz anderen Größenordnung als die 21.200 kt der jährlichen Kupferproduktion. Damit relativieren sich auch gewisse Bedarfe der entsprechenden Rohstoffe für Lithium-Ionen-Batterien. Im Falle von Lithium sind die Lithium-Ionen-Batterien (und in den nächsten Jahren noch weiter zunehmend) die überragend dominante Anwendung. Im Falle von Kupfer sind viele andere Anwendungen deutlich relevanter und der Anstieg im Verhältnis zu Gesamtproduktionsmenge weniger dramatisch.

Vergleicht man die Verteilung der Länder bei der Produktion der Rohstoffe zu den in der nächsten Graphik dargestellten Reserven für 2023, werden einige Unterschiede deutlich. So ist Australien derzeit der größte Produzent von Lithium, allerdings hat Chile deutlich mehr Lithiumreserven als Australien. Darüber hinaus hat die Türkei 2023 zwar die größten natürlichen Graphitreserven, jedoch keinerlei Produktion aus dem Bergbau. Dabei zu beachten ist, dass Reserven sich sehr stark ändern können, da sie nicht nur vom Wissen über sie, sondern auch von den ökologischen und ökonomischen Gegebenheiten abhängen. Ein Rohstoffvorkommen wird nur als Reserve gezählt, wenn es vollständig evaluiert wurde und als wirtschaftlich rentabel angesehen wird (BGS Minerals UK, 2023).

Dies wird beim Vergleich der jährlichen Angaben der Lithiumreserven nach USGS deutlich. Beliefen sich die angegebenen Reserven für Lithium 2010 auf gerade mal 9.900 kt haben sie sich bis 2023 mehr als 2,5-facht auf 26.000 kt (U.S. Geological Survey, 2010, U.S. Geological Survey, 2023). Es ist zu sehen, dass es für alle sechs Rohstoffe genug natürliche Reserven auf globaler Ebene gibt und dies deshalb keinen Hinderungsgrund für den Hochlauf der Elektromobilität darstellt. Die Produktion und Verarbeitung bestimmter Rohstoffe müssen allerdings stark hochgefahren und den zukünftigen Bedarfen angepasst werden. Der Vergleich der aktuellen Roh-

stoffförderung in Abbildung 30 mit denen in Abbildung 31 gezeigten natürlichen Reserven macht deutlich, dass für bestimmte Rohstoffe durchaus noch viele Optionen hinsichtlich zukünftiger Förderländer bestehen. Durch eine breitere Verteilung können die Abhängigkeiten von einzelnen Standorten und die damit verbundenen Risiken verringert werden.

Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland: Bedarf an kritischen Rohstoffen bis 2045

Aus den in Kapitel 4 dargestellten Neuzulassungen der unterschiedlichen Fahrzeugtypen und den in den Fahrzeugtypen zum Einsatz kommenden Batteriezusammensetzungen ergeben sich für das hier berechnete Szenario konkrete Bedarfshochlaufkurven der einzelnen Rohstoffe (wie Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit, Mangan und Kupfer) bis 2045. Dem gegenüber werden zusätzlich die Bedarfe für die Produktion an Fahrzeugen innerhalb Deutschlands gestellt, um die tatsächliche Nachfrage für den Industriestandort Deutschland zu verdeutlichen.

Es lassen sich daraus einige generelle Trends ableiten. Auffällig ist, dass Mangan und Kobalt für das Szenario der Neuzulassungen bereits früh ihre Nachfragespitzen (2030 bei je ca. 20.000 Tonnen pro Jahr) erreichen und nach 2030 die jährlichen Bedarfsmengen wieder steil abfallen. Im Falle von Mangan und Kobalt ist dies auf drei Annahmen im Szenario «KNDE2045» zurückzuführen:

- Der Rückgang der Fahrzeugneuzulassungen nach 2030,
- der zunehmende Trend zu kobalt- und manganarmen Lithium-Ionen-Batterien (NMC 811) und
- der zunehmende Trend zu kobalt- und manganfreien LFP-Batterien.

Durch eine Kombination politischer und technologischer Entwicklungen ergeben sich also für die Nachfrage der Rohstoffe Kobalt und Mangan aus dem Verkehrssektor deutliche Entspannungstendenzen nach 2030.

Im Szenario «Inlandsproduktion» sehen wir für die Nachfrage nach Mangan und Kobalt ebenfalls den Trend, dass die Bedarfsnachfragen abfallen. Allerdings tritt dies erst mit einer deutlichen Verzögerung ein. So liegt die Spitze der Nachfrage für Kobalt im Jahr 2035 (33.300 t pro Jahr). Auch für Mangan bleibt die Nachfrage bis 2035 hoch (31.800 t pro Jahr) und fällt erst danach ab. Dies ist mit der zuvor geschilderten Umstellung auf kobalt- und manganarme bzw. kobalt-, manganfreie Batteriechemien zu erklären.

Im Falle der Nickelnachfrage wird die Spitze zwar ebenfalls recht früh erreicht (2030 rund 90.500 Tonnen pro Jahr) und danach erfolgt auch ein Rückgang bis 2045 auf gut 60.000 Tonnen pro Jahr im Jahr 2045. Der Rückgang ist jedoch deutlich weniger steil im Vergleich zu Kobalt und Mangan, da mit dem prozentualen Zuwachs von nickelreichen NMC 811 Lithium-Ionen-Batterien auch ein gegenläufiger Trend (zu geringeren Neuzulassungen und nickelfreien LFP) hier eine Rolle spielt.

Im Szenario «Inlandsproduktion» steigt die Nickelnachfrage nach 2030 zunächst weiter an und fällt erst nach 2035 leicht ab. Der Grund liegt in zwei gegenläufigen Trends: sowohl nickelreiche NMC 811 Lithium-Ionen-Batterien als auch nickelfreie LFP-Batterien nehmen prozentual zu.

Beim Bedarf von Lithium, Kupfer und Graphit, welche in allen Batterietypen zum Einsatz kommen, liegt die Nachfragespitze deutlich später. Allerdings wird nach 2030 bis 2039 ein Plateau mit fast gleichbleibendem Nachfrageniveau erreicht. Die Spitze von Lithium, Kupfer und Graphit liegt in 2039 mit 20.800 Tonnen pro Jahr (Lithium), ca. 100.000 Tonnen pro Jahr (Kupfer) sowie 200.000 Tonnen pro Jahr (Graphit). Der Rückgang der jährlichen Nachfrage für diese drei Rohstoffe für die Batterien des Verkehrssektors bis 2045 ist zwar erkennbar, aber im Vergleich zu den anderen drei Rohstoffen recht moderat. Dies ist damit zu erklären, dass hier dem

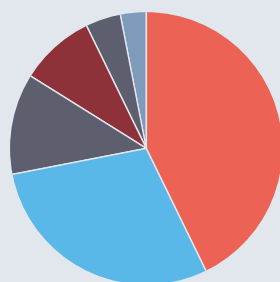
Szenario noch keine spezifischen technologischen Veränderungen der Batteriechemien zum Tragen kommen.

Im Szenario «Inlandsproduktion» ergibt sich für Graphit und Kupfer, im Kontrast zum Szenario «KNDE2045», keine Nachfrageabnahme. Die Nachfrage steigt auch nach 2035 bis 2045 weiter leicht an. Die Nachfrage im Jahr 2045 würde für Graphit bei etwa 370.200 Tonnen pro Jahr liegen und damit mehr als doppelt so hoch wie im Szenario «KNDE2045» (167.700 Tonnen pro Jahr). Für Kupfer liegt die Nachfrage bei 203.400 Tonnen pro Jahr im Jahr 2045, auch hier mehr als doppelt so hoch wie im Szenario «KNDE2045» (94.200 Tonnen pro Jahr).

Für Lithium steigt die Nachfrage im Szenario «Inlandsproduktion» bis 2040 auf 38.800 Tonnen pro Jahr, danach ist bis 2045 eine leichte Abnahme ersichtlich. Allerdings sind die Veränderungen in der Nachfrage ab 2035 minimal und liegen zwischen 2035 und 2045 auf einem fast konstanten Niveau.

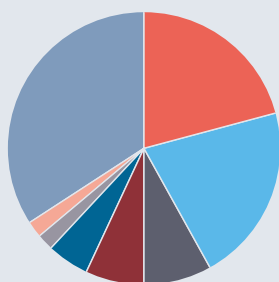
Ungeachtet der geschilderten unterschiedlichen Entwicklungen der jährlichen Nachfrage für die sechs Batterierohstoffe gilt es für die Zielstellung dieser Studie festzuhalten, dass für Batterierohstoffe bis 2030/2035 ein gewaltiger Nachfrageanstieg und damit eine Phase des kurz- und mittelfristigen «Angebotsstresses» für die entsprechenden Lieferketten unausweichlich ist. Auf die entsprechenden Herausforderungen für die Angebotsseite und entsprechende Lösungsstrategien wird im Kapitel 6 näher eingegangen.

Der Rohstoffbedarf nach dem Szenario «Inlandsproduktion» für die Inlandsproduktion von Fahrzeugen mit Traktionsbatterie, welcher sich aus dem entsprechenden Anstieg des jährlichen Bedarfs an Lithium-Ionenbatterien ergibt, ist ebenfalls in Abbildung 32 dargestellt.



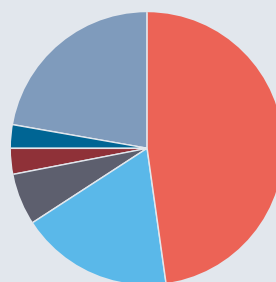
Lithium (26.000 kt)

Chile 43 %
Australien 29 %
Argentinien 12 %
China 9 %
Kanada 4 %
Andere Länder 3 %



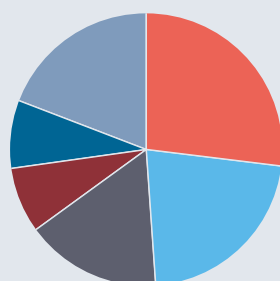
Nickel (100.000 kt)

Indonesien 21 %
Australien 21 %
Russland 8 %
Neukaledonien 7 %
Philippinen 5 %
Kanada 2 %
China 2 %
Andere Länder 34 %



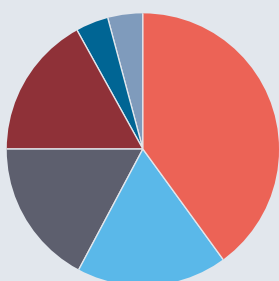
Kobalt (8.300 kt)

Kongo 48 %
Australien 18 %
Kuba 6 %
Kanada 3 %
Russland 3 %
Andere Länder 22 %



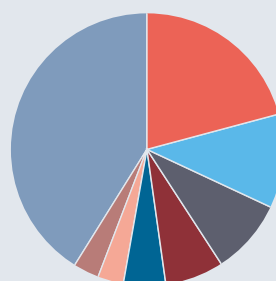
Graphit (330.000 kt)

Türkei 27 %
Brasilien 22 %
China 16 %
Mosambik 8 %
Madagaskar 8 %
Andere Länder 19 %



Mangan (1.700.000 kt)

Südafrika 40 %
China 18 %
Brasilien 17 %
Australien 17 %
Gabun 4 %
Andere Länder 4 %



Kupfer (890.000 kt)

Chile 21 %
Australien 11 %
Peru 9 %
Russland 7 %
USA 5 %
China 3 %
Kongo 3 %
Andere Länder 41 %

ABB. 31 Reserven von Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit, Mangan und Kupfer im Jahr 2021

Reserven sind ausreichend vorhanden, jedoch für bestimmte Rohstoffe auf wenige Länder konzentriert (Kobalt, Lithium, Mangan). Die Reserven ändern sich jedoch über die Zeit je nach Nachfrage und Wirtschaftlichkeit.

QUELLE Eigene Darstellung auf Basis von (U.S. Geological Survey, 2023). Die Massen geben den jeweiligen Rohstoffgehalt an. Darstellung in Kilotonnen (kt)

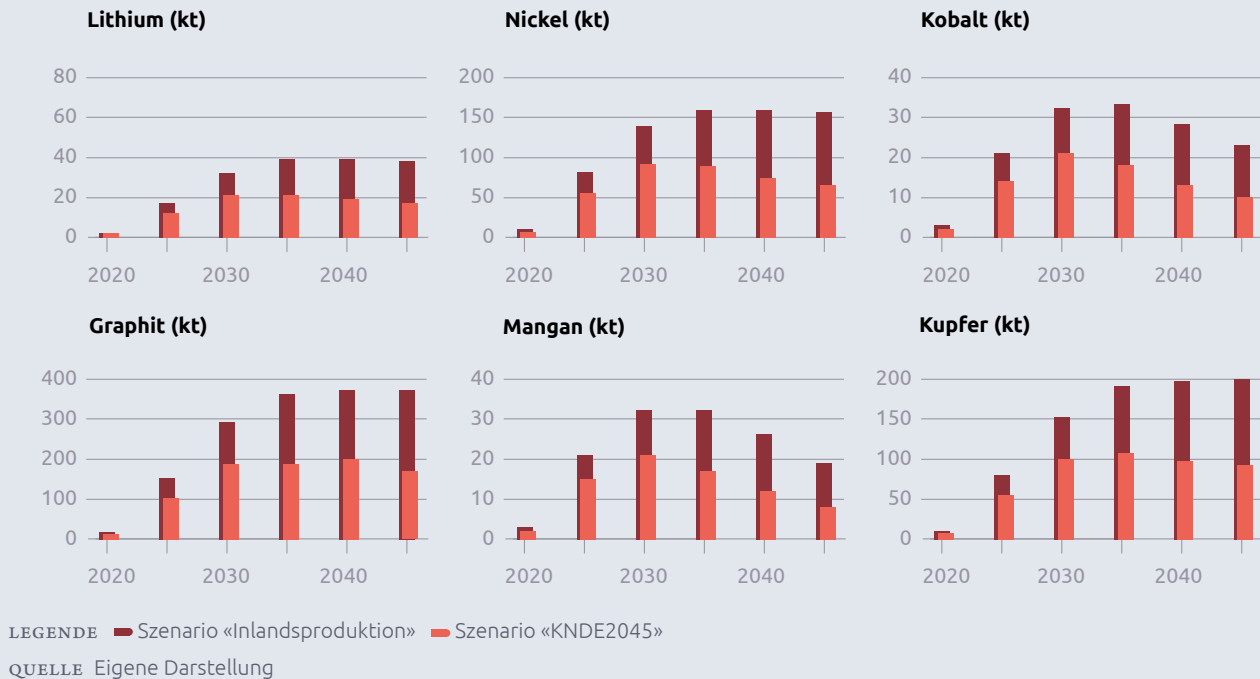
Öko-Institut, 2023

Im Vergleich zum Szenario «KNDE2045» ist klar zu erkennen, dass es zu keiner signifikanten Abnahme des Rohstoffbedarfs nach 2035 kommt, da das Produktionsniveau an Fahrzeugen gleichmäßig hoch bleibt. Insbesondere für Lithium, Graphit und Kupfer bleibt der jährliche Bedarf stabil auf hohem Niveau. So würde 2045 fast das Doppelte an Graphit im Szenario «Inlandsproduktion» im Vergleich zum Szenario «KNDE2045» gebraucht werden. Für Kobalt und Mangan (und in geringerem Maße für Nickel) ist allerdings eine Abnahme der jährlichen Nachfrage nach 2030 zu erkennen. Dies ist mit

der zuvor geschilderten Umstellung auf kobalt- und manganarme bzw. kobalt-, mangan- und nickelfreie Batteriechemien zu erklären. Recycling ist hierbei, wie zuvor auch, zunächst vernachlässigt. Wie unten dargestellt, kann Recycling besonders in späteren Jahren ein größeres Potenzial entfalten.

ABB. 32 **Rohstoffnachfrage bis 2045 nach Lithium, Nickel, Kobalt, Mangan, Kupfer und Graphit für Lithium-Ionen-Batterien in Kilotonnen (kt) für das Szenario «Inlandsproduktion» und das Szenario «KNDE2045»**

Für alle betrachteten Rohstoffe gibt es eine sehr stark steigende Nachfrage, wobei aufgrund technologischer Entwicklungen diese besonders für Kobalt und Mangan auch wieder zurückgeht



Öko-Institut, 2023

Globale Lieferkette: China dominiert alle aufbauenden Schritte

In der nachfolgenden Abbildung 33 sind in einer vereinfachten Übersicht die globale Lieferkette für Lithium-Ionen-Batterien und die Standorte der jeweiligen Produktion für 2021 dargestellt. Die wesentlichen Standortländer für die Bergbauförderung der wichtigen strategischen Rohstoffe für die Batterien (Lithium, Nickel, Kobalt, Mangan und Graphit) in Form von Erzen etc., die Weiterverarbeitung zu wichtigen Zwischenprodukten (z. B. Lithiumverbindungen in Batteriequalität, Kobalt-, Mangan- und Nickelsulfat in Batteriequalität), die Herstellung wichtiger Zellkomponenten (Anoden- und Kathodenmaterial) sowie schließlich die Produktion der Lithium-Ionen-Zellen in den sogenannten Gigafactories sind anhand ihrer prozentualen Anteile an der globalen Angebotsseite dargestellt.

Wie zuvor gezeigt, nimmt die VR China lediglich bei Graphit für die Rohstoffförderung eine sehr dominante Stellung ein. Allerdings zeigt sich Chinas Dominanz in den weiteren Stufen der Lieferkette und hier vor allem bei den Zwischenprodukten (Lithium, Nickel-, Kobalt- und Manganverbindungen sowie Graphit in Batteriequalität). An der globalen Produktion der strategischen Komponenten des Kathoden- und Anodenmaterial hat China ebenfalls einen sehr großen bis überragenden Anteil. Dies ist im folgenden Abschnitt bei der Herkunft der Firmen noch weiter erläutert. Bei der Zellproduktion dominiert China ebenfalls sehr stark, wobei besonders Batteriezellen mit LFP als Kathodenmaterial fast vollständig aus China stammen. Für andere Länder mit Zellproduktion ist vor allem die USA zu nennen, wobei mittlerweile auch in der EU erste Zellproduktionsstätten eröffnet wurden (s. TAB. 16 im ANHANG), welche aufgrund ihrer Größe andere zuvor wichtige Produktionen in Ländern wie Japan und Südkorea weit übertreffen. Insgesamt sind die Anteile an der globalen Lieferkette aufgrund des starken Ausbaus großen Schwankungen

ABB. 33 **Produktionskapazitäten und Lieferkette von Lithium-Ionen-Batterien nach Regionen**
Die Wertschöpfungskette wird vor allem ab der Rohstoffverarbeitung von China dominiert.

		Größte Produktionskapazität	Zweitgrößte Produktionskapazität	Drittgrößte Produktionskapazität	Europa	
Rohstoffe	Lithium (Förderung)	Australien 52%	Chile 26%	China 13%	Deutschland –	Restliches Europa –
	Lithium (Verarbeitung)	China 73%	USA 2%		Deutschland –	Restliches Europa –
	Kobalt (Förderung)	Kongo 72%	Russland 5%	Australien 3%	Deutschland –	Restliches Europa –
	Kobalt (Verarbeitung)	China 75%	Finnland 7%	Belgien 4%	Deutschland –	Restliches Europa ≤1%
	Graphit (Förderung)	China 73%	Brasilien 7%	Mozambique 6%	Deutschland –	Restliches Europa –
	Sphärischer Graphit	China 100%				
	Nickel (Förderung)	Indonesien 38%	Philipinen 14%	Russland 8%	Deutschland –	Restliches Europa 1%
	Nickelsulfat	China 55%	Japan 15%	Finnland 8%	Deutschland –	Restliches Europa 15%
	Mangan (Förderung)	Südafrika 36%	Gabun 22%	Australien 16%	Deutschland –	Restliches Europa –
	Mangan (Verarbeitung)	China 95%				
Komponenten	Kathode	China 71%	Japan 14%	Südkorea 13%	Deutschland –	Restliches Europa –
	Anode	China 91%	Japan 9%		Deutschland –	Restliches Europa –
Güter	Batteriezellen	China 77%	Polen 6%	USA 6%	Deutschland –	Restliches Europa –

LEGENDE China Andere Länder

QUELLE Eigene Darstellung auf Basis von (U.S. Geological Survey, 2023, Benchmark Source, 2022)

Öko-Institut, 2023

ausgeliefert. Daher sind die Zahlen schnell veraltet und kontinuierliches Monitoring ist notwendig, um das aktuelle Wissen über die Lieferketten sicherzustellen.

Durch die z. T. sehr große Dominanz der VR China bei einer Reihe von wichtigen (Zwischen-)Stufen besteht für diese Lieferkette in der gegenwärtigen Konstellation ein bedeutendes Risiko hinsichtlich der Resilienz der Versorgung für Länder und Volkswirtschaften außerhalb der VR China. Den Risiken für die Resilienz der Lieferkette Lithium-Ionen-Batterien kommt aufgrund des rasant wachsenden Hochlaufs der Elektro-

mobilität in Deutschland, in der EU und weltweit kurz- und mittelfristig eine noch größere Signifikanz zu.

Produktion von Komponenten: Herkunft der Firmen

Neben den eigentlichen Standorten der Produktion ist auch die Herkunft der jeweiligen Firmen von Relevanz. Nach einer aktuellen Studie des Fraunhofer Instituts ISI, kommen bei den Anoden die Marktanteile der Firmen in chinesischer Hand in 2022 auf deutlich über 70 Prozent, wobei Japan mit über 15 Prozent und Südkorea mit unter zehn Prozent den Rest der Welt (ca. zwei Prozent) noch deutlich übertreffen (Wicke, T., 2023).

Nach dieser Fraunhofer ISI-Studie ist bei den Kathodenmaterialien die Dominanz chinesischer Firmen mit über 65 Prozent im Vergleich zu den Anodenmaterialien etwas geringer. Dort stehen die Marktanteile südkoreanischer Firmen mit fast 20 Prozent an zweiter Stelle, während Japan immerhin noch auf ca. sieben Prozent kommt. Zu beachten ist hier, dass die EU, besonders durch Umicore als größtem europäischen Vertreter mit seinem Hauptsitz in Belgien, in 2022 mit über 6 Prozent Marktanteil einen soliden vierten Platz einnimmt (Wicke, T., 2023). Umicore hat in der Zeit allerdings noch immer vor allem in Südkorea und China produziert. Im Herbst 2022 hat Umicore allerdings in Polen seine erste Kathodenmaterialproduktion in Europa in Betrieb genommen (Schaal, S., 2022). Durch derartige Standortentscheidungen lassen sich die Unterschiede in den Zahlen zwischen der Herkunft der Firmen und den Anteilen der Länder bei der eigentlichen Produktion erklären.

Auch bei der Firmenstruktur lassen sich für das Jahr 2022 Unterschiede zwischen Anoden- und Kathodenmarkt erkennen. Während für die größten vier Anodenproduzenten mit ihrem Hauptsitz in China auf über 50 Prozent Marktanteil kommen, ist der Kathodenmarkt bzgl. der Firmen stärker diversifiziert. Dort kommt das Unternehmen mit dem größten Marktanteil gerade mal auf ca. acht Prozent, dicht gefolgt von weiteren Unternehmen ähnlicher Größe (Fraunhofer ISI; Wicke T., 2023). Dies ist allerdings nur eine Momentaufnahme und kann sich auf Grund massiver Expansionspläne weltweit, aber auch in Europa über die Jahre schnell und stark ändern. Produktion von Anodenmaterial im industriellen Maßstab existiert bisher noch nicht in der EU (Stand Juni 2023). Für Kathodenmaterial wird die Produktion in Polen von Umicore und in Deutschland von BASF derzeit unabhängig voneinander hochgefahren.

5.4. Permanentmagnete



- Die gesamte Lieferkette von Permanentmagneten wird von China dominiert. Mit jeder Stufe der Wertschöpfungskette wächst die Rolle Chinas: Rohstoffgewinnung Seltene Erden (60 Prozent Anteil Chinas), Weiterverarbeitung (87 Prozent), Herstellung Seltenerdmetalle (91 Prozent), Herstellung Neodym-Eisen-Bor-Magnete (94 Prozent).
- Bei der Weiterverarbeitung der Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium (wichtig für die Temperaturstabilität der Magnete) hat China gegenwärtig praktisch eine vollständige Monopolstellung.
- Die Nachfrage in Deutschland und global nach Permanentmagneten (Neodym-Eisen-Bor) wird bis 2030 und darüber hinaus durch Anwendungen bei Windkraftanlagen und der Elektromobilität stark wachsen.
- Deutschland und Europa sind zurzeit auf allen Stufen der Wertschöpfungskette überhaupt nicht oder nur geringfügig (z. B. circa ein Prozent der globalen Produktion an Neodym-Eisen-Bor-Magneten) vertreten.
- Der wachsende Bedarf nach Neodym-Eisen-Bor-Magneten und die extreme Importabhängigkeit erfordern rasch eine Stärkung der Wertschöpfungskette innerhalb Europas und eine stärkere Differenzierung der Lieferbeziehungen mit dem außereuropäischen Ausland.

Vom Seltenerdvorkommen zum Permanentmagnet

In der nachfolgenden Abbildung 34 sind die Stufen der Lieferkette für Permanentmagnete (Neodym-Eisen-Bor-Magnet) schematisch dargestellt. Nach dem Bergbau (Mining) der Seltenen Erden (meist in oxidischer Form) erfolgt eine aufwändige Verarbeitung des Erzmaterials über Konzentration, Aufreinigung und Separation der einzelnen Seltenen Erden in geeigneten Verbindungen. Dieser Schritt ist aufgrund der Tatsache, dass in natürlichen Vorkommen immer viele der insgesamt 17 Seltenen Erden gemeinsam vorkommen, sehr aufwändig und damit mit hohem Einsatz an Chemikalien und Energie verbunden. Der nächste wesentliche Schritt in der Lieferkette ist die Produktion von Seltenerdmetallen aus den zuvor in reiner Form produzierten Seltenerdverbindungen. Schließlich erfolgt die Herstellung der Neodym-Eisen-Bor-Magnete mit Hilfe eines anspruchsvollen Sinterverfahrens (Schüler, D. et al., 2011).

Aktuell findet kein Bergbau von Seltenen Erden in der EU statt. In den beiden folgenden Stufen ist der Europäische Anteil mit ca. einem Prozent verschwindend gering (ERMA; Gauß et al., 2021). Eine Herstellung von magnetfähigen Seltenerdlegierungen existiert nicht. Das einzige EU-Land mit Magnetproduktion ist Deutschland, wobei die gesamten zur Herstellung benötigten Legierungen aus China importiert werden. Momentan besteht somit eine sehr einseitige und damit kritische Abhängigkeit.

Rohstoffe und Reserven

Neben der reinen mengenmäßigen Verfügbarkeit von Rohstoffen in Lagerstätten spielt auch die aktuelle Nutzung und mögliche Anforderungen an eine Steigerung der Rohstoffförderung zur Befriedigung der künftigen Nachfrage eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Dynamik der Kritikalität. Zur überschlägigen Einordnung der Entwicklung auf globaler Ebene ist dazu in Abbil-

dung 35 die nach den IEA-Szenarien (IEA, 2021c) berechnete Nachfrage nach Seltenen Erden durch den weltweiten Hochlauf von Elektrofahrzeugen und Windkraftanlagen²⁹ ins Verhältnis zur Gesamtnachfrage im Jahr 2020 gesetzt (Schüler, D. et al., 2011).

Für die Leichte Seltene Erden zeigt sich dabei eine knappe Verdopplung der globalen Nachfrage durch Elektromobilität und Windkraft im Jahr 2030, die 2040 auf etwa diesem Niveau bleibt. Bei den Schweren Seltenen Erden führt der Zubau der beiden Technologien 2030 zu einer Verdreifachung und 2040 zu einer Vervierfachung der aktuellen gesamten globalen Nachfrage. Die Nachfrage nach Schweren Seltenen Erden stellt sich aus dieser Sicht trotz mengenmäßig geringerer Bedarfe kritischer dar, was auch in der folgenden Analyse zu den Vorkommen (geringere Mengen, stärkere Länderkonzentration) bestätigt wird. Im Gegensatz zur Situation in Deutschland ist der globale Nachfragepeak nach (IEA, 2021c) 2030 noch nicht erreicht.

Die Anteile der wichtigsten Förderländer (Minenproduktion) von Seltenen Erden³⁰ sind in Abbildung 36 dargestellt. China (58 Prozent), USA (15 Prozent), Myanmar (12 Prozent) und Australien (8 Prozent) liefern die größten Anteile an der Weltförderung von rund 290.000 Tonnen pro Jahr (Einheit Seltenerd-Oxid-Äquivalente) (U.S. Geological Survey, 2023). Eine interessante Entwicklung stellt der Vergleich mit den Daten für das Jahr 2011 – also zehn Jahre früher – dar. Hier betrug der Anteil der VR China an der globalen Minenproduktion rund 95 Prozent bei einer globalen Produktionsmenge von rund 111.000 Tonnen im Jahr 2011 (U.S. Geological Survey, 2013). Dies zeigt zum einen die erhebliche Steigerung der globalen Minenproduktion an Seltenen Erden innerhalb von 10 Jahren, aber auch, dass sich Anteile an der globalen Minenproduktion drastisch verschieben können.

29 Zzgl. zur aktuellen Gesamtnachfrage 2020, also unter der Annahme, dass die anderen Anwendungsgebiete auf konstantem Niveau bleiben.

30 Die Statistikdaten der USGS werden nur für alle Seltenen Erden zusammen in Summe jährlich ausgewiesen. Scandium ist in diesen Zahlen i.W. nicht enthalten (U.S. Geological Survey, 2023).

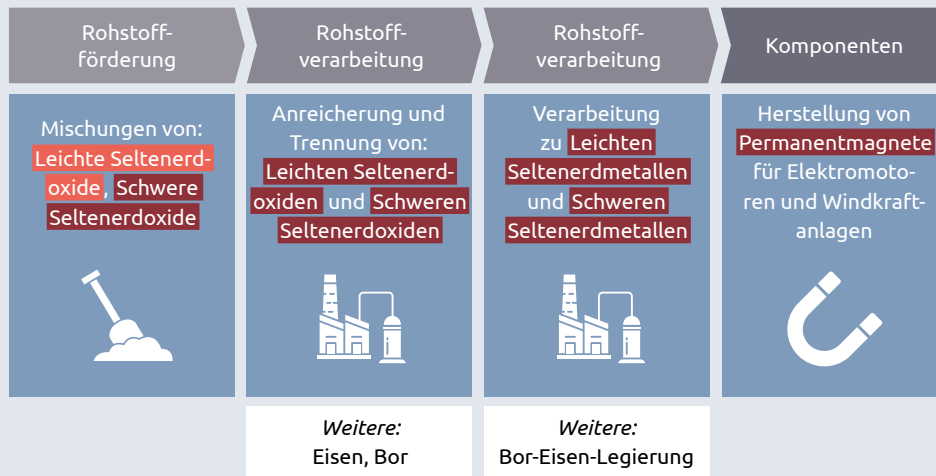


ABB. 34 **Lieferkette zur Herstellung von Permanentmagneten**

Seltene Erden als Rohstoff für Permanentmagnete sind als sehr kritisch einzustufen, wobei die Kritikalität über die Wertschöpfungskette eher noch zunimmt.

HINWEIS Rohstoffförderung von Seltenen Erden: Die Rohstoffe kommen jeweils in unterschiedlichen Zusammensetzungen vor. Der Anteil der Seltenen Erdelemente ist in den jeweiligen Lagerstätten sehr unterschiedlich.

LEGENDE Kritikalität: ■ Sehr kritisch ■ Mittel kritisch ■ Mäßig kritisch **QUELLE** Eigene Darstellung

Öko-Institut, 2023

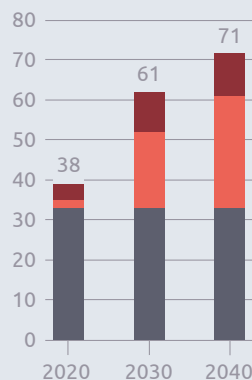
ABB. 35 **Weltweite Nachfrage nach Seltenen Erden steigt signifikant durch Ausbau der Windkraft und Entwicklung der Elektromobilität**

Es kommt zu einer Vervielfachung des Bedarfs von Seltenen Erden in 2030 und 2040 durch die E-Mobilität und Windkraft im Vergleich zu 2020

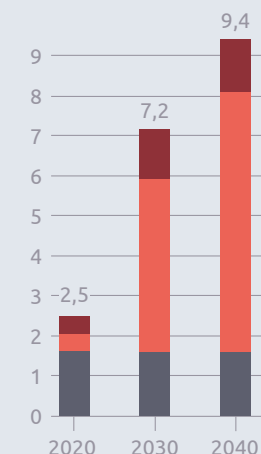
LEGENDE
■ Windkraft
■ Verkehr
■ Sonstige

QUELLE Eigene Darstellung

Leichte Seltene Erden: Neodym, Praseodym in (kt)



Schwere Seltene Erden: Dysprosium, Terbium in (kt)



Öko-Institut, 2023

Aus Abbildung 36 lässt sich entnehmen, dass mit dem Stand 2021 für Seltene Erden bekannte globale Reserven von rund 130 Millionen Tonnen Seltenerd-Oxid-Äquivalenten ausgewiesen sind. Dies ist zum einen eine gewaltige Größenordnung³¹, zum anderen zeigt sich, dass Länder wie z. B. Brasilien oder Vietnam, die im Jahr 2021 nur vernachlässigbar kleine Anteile an der Minenproduktion hatten, gewaltige Anteile an den bekannten

globalen Reserven an Seltenen Erden aufweisen. Weitere Veränderungen der Länderanteile an der globalen Minenproduktion an Seltenen Erden sind für die Zukunft also möglich.

Für die Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten werden die Leichten Seltenen Erden Neodym und Praseodym sowie die Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium benötigt. In vielen natürlichen Vorkommen (z. B. in China, Australien, USA und Indien) liegen die Anteile an Neodym zwischen 10 – 30 Prozent Anteil an dem jeweiligen Vorkommen an Seltenen Erden, bei Praseodym bewegt sich die Größenordnung

³¹ Es ist schon länger bekannt, dass der historisch bedingte Begriff «Seltene Erden» nach Mengengesichtspunkten irreführend ist.

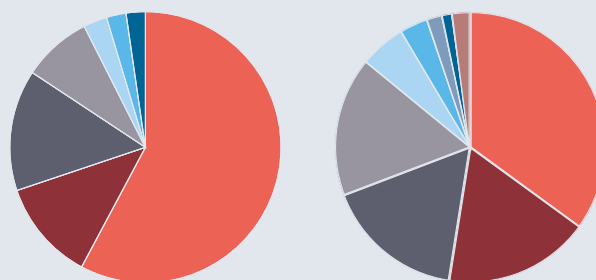
ABB. 36 **Förderung und weltweite Reserven von Seltenen Erden***

China, USA, Myanmar und Australien liefern aktuell die größten Anteile an der Weltförderung. Reserven liegen aber auch in anderen Ländern, bspw. Vietnam und Brasilien

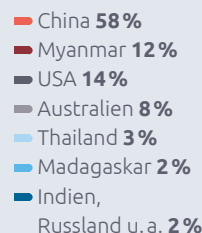
* Scandium, auch ein Seltenerdelement, das für die Hochtemperaturelektrolyse diskutiert wird (vgl. Kap. 4.5. Elektrolyseure und Wasserstoffinfrastruktur & 5.5. Elektrolyseure), ist aus dieser Aufstellung nach (U.S. Geological Survey, 2023) ausgeschlossen.

** Für Myanmar sind nach (U.S. Geological Survey, 2023) keine Informationen zu Reserven verfügbar.

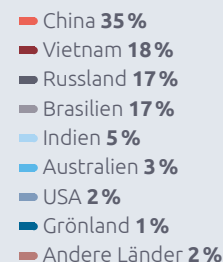
QUELLE Eigene Darstellung nach (U.S. Geological Survey, 2023):
Minenproduktion von Seltenen Erden im Jahr 2021 und Reserven im Jahr 2021. Reserven ohne Myanmar**



Rohstoffförderung
2021: 290 kt



Reserven
2021: 130 Mio. t

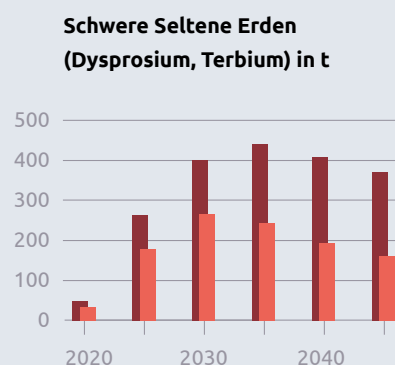
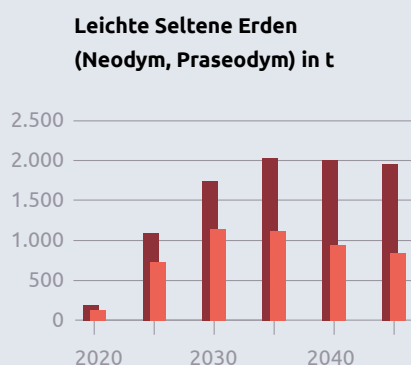


Öko-Institut, 2023

ABB. 37 **Jährliche Nachfrage nach Leichten und Schweren Seltenen Erden für Elektrofahrzeuge in Deutschland in den Szenarien «KNDE2045» und «Inlandsproduktion»**

LEGENDE

- Szenario «Inlandsproduktion»
- Neuzulassungen Szenario «KNDE2045»



QUELLE Eigene Darstellung

Öko-Institut, 2023

des Anteils oft zwischen vier und sechs Prozent. Für das Jahr 2020 wurde eine Minenproduktion von 50.000 Tonnen Neodym-Oxid abgeschätzt (Gielen, D.; Lyons, M., 2022)³².

Die Angebotssituation bei den Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium stellt sich demgegenüber kritischer dar, da diese bislang nur in der VR China und Myanmar aus natürlichen Vorkommen gewonnen werden und die Weiterverarbeitung ausschließlich in der VR China erfolgt. Außerdem sind die Anteile der

Schweren Seltenen Erden an den natürlichen Vorkommen häufig sehr gering. Für Dysprosium wird ein Mittelwert von weniger als einem Prozent Anteil an den gesamten Vorkommen an Seltenen Erden ausgewiesen (Gielen, D.; Lyons, M., 2022). Für das Jahr 2019 geben (Xiao, S. et al., 2022) eine Minenproduktion von ca. 4.000 Tonnen an.

Permanentmagnete in Deutschland: Bedarf an kritischen Rohstoffen bis 2045 für Elektromobilität

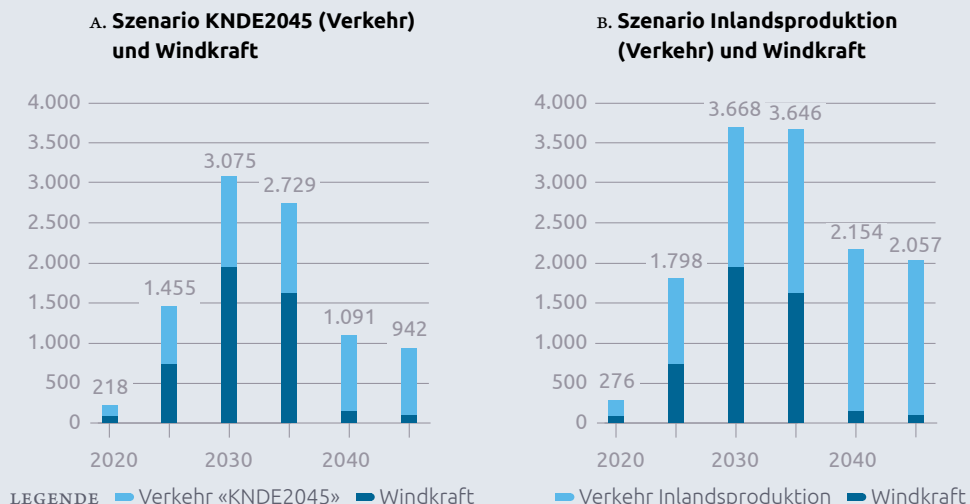
In Kapitel 4.4 wurde die Nachfrage nach Neodym-

32 Aus dem Wert für Neodym-Oxid lässt sich für 2020 eine Minenproduktion von ca. 12.500 Tonnen Praseodym-Oxid abschätzen.

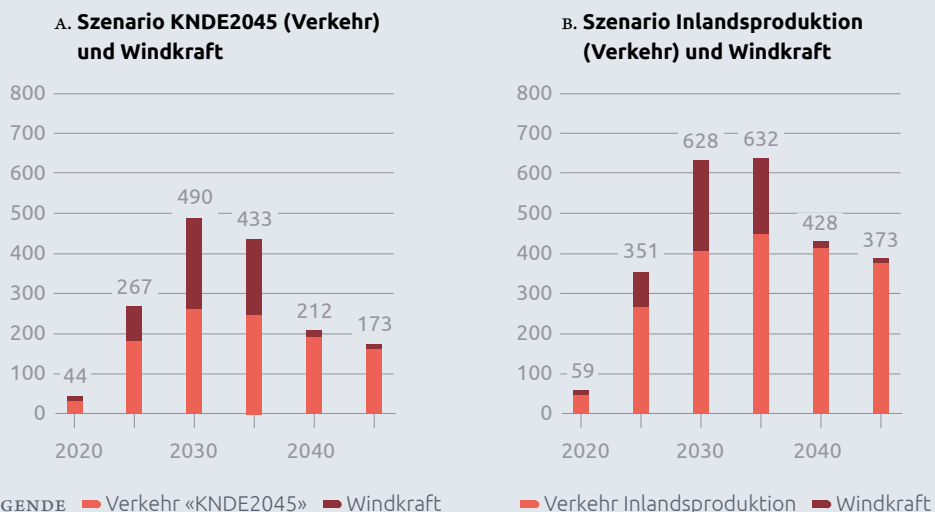
ABB. 38 **Jährliche Nachfrage nach Seltenen Erden für Elektrofahrzeuge und Windkraft in Deutschland in den Szenarien «KNDE2045» und «Inlandsproduktion»**

Während die Nachfrage nach Permanentmagneten aus der Windkraft bis 2040 wieder sehr stark abnimmt, verbleibt die Nachfrage aus der Elektromobilität auf hohem Niveau. Nachfrage in Szenario Inlandsproduktion ist langfristig doppelt so hoch wie im Szenario KNDE2045.

Leichte Seltene Erden (Neodym, Praseodym) in t



Schwere Seltene Erden (Dysprosium, Terbium) in t



QUELLE Eigene Darstellung

Öko-Institut, 2023

Eisen-Bor-Magneten für Fahrzeugantriebe abgeleitet. Die daraus resultierende Nachfrage nach Seltenen Erden bis zum Jahr 2045 ist in der Abbildung 37 für die Neuzulassungen in Deutschland (Szenario «KNDE2045») und das Szenario «Inlandsproduktion» dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Nachfrage durch den Hochlauf der Elektromobilität in den nächsten Jahren deutlich erhöhen wird und bei den Neuzulassungen 2030 mit knapp 1.500 Tonnen ihren Peak erreicht. Danach flacht die Nachfrage leicht ab, bleibt jedoch auch 2045 noch bei insgesamt 1.000 Tonnen. Im Szenario «Inlandsproduktion» wird die maximale Nachfrage 2035 mit insgesamt

fast 2.500 Tonnen erreicht. Danach bleibt sie bei den Leichten Seltenen Erden bis 2045 fast konstant, während sie bei den Schweren Seltenen Erden aufgrund der Einsparungen in den Magneten und des steigenden Anteils anderer Motortypen zurückgeht.³³

33 Die Fahrzeugzahlen sind nach dem Szenario «Inlandsproduktion» 2035 bis 2045 relativ konstant (vgl. 4.3. Batterien für Elektromobilität). Bei den Leichten Seltenen Erden gleichen sich die durch einen höheren Anteil alternativer Motortechnologien eingesparten Mengen ungefähr durch den höheren Bedarf in den Magneten (Einsparung SSE wird durch höheren Anteil LSE ausgeglichen) aus (vgl. 4.4. Permanentmagnete für Elektromobilität).

ABB. 39 Globale Lieferkette Permanentmagnete nach Hauptländern 2021

Die Wertschöpfung von Permanentmagneten wird klar von China über alle Schritte dominiert

		Größte Produktionskapazität	Zweitgrößte Produktionskapazität	Drittgrößte Produktionskapazität	Europa	
Rohstoffe	Seltene Erden (Förderung)	China 58 %	USA 14 %	Myanmar 12 %	Deutschland –	Restliches Europa –
	Leichte SE-Oxide	China 87 %	Malaysia 11 %	Indien 1 %	Deutschland –	Restliches Europa 1 %
	Schwere SE-Oxide	China 100 %			Deutschland –	Restliches Europa –
	Seltenerdmetalle	China 91 %	Japan 7 %	ROW 1 %	Deutschland –	Restliches Europa 1 %
Komponente	Permanentmagnete	China 94 %	Japan 5 %	Deutschland 1 %	Deutschland 1 %	Restliches Europa –

LEGENDE China Andere Länder QUELLE Eigene Darstellung mit Daten von (ERMA; Gauß et al., 2021)

Öko-Institut, 2023

Die Gegenüberstellung der Nachfrage nach Seltenen Erden aus den Bereichen Elektromobilität und Windkraft für Deutschland im Szenario «KNDE2045» zeigt, dass sich beide Technologien in ähnlichen Größenordnungen bewegen (vgl. ABB. 39). Sowohl im Bereich der Windkraft als auch für Elektromobilität berechnet die vorliegende Studie einen Nachfragepeak für das Jahr 2030. Die Nachfrage flacht im Falle der Windkraft nach dem Jahr 2035 jedoch deutlicher ab und erreicht 2040/2045 das Ausgangsniveau von 2020.

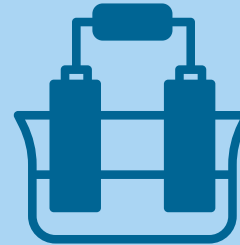
Die gesamte Nachfrage für Elektroantriebe und Windkraft in Deutschland liegt demnach für das Szenario «KNDE2045» im Maximum bei ca. 3.000 Tonnen pro Jahr bei Leichten Seltenen Erden (vorwiegend Neodym) und bei ca. 500 Tonnen pro Jahr Schweren Seltenen Erden (vorwiegend Dysprosium). Im Szenario Inlandsproduktion liegt sie etwas höher. Demgegenüber stehen aktuelle globale Fördermengen von ca. 50.000 Tonnen pro Jahr Neodym und ca. 4.000 Tonnen pro Jahr Dysprosium (s. Abschnitt Rohstoffe und Reserven). Zur Steigerung der Resilienz sind dementsprechend neben einer Diversifizierung der Lieferländer auch Maßnahmen wesentlich, die eine Reduktion der (Primär-) Materialnachfrage oder eine verträgliche Steigerung der Fördermengen ermöglichen (vgl. KAP. 6).

Lieferkette wird klar von China dominiert

Wie zuvor geschildert ist der Anteil der VR China bei der Gewinnung (Bergbau) der Seltenen Erden in den letzten Jahren auf rund 60 Prozent an der globalen Förderung gesunken. Dies ist allerdings noch immer sehr marktbestimmend. Zusätzlich nimmt die Dominanz der VR China mit jedem weiteren Schritt der Lieferkette zu und erreicht bei der Produktion der Permanentmagnete (Dauermagnete) mit rund 94 Prozent einen überragenden Anteil. Japan nimmt hier den zweiten Platz mit 5 Prozent Marktanteil ein, während auf die EU nur rund ein Prozent an der globalen Produktion an Neodym-Eisen-Bor-Magneten entfallen.

Während nach (ERMA; Gauß et al., 2021) zwar eine geringfügige Produktion von Seltenerdmetallen in der EU existiert, werden jedoch keine magnetfähigen Seltenerdlegierungen hergestellt (Referenzjahr 2019), so dass die Lieferkette hier gänzlich unterbrochen ist. Basierend auf den bekannten Projekten rechnet (ERMA; Gauß et al., 2021) jedoch kurzfristig mit einem Kapazitätsaufbau, der bis 2030 auf ca. 10 Prozent gesteigert werden kann. Bei der Magnetherstellung sind nach derselben Quelle bis 2030 ca. 20 Prozent möglich, im Bereich der Seltenerdoxidherstellung für Magnete sogar ca. 30 Prozent (s. 6. Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz).

5.5. Elektrolyseure



- Die alkalische Elektrolyse (AEL) sowie die PEM-Elektrolyse (PEMEL) sind aktuell marktreif und werden auch in den nächsten Jahren den Markt für Elektrolyseure dominieren.
- Bei der AEL sind keine kritischen Rohstoffe notwendig; bei der PEMEL sind Platin, Iridium und Titan zu berücksichtigen.
- Iridium ist mit Abstand der kritischste Rohstoff für PEMEL und für Elektrolyseure insgesamt, da die Minenproduktion von Iridium nicht ausgeweitet werden kann (da als Begleitmetall abhängig von der Platin- und Palladiumförderung).
- Die Versorgungssituation bei Platin und Titan (Titanschwamm) ist kaum angespannt, da für beide Metalle Materialeffizienz und Recyclingoptionen und für Titanschwamm noch freie Angebotskapazitäten erkennbar sind.
- Die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) befindet sich erst im Pilotstadium und erst mittelfristig werden moderate Marktanteile erwartet.
- Bei HTEL sind als essenzielle Rohstoffe Scandium und Yttrium zu nennen, die beide zur Gruppe der Seltenen Erden zählen.
- Die Yttriumversorgung wird vor dem Hintergrund der geringen erwartbaren Mengen als nicht kritisch eingestuft; Scandium wird bislang erst in sehr geringen Mengen von wenigen Ländern produziert, allerdings sind hier mittel- und langfristig Angebots-erweiterungen durch zusätzliche Lieferländer realisierbar.

Sehr hohe Kritikalität bei PEM-Elektrolyseuren durch den Einsatz von Iridium

Bei den Elektrolyseuren ergibt sich die Kritikalität durch den Einsatz der kritischen Rohstoffe. In PEM-Elektrolyseuren werden Iridium, Platin und Titan eingesetzt. In Hochtemperatur-Elektrolyseuren wird Scandium und Yttrium benötigt. Iridium ist mit Abstand der kritischste Rohstoff bei Elektrolyseuren und wird nach Definition dieser Studie als sehr kritisch eingestuft. Iridium gehört zu den wenigen Rohstoffen, deren natürliche Vorkommen tatsächlich sehr selten sind und die Minenproduktion nicht ohne weiteres gesteigert werden kann (siehe unten zur Rohstoffförderung). Zudem besteht eine hohe Länderkonzentration bei der Förderung auf Südafrika. Darüber hinaus wird bei PEM-Elektrolyseuren Platin und Titan eingesetzt. Die Versorgungssituation bei Platin und Titan (Titanschwamm) ist kaum angespannt, da für beide Metalle Materialeffizienz und Recyclingoptionen und für Titan-schwamm noch freie Angebotskapazitäten erkennbar sind.

Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL), die sich derzeit erst im Pilotstadium befindet, werden Scandium und Yttrium eingesetzt. Sie gehören zu der Gruppe der Seltenen Erden, sind jedoch im Vergleich zu den Seltenen Erden, die für Permanentmagnete benötigt werden, kurz- und mittelfristig (bis 2030) nicht durch Angebotsverknappungen bedroht. Die Yttriumversorgung wird für die HTEL vor dem Hintergrund der geringen erwartbaren Mengen als nicht kritisch eingestuft; Scandium wird bislang erst in sehr geringen Mengen von wenigen Ländern produziert, allerdings sind hier mittel- und langfristige Angebotserweiterungen durch zusätzliche Lieferländer realisierbar.

Die Produktion von Elektrolyseuren und deren Komponenten ist aus heutiger Sicht kaum kritisch, da Europa derzeit noch einen Marktanteil von rund 30 Prozent hat. Entscheidend hierbei ist aber, dass Europa weiterhin Marktanteile sichert und nun in die Automatisierung und Skalierung der Anlagen investiert wird.

Rohstoffförderung

PEM-Elektrolyseure: Iridium, Platin, Titan

Iridium zählt neben Platin zu den sogenannten Platingruppenmetallen (PGM)³⁴. Es ist sehr korrosionsbeständig und damit zukünftig für den Markthochlauf von PEM-Elektrolyseuren ein wichtiges Metall. Heute wird Iridium vor allem für Zündkerzen, Schmelztiegel und in der Elektrochemie eingesetzt. Es gehört zu den wenigen Rohstoffen, die tatsächlich selten sind. Jedes Jahr werden nur 6 bis 10 Tonnen gefördert. Zudem ist sehr kritisch, dass Iridium in den natürlichen Vorkommen ausschließlich als sogenanntes «minor metal» in sehr geringen Konzentrationen³⁵ vorkommt und daher vor allem nur als Nebenprodukt der Platinproduktion gefördert wird (DERA, 2022). Damit ist die Förderung von Iridium gänzlich abhängig von der Entwicklung der Platinförderung. Die Platinförderung wird zukünftig nicht weiter gesteigert werden. Denn Platin wird vor allem für Abgaskatalysatoren bei Diesel- und Ottomotoren benötigt. Durch den Rückgang der fossilen Verbrennungstechnologien im Verkehr und die guten Recyclingpotenziale von Platin aus alten Auto-Katalysatoren (vgl. KAP. 6), ist davon auszugehen, dass die Platin- und damit die Iridiumförderung nicht ausgeweitet werden. Die Ausweitung der Förderung nur für Iridium wäre nach wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten nicht realisierbar.

Zudem ist die Förderung von Iridium auf wenige Länder und Unternehmen³⁶ konzentriert: Südafrika ist mit einem Anteil von 85 Prozent der absolut größte Einzelproduzent. Weitere sieben Prozent der Förderung entfallen auf Zimbabwe. Die restlichen acht Prozent

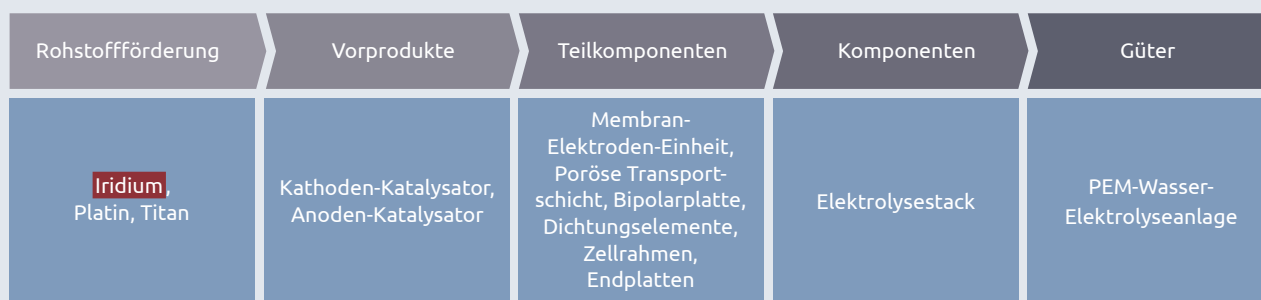
34 Die PGM umfassen die Elemente Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium.

35 Der Iridiumgehalt in natürlichen Erzen liegt bei lediglich 0,02 – 0,1 g/t Erz.

36 Nach Angaben der (DERA, 2022) werden PGM nur von wenigen Unternehmen gefördert und direkt in den Förderländern den ersten Stufen der Lieferkette zugeführt, was mit ihrem hohen Wert begründet wird. Bis auf unternehmensinterne Transfers gibt es keinen reinen Export von Erzen und Konzentraten.

ABB. 40 **Lieferkette zur Herstellung von PEM-Elektrolyse-Anlagen (PEMEL)**

Bei der PEMEL ist der Einsatz von Iridium sehr kritisch, da die Produktion nicht ausgeweitet werden kann. Platin und Titan sind strategisch relevant, aber werden in dieser Studie als nicht kritisch eingestuft.



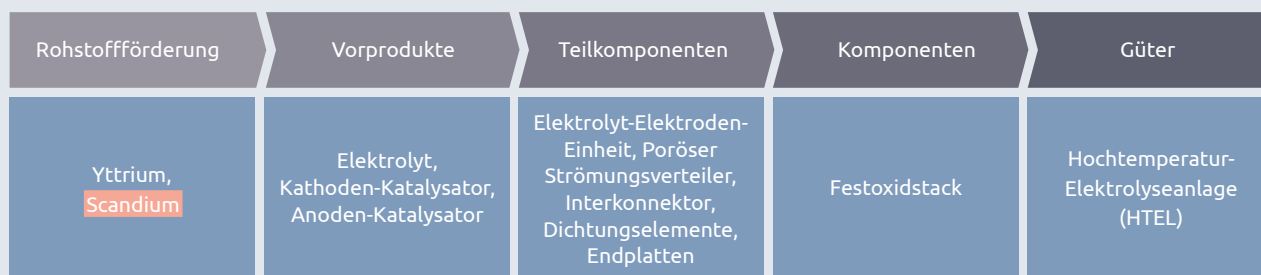
LEGENDE Kritikalität: ■ Sehr kritisch ■ Mittel kritisch ■ Mäßig kritisch

QUELLE Eigene Darstellung auf Basis von IndWedE und (U.S. Department of Energy, 2022a)

Prognos, 2023

ABB. 41 **Lieferkette zur Herstellung von Hochtemperatur-Elektrolyse-Anlage (HTEL)**

in der HTEL wird Scandium verwendet und hier als mäßig kritisch eingestuft. Yttrium ist nicht als kritisch eingestuft.



LEGENDE Kritikalität: ■ Sehr kritisch ■ Mittel kritisch ■ Mäßig kritisch

QUELLE Eigene Darstellung auf Basis von IndWedE und (U.S. Department of Energy, 2022a)

Prognos, 2023

werden in den USA, Kanada und Russland³⁷ abgebaut (vgl. ABB. 42). Zudem zeichnen sich keine neuen Player und Optionen ab, da sich die weltweiten Reserven für Platingruppenmetalle in den heutigen Förderländern befinden.

Bislang ist die kritische Abhängigkeit von Iridium noch gering, weil der globale Hochlauf von PEM-Elek-

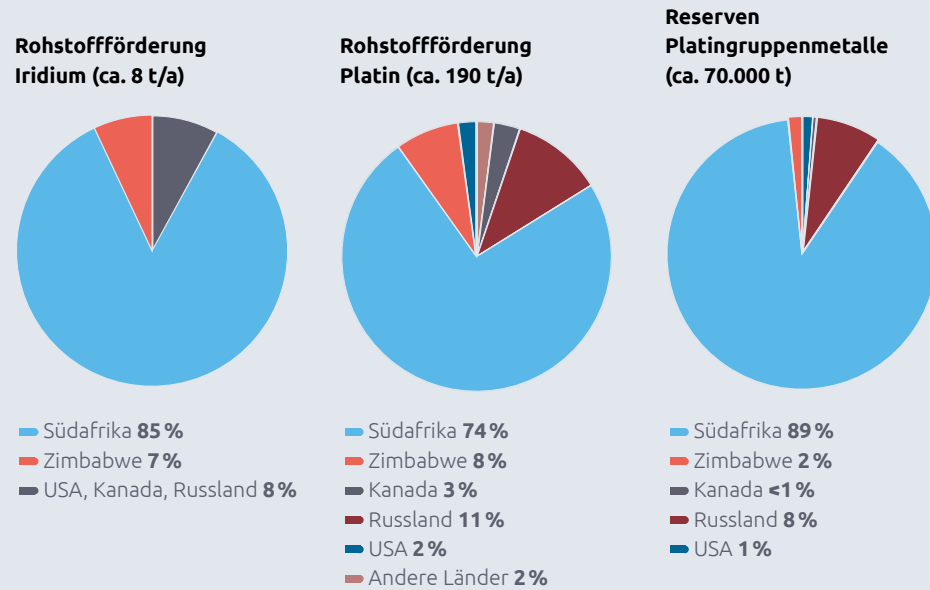
trolyseuren noch am Anfang steht. Da sie jedoch im Vergleich zur heute gängigen alkalischen Elektrolyse (AEL) besonders flexibel gefahren werden können und damit besser auf die volatile Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien reagieren können, wird der Marktanteil in Zukunft deutlich zunehmen (vgl. KAP. 4.5.)

Platin wird von der Liste der Critical Raw Material der Europäischen Kommission als kritischer Rohstoff gelistet. Grund hierfür ist die hohe Länderkonzentration auf Südafrika von rund 75 Prozent der Weltförderung. Mit Blick auf das Verhältnis von Angebot und Nachfrage sind hingegen kaum Versorgungsengpässe zu erwarten. Deshalb ist Platin zwar strategisch relevant, aber nicht kritisch im Sinne dieser Studie. Die heutige weltweite Platinförderung liegt bei 200 Tonnen pro Jahr. Der zusätzliche Bedarf durch Ausbau von PEM-Elektro-

37 Platingruppenmetalle, wie Iridium und Platin, treten meistens mit sulfidischem Nickel und Kupfer auf. In Russland dominieren Nickel und Kupfer die Lagerstätten, deshalb sind hier Platingruppenmetalle ein Nebenprodukt der Nickel- und Kupfergewinnung und damit auch von deren Nachfrage abhängig. In Südafrika hingegen dominieren die Platingruppenmetalle die Lagerstätten, es gibt nur geringe Anteile von Nickel und Kupfer. Nach (Dera 2022) liegen z.B. in Südafrika die Platingehalte bei 1,26-3,25 g/t, die Iridiumgehalte jedoch nur bei 0,02-0,1 g/t.

ABB. 42 Förderung und weltweite Reserven von Iridium und Platin

Hohe Länderkonzentration bei Iridium und Platin durch hohen Marktanteil von Südafrika bei der Förderung und den Reserven.

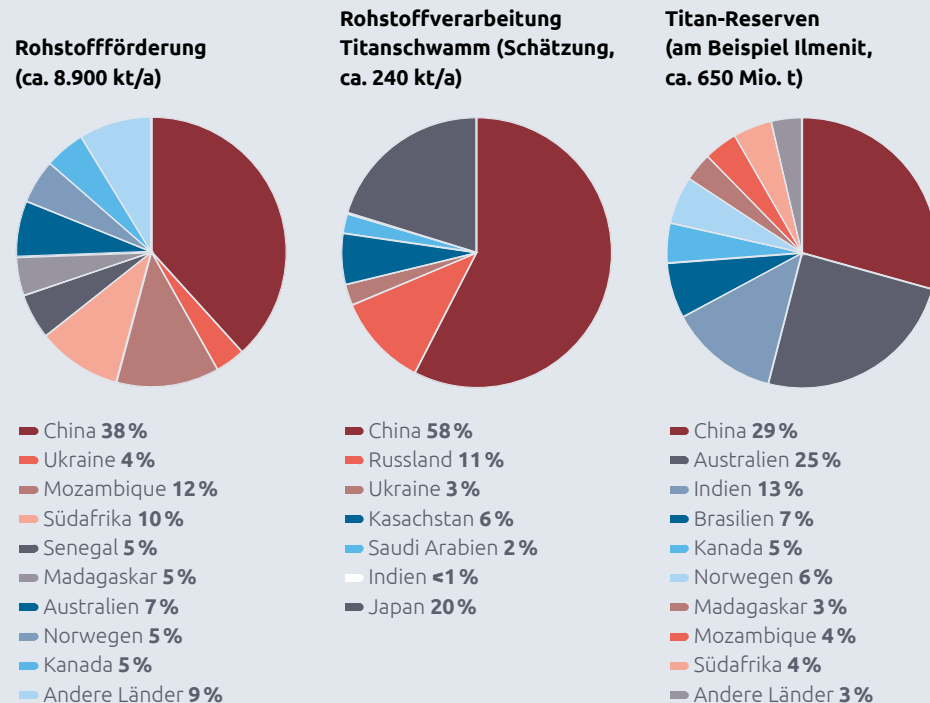


QUELLE Eigene Darstellung nach (JM, 2022): Minenproduktion von Iridium im Jahr 2021, und (U.S. Geological Survey, 2023): Minenproduktion von Platin im Jahr 2021 und Reserven der Platingruppenmetalle (u.a. Platin, Iridium) im Jahr 2023.

Öko-Institut, 2023

ABB. 43 Förderung und weltweite Reserven von Titan

Bei Titan besteht bei der Förderung und den Reserven eine geringere Marktkonzentration.



QUELLE Eigene Darstellung nach (U.S. Geological Survey, 2023). Produktion von Titan (Förderung am Beispiel Ilmenit, zzgl. 600 kt/a Rutil, und Titanschwammproduktion) im Jahr 2021, und Reserven von Titanmineralen am Beispiel Ilmenit (zzgl. 50 Mio. t Rutil) im Jahr 2023, Aufteilung auf Länder. Rohstoffverarbeitung zu Titanschwamm basiert auf eigener Schätzung. Darstellung in Kilotonnen (kt)

Öko-Institut, 2023

lyseuren weltweit hält sich in Grenzen³⁸. Zudem werden durch den Rückgang der Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, welcher die Hauptanwendung von Platin ist, zukünftig substanzielle Mengen im Markt frei. Des Weiteren kann Platin auch sehr gut als Sekundärrohstoff genutzt werden durch das etablierte Recycling von alten Autoabgas-Katalysatoren.

Neben Iridium und Platin wird in PEM-Elektrolyseuren auch Titan eingesetzt. Titan wird weltweit vor allem aus den Mineralen Ilmenit und Rutil gewonnen, wobei die Ilmenit-Förderung deutlich überwiegt: rund neun Millionen Tonnen pro Jahr gegenüber 0,6 Millionen Tonnen pro Jahr (U.S. Geological Survey, 2023), Abbildung 43). Allerdings wird nur ein sehr geringer Teil (2,5 Prozent) des in Minen geförderten Titans über Titanschwamm zu metallischem Titan aufbereitet. Die weitaus größten Mengen werden zu Titandioxid verarbeitet und als Pigment eingesetzt. Metallisches Titan wird heute vorwiegend für Titanlegierungen, insbesondere im Flugzeugbau, eingesetzt.

Während sich die Förderung von Titanmineralen auf über zehn Länder verteilt, wird Titanschwamm weltweit in sieben Ländern produziert. In beiden Fällen ist China führend, bei Titanschwamm gefolgt von Japan, Russland, Kasachstan und der Ukraine (U.S. Geological Survey, 2023). Ilmenit wird nach China v.a. in afrikanischen Ländern, aber auch in Australien, Norwegen, der Ukraine und Kanada gefördert.³⁹ Ein Vergleich der

heutigen globalen Titanschwammproduktion – rund 240.000 Tonnen im Jahr 2021, davon rund 20 Prozent in Japan – mit dem Bedarf im «KNDE2045»-Szenario (im ungünstigsten Fall, d.h. ohne Materialeffizienzgewinne) von im Maximum rund 2.000 Tonnen pro Jahr zeigt, dass die Angebotssituation für Titanschwamm (und erst recht für Titanmineralien) sich um Größenordnungen unkritischer darstellt im Vergleich zum Platingruppenmetall Iridium, welches für PEM-Elektrolyseure essentiell ist.

Hochtemperatur-Elektrolyseure: Yttrium und Scandium

Bei HTEL sind als essenzielle Rohstoffe Scandium und Yttrium zu nennen, die beide zur Gruppe der Seltenen Erden zählen. Für Yttrium wird für das hier berechnete Szenario im Maximum nur ein sehr überschaubarer jährlicher Bedarf von rund 6 Tonnen ausgewiesen – und dies ohne Berücksichtigung von Materialeffizienzgewinnen und auch erst sehr langfristig ab 2040. Dem steht eine Größenordnung der jährlichen globalen Yttriumgewinnung von 8.000 bis 12.000 Tonnen im Jahr 2021 gegenüber (U.S. Geological Survey, 2023). Der zusätzliche Bedarf – auch bei einer Hochskalierung auf die Weltnachfrage – ist gegenüber dieser heutigen Produktionsmenge als marginal einzustufen. Bislang ist die Minenproduktion für Yttrium fast ausschließlich auf VR China und Myanmar konzentriert. Die natürlichen Yttriumreserven werden jedoch auf mehr als 500.000 Tonnen abgeschätzt – und diese Zahl umfasst noch nicht die erheblichen Reserven in Myanmar, die bislang nicht quantifiziert sind (U.S. Geological Survey, 2023). Natürliche Reserven für Yttrium werden auch für Brasilien, Australien, Kanada und Indien aber auch für Schweden berichtet.

Scandium wird bislang nur in den Größenordnungen zwischen 15 bis 25 Tonnen jährlich als Nebenprodukt der Aufbereitung von Titan-, Zirkon-, Kobalt- und Nickelerzen gewonnen (U.S. Geological Survey, 2023). China hat hier einen Anteil von mehr als 75 Prozent (DERA, 2022), gefolgt von Russland und den Philippinen. Mit einem Maximalbedarf von gut elf Tonnen

38 Für den Ausbau von PEM-Elektrolyseuren im hier berechneten Szenario werden für Deutschland je nach Materialintensität jährlich zwischen 1,7 (bei heutiger Materialintensität) und 0,2 Millionen Tonnen (bei möglicher zukünftiger Materialintensität) ab dem Jahr 2040 benötigt. Da die Anlagen bislang nur in kleinem Maßstab produziert werden und hier ein hohes Potenzial zur Minderung des Rohstoffeinsatzes durch Skaleneffekte möglich sind, ist eine deutliche Reduzierung der Materialintensität realistisch. Unterstellt man, dass weltweit 100 bis 200 Mal so viele Kapazitäten aufgebaut werden wie in Deutschland, so würde der Bedarf bei niedriger Materialintensität zwischen 20 bis 40 Tonnen pro Jahr liegen. Das sind zehn bis 20 Prozent der heutigen Förderung.

39 Die Ukraine hat auch einen relevanten Anteil an der Rutil-Förderung; sie liegt hier mit 95.000 t/a gleichauf mit Südafrika, weitere relevante Förderländer sind Australien, Sierra Leone und Kenia (U.S. Geological Survey, 2023).

Scandium jährlich (ca. 2040) weist das Angebot für Scandium aus heutiger Sicht Resilienzfragen für das «KNDE2045»-Szenario auf. Auch die DERA stuft das zukünftige Verhältnis von Nachfrage und Angebot für Scandium vor dem Hintergrund des erwarteten Hochlaufs der Elektrolyseurkapazitäten für Wasserstoff als erheblich relevanter ein als für Yttrium, Platin und Titan – aber deutlich weniger relevant wiederum zu Iridium.

Für Scandium werden keine Daten der weltweiten Reserven ausgewiesen, aber (U.S. Geological Survey, 2023) betont, dass natürliche Ressourcen für Scandium reichlich vorhanden sind – es gibt größere Ressourcen als für das Massenmetall Blei. Diese Ressourcen erstrecken sich über mehr als 100 unterschiedlichen Mineralien, die in etlichen Ländern, darunter auch Finnland und Norwegen, vorhanden sind. Allerdings kommt Scandium nur als Begleitelement in Konzentrationen von 0,5 – 100 ppm z. B. in Zirkon-, Zinn-, Nickel- und Bauxitlagertstätten vor (DERA, 2022). Diese Tatsache macht die Gewinnung von Scandium relativ aufwendig und teuer.

Elektrolyseure in Deutschland: Bedarf an Schlüsselrohstoffen bis 2045

Mit dem Hochlauf der Elektrolyseproduktion steigt auch der Bedarf von Technologiemetallen, insbesondere dem sehr kritischen Iridium (Platin und Titan sind strategisch relevant jedoch nicht kritisch) in der PEM-Technologie sowie das mäßig kritische Scandium⁴⁰ bzw. das nicht kritische Yttrium in der HTEL, die für die Funktionalität der entsprechenden Technologien aktuell unverzichtbar sind. Nachfolgende Abbildung 44 zeigt zwei mögliche Hochlaufkurven der kritischen Materialien für das Szenario «KNDE2045» unter Annahme der Technologieverteilung im jährlichen Elektrolysezubau (vgl. Kap. 4.5). Der obere Pfad ergibt sich, wenn die heutige Materialintensität der Technologien zugrunde gelegt wird, der untere Pfad, wenn ein auf Basis der wissenschaftlichen Literatur deutlich reduzierter spezi-

fischer Materialeinsatz realisiert werden kann (kontinuierliche Reduktion vom heutigen Niveau bis auf ca. -90 Prozent im Jahr 2040).

Der Reduktion der Materialintensität kommt jedoch für alle analysierten Metalle – aber hier besonders für Iridium – eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Steigerung der Resilienz der Lieferketten zu. Diese und weitere notwendige Maßnahmen werden in Kapitel 6 vorgestellt.

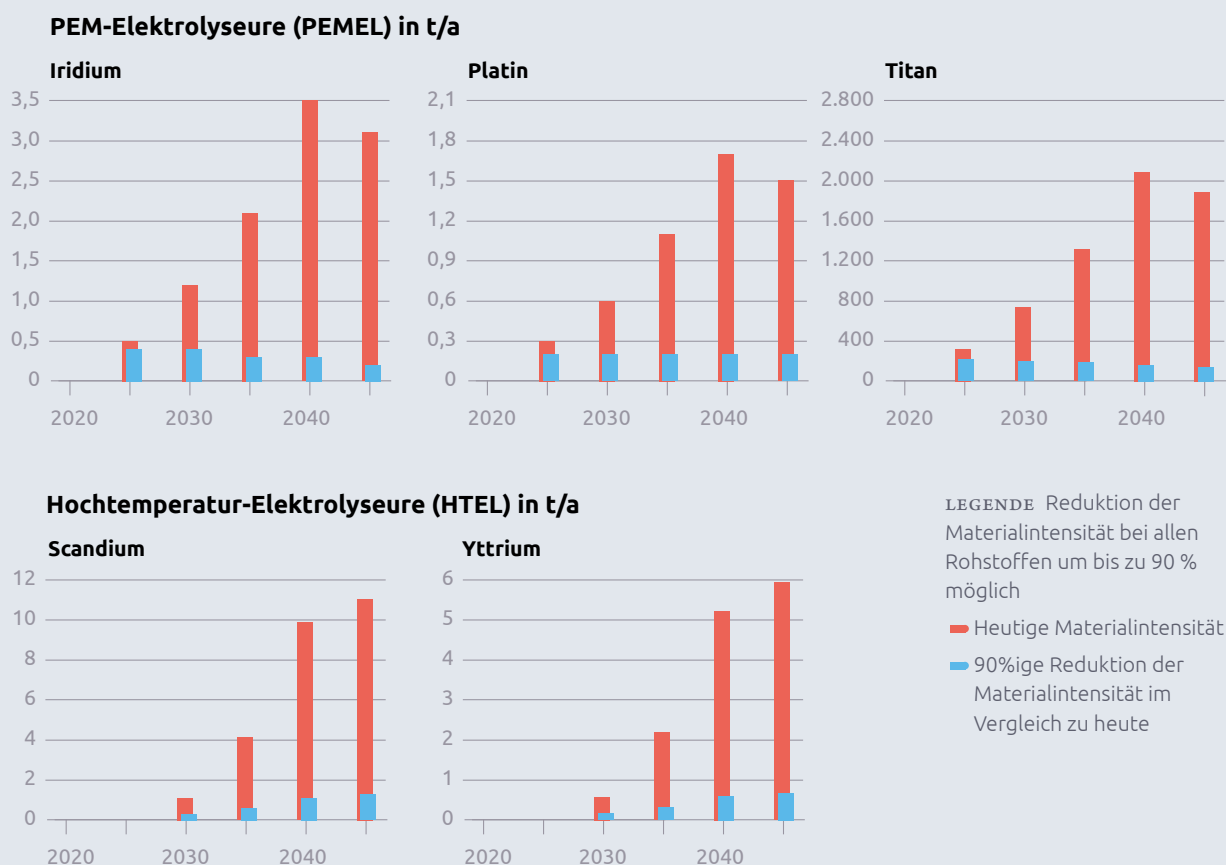
Von den Technologiemetallen für Elektrolyseure ist – wie bereits ausgeführt – Iridium mit Abstand als sehr kritisch für die Resilienz der Lieferkette einzustufen. Bei Iridium zeigt sich eindrücklich, dass der geforderte Hochlauf mit den aktuellen Beladungen der Katalysatoren nicht darstellbar ist. Der Bedarf läge dafür zwischen 2030 und 2045 bei ca. drei Tonnen pro Jahr allein für Deutschland. Demgegenüber steht eine Weltförderung von aktuell ca. acht Tonnen pro Jahr als Nebenprodukt anderer Platingruppenmetalle, die nicht ausgeweitet werden kann. Der zukünftige Platinbedarf für Elektrolyseure kann hingegen gut aus eingespielten Recyclingstrukturen gedeckt werden.

Scandium wird bislang global nur als Nebenprodukt in der Größenordnung von 15 bis 25 Tonnen pro Jahr gewonnen. Eine Ausdehnung der Primärgewinnung ist hier im Gegensatz zu Iridium durchaus möglich. Die Angebotssituation für Titanschwamm und Yttrium wird als nicht kritisch eingestuft.

⁴⁰ Scandium wird z. B. in (Kiemel, S. et al., 2021) als ein mögliches Substitut für Yttrium diskutiert.

ABB. 44 **Bedarf relevanter Rohstoffe für Ausbau von Elektrolyseuren in Deutschland**

Iridium ist mit Abstand das kritischste Element bei den Elektrolyseuren (PEMEL). Die Materialintensität könnte schätzungsweise um 90 Prozent reduziert werden. Dieses ist der entscheidende Hebel zur Erhöhung der Resilienz.



QUELLE Angenommene Reduktion im Szenario auf Basis von (Kiemel, S. et al., 2021) (Annahme: Literaturwert für 2035 wird im Markt erst 2040 erreicht). Platin, Iridium und Titan für PEM-Technologie additiv, Yttrium und Scandium für HTEL alternativ zu betrachten.

Prognos, Öko-Institut, 2023

Herstellung der Komponenten und Anlagen

Technologischer Kern der Elektrolysetechnologien sind die jeweiligen Elektrolysestacks. Hier sind die zentralen Subkomponenten Katalysatoren, Elektroden und Ionenaustauschmaterial (je nach Technologie Elektrolyte oder Membranen), sowie Strukturen zum Fluidtransport (poröse Transportschichten) und Strukturplatten (Bipolarplatten) und Dichtungselemente. Die Industrialisierung der Fertigung ist für die PEM-Elektrolyseure zurzeit intensiv in der Entwicklung.

Aktuell verteilen sich die Fertigungskapazitäten für Elektrolyseure auf die Kernregionen Europa und China (jeweils 43 Prozent) und die USA sowie Indien (jeweils 7 Prozent) (IEA, 2022c). Eine auf Basis verschiedener Quellen erstellte Zusammenstellung von 66 weltweiten Elektrolyseherstellern (vgl. TAB. 18 im Anhang) liefert ähnliche Zahlen: 42 Prozent der in dieser Recherche gefundenen Unternehmen liegen in der EU, 35 Prozent in Asien und 23 Prozent in Nordamerika. Aufgrund der hohen Dynamik im Feld der Elektrolyseproduktion und der Technologieentwicklung kann diese Auflistung nur als Momentaufnahme eingeordnet werden, die jedoch zeigt, dass die Technologieentwicklung in Europa aktuell eine gute Basis hat.

5. Kritische Lieferketten

5.5. Elektrolyseure

Die Fertigungstiefe variiert je nach Unternehmen und Technologie. So gibt es Unternehmen, die nur einzelne Komponenten fertigen (Membranen, Katalysatoren) und Unternehmen mit hoher Fertigungstiefe (U.S. Department of Energy, 2022a).

Neben dem Elektrolysestack sind je nach Elektrolysetechnologie nachfolgende Komponenten der gesamten Anlage von zentraler Bedeutung:

- Fluidmanagement: Leitungen, Pumpen und Kompressoren, Gas- und Wasser-Separatoren, Ventile etc.
- Thermisches Management: Wärmeübertrager und Wärmekreisläufe mit Leitungen, Pumpen, Ventilen und Wärmeträgermedium für Wärmezufuhr (HTEL) und Abfuhr (Abwärme, Rückkühlung)
- Leistungselektronik (Gleichrichter) und elektronische Systemsteuerung

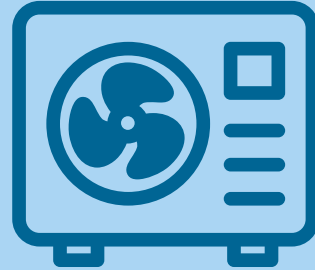
Alle diese Komponenten können über einen breiten Zulieferermarkt bezogen werden und sind auch aus anderen Anwendungen im Bereich der Wasser- bzw. Gastech-nik bekannt, weshalb keine Kritikalität erwartet wird.

Zusammenfassend wird die Lieferkette der Elektrolysetechnologien, abgesehen von den kritischen Rohstoffen für die PEMEL- und HTEL-Technologien, aktuell als unkritisch eingeschätzt, aus nachfolgenden Gründen:

- Verschiedene Elektrolysetechnologien sind marktreif (AEL, PEMEL) oder in Entwicklung (HTEL, AEM), die zum erfolgreichen Hochlauf der Wasserstoffproduktion beitragen können.
- Der technologische Hochlauf steht erst bevor, der Übergang zu hoch automatisierten, seriellen Produktionsverfahren wird erst mit zunehmenden Kapazitäten realisiert.
- Eine Prognose der im zukünftigen Hochlauf entstehenden Kritikalitäten ist schwierig, die Ausgangsposition Europas lässt sich im Hinblick auf den heutigen Anteil an Know-how in Form von Produktionskapazität und Unternehmen als solide einschätzen.

Die zentrale Aufgabe für den Hochlauf der grünen Wasserstoffproduktion besteht jedoch im ausreichend schnellen Aufbau der Fertigungskapazitäten für Elektrolyseure sowie deren tatsächlicher Inbetriebnahme. Zudem sollte die Entstehung struktureller Abhängigkeiten ähnlich wie bei der PV-Technologie vorausschauend vermieden werden.

5.6. Wärmepumpen



- Durch den hohen Anteil der Fertigung in Europa besteht die strategische Abhängigkeit bei Wärmepumpen in erster Linie auf der Ebene der importierten Komponenten, hierbei sind in erster Linie die Kompressoren und die in den meisten Elektromotoren verbauten Hochleistungsmagnete zu nennen
- Im Vergleich zu den anderen betrachteten Schlüsseltechnologien ist der Herstellermarkt für Wärmepumpen deutlich diverser, kleinteiliger und damit auch robuster.

Lieferkette: Hohe Komplexität aufgrund vieler Komponenten

Wärmepumpen bestehen aus mehreren hundert Einzelteilen. Mengenmäßig am relevantesten sind dabei Stahl (u. a. Kompressor und Gehäuse), Kupfer (Rohrleitungen, Wärmetauscher, Kabel), Aluminium (Gussteile, z. T. für Wärmetauscher), Nickel sowie Kunststoff. Dazu sind für die Steuerung Elektronikbausteine notwendig. Herzstück und Antrieb der Wärmepumpe ist der im Regelfall von einem Elektromotor angetriebene Kompressor (vgl. ABB. 45).

Rohstoffförderung

Ein Teil der Wärmepumpen verwenden heutzutage in den Elektromotoren der Kompressoren Permanentmagnete (Neodym-Eisen-Bor-Magnete), die aus den sehr kritischen Schweren Seltenen Erden (Dysprosium und Terbium) sowie den mittel kritischen Leichten Seltenen Erden (Neodym und Praseodym) bestehen. Sowohl bei der Rohstoffförderung als auch bei der Rohstoffverarbeitung werden die Lieferketten von China dominiert (vgl. KAP. 5.4).

Komponenten

Laut dem aktuellen Statusreport der EU zu Wärmepumpen (Lyons, L. et al., 2022) werden die meisten Kompressoren von in Deutschland üblichen Luft-Wasser-Wärmepumpen in Europa hergestellt, z. B. von Danfoss (Dänemark, Frankreich), Bitzer und GEA (Deutschland) und Tecumseh (Frankreich). In Interviews mit Herstellern wurde aber auch bei Kompressoren dennoch immer wieder eine hohe Abhängigkeit von Importen aus China und anderen asiatischen Ländern genannt.

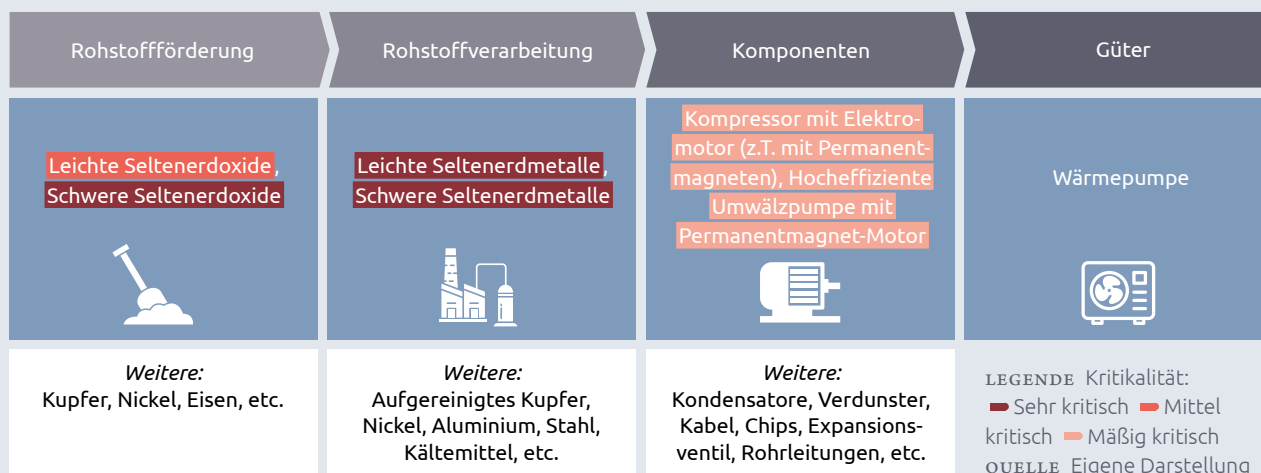
Durch den aktuellen Entwicklungsdruck hin zu Verdichtern, die mit klimafreundlicheren Kältemitteln (wie z. B. Propan) arbeiten, ergibt sich ein Fenster für technologisch oft gut aufgestellte europäische Hersteller wieder Marktanteile beim Kompressorenbau zu gewinnen.

Die auf die Masse bezogen schwersten Komponente von Wärmepumpen sind die Wärmetauscher. Diese sind aufgrund der Flexibilität auf verschiedene Materialien wie Stahl, Aluminium oder Kupfer und stark aufgestellten europäischen Herstellerfirmen als nicht kritisch anzusehen. Hier gilt es die Skalierung der Produktionsmengen mit dem in Europa in Summe noch größer werdenden Markt abbilden zu können.

Bei Elektronikbauteilen, die wie bei fast allen anderen Technologien auch, überwiegend aus Asien (Taiwan, Süd-Korea, Japan, China) beschafft werden, besteht eine hohe Importabhängigkeit.

ABB. 45 **Lieferkette zur Herstellung von Wärmepumpen**

Die Kritikalität ergibt sich nur bei einem verstärkten Einsatz von Permanentmagneten in den Kompressoren und Umwälzpumpen. Technische Alternativen sind vorhanden.



Prognos, 2023

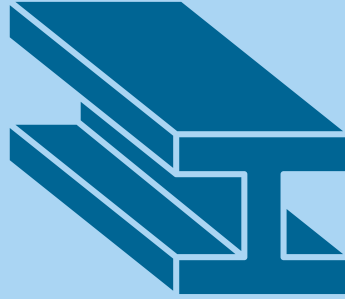
Güter

Laut dem EU-Statusreport gibt es in Europa viele Fabriken in denen Wärmepumpen hergestellt bzw. zusammengesetzt werden: 170 Fabriken in Summe, davon 24 in Deutschland.

Im Vergleich zu den anderen betrachteten Schlüsseltechnologien ist der Herstellermarkt für Wärmepumpen deutlich diverser, kleinteiliger und damit auch robuster. So gibt es mehrere Dutzend Hersteller. Aktuell werden sowohl von deutschen und ausländischen Herstellern die Kapazitäten in Europa stark ausgeweitet, durch Werkserweiterungen und den Neubau von Fertigungshallen, insbesondere in Polen, Tschechien und der Slowakei.

Durch den hohen Anteil der Fertigung in Europa besteht die strategische Abhängigkeit bei Wärmepumpen in erster Linie auf der Ebene der importierten Komponenten, hierbei sind in erster Linie die Kompressoren und die in den meisten Elektromotoren verbauten Hochleistungsmagnete zu nennen (siehe Kapitel Permanentmagnete für Elektromobilität). Im Vergleich zur Elektromobilität sind die benötigten Mengen, durch die geringere Anzahl an Wärmepumpen im Vergleich zu Elektrofahrzeugen und durch die kleinere Leistung der Motoren um mehr als eine Größenordnung geringer.

5.7. Stahl



- Zur Produktion von klimaneutralem Stahl in der DRI-Route werden Schachtöfen benötigt. Andere Technologien (wie Wirbelschichtverfahren) sind bisher nicht im industriellen Maßstab verfügbar. Es besteht ein Risiko beim Bau von Schachtöfen, da es nur zwei Technologieanbieter gibt und eine stark steigende Nachfrage weltweit.
- Für klimaneutralem Stahl werden vorzugsweise Eisenerze mit einem Eisengehalt von 67 Prozent und mehr benötigt. Nur ca. 3 Prozent des heute weltweit gehandelten Erzes hat eine solche Güte. Es werden jedoch bereits auch heute technische Verfahren zur Anreicherung von Erzen eingesetzt, die sich weiter ausweiten ließen, v. a. bei Magnetit aufgrund der einfacheren (magnetischen) Verfahren.

Von Eisenerzpellets zu Stahlprodukten

Ausgangspunkt für die Produktion von Primärstahl sind Eisenerzpellets. Diese werden mit Hilfe von Wasserstoff reduziert – d. h. Sauerstoff wird entzogen und in Schachtöfen mittels Direktreduktion (DR-Anlagen) zu Eisenschwamm (direct reduced iron, DRI) verarbeitet. Wird der Eisenschwamm brikettiert, liegt HBI (Hot briquetted Iron) vor, welches transportiert werden kann, da es bei Kontakt mit Luft oder Wasser nicht oxidiert. HBI kann genauso wie DRI in einem Elektrolichtbogen zu Stahl verarbeitet werden oder in einem Schmelzer aufgeschmolzen und mit Kohlenstoff angereichert werden, um in einem Konverter zu Stahl verarbeitet zu werden.

Lieferkette: Mittleres Risiko bei DRI-Schachtöfen und mäßiges Risiko bei höherwertigen Eisenerzen

Für die Produktion von klimaneutralem Stahl liegt ein mittleres Risiko für den Bau der DRI-Schachtöfen, da es hier nur wenige Anbieter gibt und gleichzeitig eine hohe Nachfrage gegeben wird. Zudem könnte ein weiterer möglicher Engpass die Versorgung mit Erzen sein, die einen ausreichend hohen Eisengehalt haben (mäßiges Risiko). Hierfür gibt es jedoch bereits technische Lösungen.

Rohstoffförderung: Höherwertige Eisenerze

Ausgangspunkt für Stahlproduktion ist Eisenerz. Eisenerze kommen weltweit vor. Hauptproduktionsländer sind Australien, Brasilien, Südafrika und Kanada. Die Erze unterscheiden sich je nach Vorkommen insbesondere im Eisengehalt und der Zusammensetzung der Gangarten. Für den Einsatz zur Herstellung von DRI mit Ziel EAF sollte der Eisengehalt des im Schachtöfen eingesetzten Pellets mindestens 67 Prozent betragen («DR-grade»), anderenfalls müssen im EAF hohe Schlackenmengen in Kauf genommen werden, was mit Effizienzverlusten verbunden ist. Die meisten Lieferanten haben heute aufgrund der bestehenden Nachfrage-

struktur mit Schwerpunkt Hochofen aber überwiegend geringere Erzqualitäten im Angebot. Nur sehr wenige Erzförderer haben Qualitäten mit einem Eisengehalt von mehr als 67 Prozent im Angebot. Diese höherwertigen Erze werden v. a. aus Schweden, Brasilien, Russland und Kanada angeboten, wo es relativ große Vorkommen an Magnetit gibt. Magnetit liegt oft unreiner vor als Hämatit, lässt sich aber mit magnetischen Verfahren leichter aufreinigen. Für einen Hochlauf an DRI-Kapazität – in Verbindung mit dem Elektrolichtbogenofen (EAF) – müssten deshalb zum einen neue Minen für höherwertigere Erze erschlossen werden, zum anderen braucht es zusätzliche Kapazitäten bei der Aufbereitung (beneficiation) der Erze. Ein weiterer Lösungsweg ist der bereits skizzierte Einsatz von Elektroschmelzern, der eine mögliche Versicherung gegen Lieferprobleme im DR-grade-Pellet-Markt darstellt. Aus Resilienz-sicht ist auch der Einsatz von Erz mit niedrigerer Qualität möglich, damit verbunden sind aber höhere Produktionsaufwendungen im weiteren Prozess.

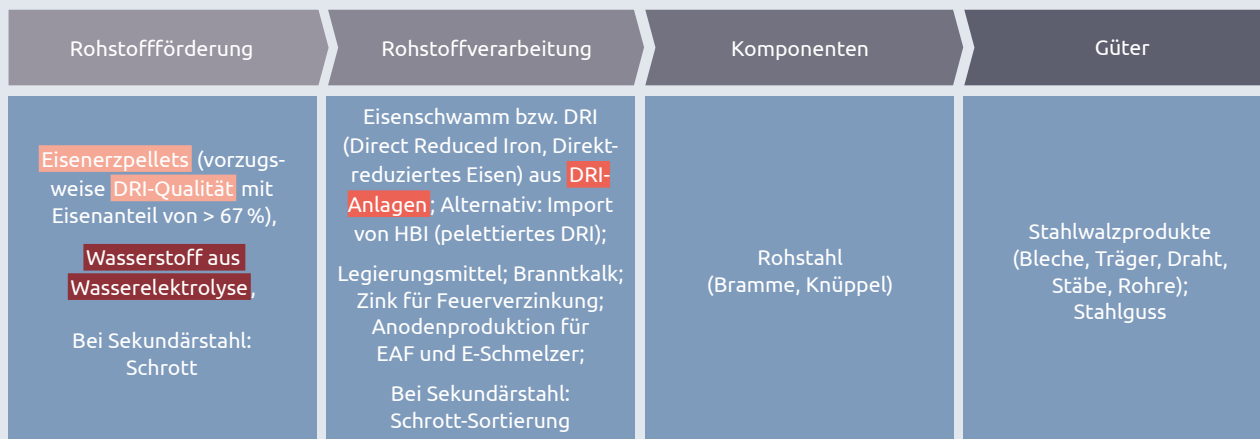
Neben Eisenerzen ist Wasserstoff ein zentraler Ausgangsstoff für die Produktion von klimaneutralem Stahl. Der rechtzeitige Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und die Bereitstellung von grünem Wasserstoff in den nächsten Jahren ist wichtig für die Transformation des Stahlsektors. Mögliche Versorgungsengpässe können übergangsweise und vor allem in der Anfangsphase der Transformation durch den Einsatz von Erdgas abgefedert werden, da die Direktreduktion in den DRI-Anlagen sowohl mit Erdgas als auch mit Wasserstoff erfolgen kann.

Rohstoffverarbeitung: Engpass ist Bau von DRI-Anlagen

Bei der Rohstoffversorgung konzentriert sich der folgende Abschnitt auf die Reduktion des Eisenerzes zu DRI.

ABB. 46 **Lieferkette zur Herstellung von grünem Stahl**

Mittel kritisch bei Verfügbarkeit von DRI-Schachtofen sowie mäßig kritisch bei Erzen mit sehr hohem Eisenanteil.



LEGENDE Kritikalität: ■ Sehr kritisch ■ Mittel kritisch ■ Mäßig kritisch QUELLE Eigene Darstellung

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2023

Eisenerz und Wasserstoff reagieren im sogenannten DRI-Schachtofen. DR-Anlagen werden bereits seit den 1970er Jahren eingesetzt, allerdings mit Erdgas als Reduktionsmittel. Genauer genommen wird zumindest im gängigsten Midrex-Verfahren nicht das Methan selbst als Reduktionsmittel eingesetzt, es reagiert vorher in einem Reformer zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff, welche dann im Schachtofen als Reduktionsmittel eingesetzt werden. Im zweithäufigsten Hy/L Verfahren wird das Methan dagegen im Schachtofen selbst eingesetzt, reagiert dabei teilweise direkt mit den Erzen unter Bildung von Eisenkarbid sowie indirekt über Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Einen gewissen Boom erlebten die Verfahren in den USA sowie im Mittleren Osten, wo Erdgas sehr kostengünstig bereitsteht. Insbesondere in den USA hat DRI zu einer Flexibilisierung der Stahlmärkte beigetragen, da der Lichtbogenofen dadurch eine sehr viel weitere Verbreitung finden konnte und die Hersteller beim Schrott-Einsatz sehr viel höhere Quoten erzielen können als europäische Hersteller.

Neu jedoch ist, dass hier Wasserstoff statt Erdgas eingesetzt werden soll. Es gibt derzeit jedoch nur wenige Projekte, die DRI von Beginn (fast) ausschließlich mit Wasserstoff betreiben wollen, alle befinden sich in Schweden: LKAB plant eine DR-Anlage an ihrem Minenstandort in Gällivare, das Start-up H2GreenSteel baut derzeit einen komplett neuen Standort in Boden auf und der arrivierte Stahlhersteller SSAB plant seinen

Hochofen in Lulea durch eine DR-Anlage zu ersetzen. Weitere Projekte wie die der deutschen Hersteller planen zumindest einen vorübergehenden partiellen Einsatz von Erdgas ein. Auch hiermit lassen sich gegenüber der Hochofenroute bereits über 60 Prozent der THG-Emissionen einsparen, diese Brücken-Konzepte adressieren somit die absehbare Knappheit beim Aufbau von Elektrolyse-Wasserstoff-Kapazitäten.

Eine größere Gefahr für eine schnelle Transformation besteht in der Knappheit von engineering-Kapazitäten und die dort bisher kaum vorhandene Konkurrenz mit nur zwei Technologieanbietern, die DR-Technologie anbieten. Agora Industrie und Wuppertal Institut (2023) schätzen die derzeitigen Jahreskapazitäten auf ein Anlagenvolumen von sechs bis acht Millionen Jahrestonnen. Der italienisch-mexikanische Hersteller Tenova, der die Pilotanlage in Schweden gebaut hat, sowie das US-amerikanische Unternehmen Midrex, welches der führende Technologieanbieter für Direktreduktionsanlagen weltweit sind die einzigen Technologieanbieter. Während Tenova die Anlagen bisher selbst baut, werden die Midrex-Anlagen durch Lizenznehmer gebaut, wobei Midrex in die Planung der Anlagen aber eingebunden bleibt. Midrex befindet sich im Besitz der japanischen Kobe Steel, einem Lizenznehmer für den Bau solcher Anlagen. Ein weiterer wichtiger Lizenznehmer ist das deutsche Unternehmen SMS. Während die Tenova-Anlagen mit 100 Prozent Wasserstoff betrieben

werden können, gilt das für Midrex-Bestandsanlagen nicht. Der Hersteller verspricht jedoch, dass die neu erstellten Anlagen auf 100 Prozent Wasserstoff umgestellt werden können.

Gemeinsam mit der Konzentration auf wenige Technologieanbieter könnte die schnell wachsende Nachfrage zu einer kritischen Versorgungssituation im Anlagenbau beitragen und die fristgerechte Fertigstellung von Projekten gefährden.

Der Wettlauf um den Aufbau neuer DRI-Anlagen ist aus klimapolitischer Sicht notwendig, er hat längst auch auf andere Länder übergegriffen. Die H2GreenSteel-Gruppe plant eine Anlage auf der Iberischen Halbinsel und prüft Projekte in Brasilien. Der brasilianische Eisenerzförderer Vale plant ein Joint Venture mit Unternehmen im Mittleren Osten, die als zukünftige DRI-Hubs fungieren sollen. Und auch das im Hinblick auf Eisenerzvorkommen und erneuerbare Energien privilegierte Australien hat die Potenziale erkannt, die sich durch eine Veredlung seiner Rohstoffe inländisch erzielen lassen. Hier wird zuvorderst an eine Bedienung ostasiatischer Märkte (Japan und Korea) gedacht. Nicht alle beispielhaft genannten Projekte sind von vornherein als Wasserstoff-Projekte vorgesehen, doch das enorme DRI-Projektvolumen richtet den Blick auf einen möglichen Engpass bei den Technologielieferanten Midrex und Tenova.

Besonders in den kommenden Jahren dürfte Grünstahl ein stark nachgefragtes Gut sein und die deutschen Stahlhersteller möchten ihre Ankerkunden insbesondere aus der Automobilindustrie, die sich ehrgeizige Ziele im Hinblick auf ihre Emissionen in der Vorkette gesetzt haben, nicht verlieren. Alternativ zur inländischen Produktion von grünem DRI könnten die Unternehmen in Deutschland jedoch auch den Import von vorverarbeitetem Eisenschwamm oder HBI in Erwägung ziehen. Insbesondere weil die Kosten für die Produktion beispielsweise in Australien deutlich niedriger als in Deutschland liegen dürften. Es gibt Hinweise, dass diese Optionen aktiv geprüft werden. An der ersten Investitionswelle, in der die bis 2030 außer Dienst gestellten Hochöfen in Deutschland ersetzt werden sollen, halten die Unternehmen derzeit jedoch öffentlich

fest. Mit eigenen Anlagen vermeiden sie das Risiko einer Nichtlieferung von HBI durch Wettbewerber oder eines Preis-Erpressungspotenzials durch Monopolisten. HBI-Importe können jedoch ergänzend zur eigenen Produktion genutzt werden. Es muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass der HBI-Import zu einem insgesamt höheren Energiebedarf führt als die Weiterverarbeitung von heißem DRI-Material vor Ort («hot-link»)

Rohprodukte: Rohstahl in Form von Brammen oder Knüppeln

Durch die neuen Verfahren (DR-Anlagen) nehmen die Vorteile einer vertikalen Integration an integrierten Standorten ab. Denkbar wäre es deshalb auch, dass die Walzwerke in Deutschland Stahlbrammen oder -knüppel importieren, dass also auch die Produktionsstufe der Stahlerzeugung abwandert.

Während DRI bzw. HBI ein sehr homogenes Gut ist und deshalb gut geeignet, um zukünftig liquide in einem Weltmarkt gehandelt oder auch gelagert zu werden, ist Rohstahl jedoch kein homogenes Gut. Stahl wird im Hinblick auf Abmessung und Legierung nach Kundenspezifikation und deshalb auch in der Regel nicht auf Vorrat hergestellt, da hiermit für die Produzenten sehr hohe Erlösrisiken im volatilen Stahlmarkt verbunden wären. Und Stahl wird überwiegend immer noch nur regional gehandelt, denn kurze Lieferwege und -zeiten ermöglichen erst eine effiziente Lieferkette mit einer on-demand-Fertigung, z. B. in der Automobilindustrie. Aus Sicht einer resilienten Lieferkette für Stahlprodukte ist der Fortbestand von Stahlstandorten in Deutschland deshalb klar zu bevorzugen, denn die Energiekosten Nachteile halten sich bei dieser weniger energieintensiven Stufe (EAF, E-Schmelzer) in klaren Grenzen.

5.8. Zusammenfassung

- Bei der Gewinnung der Rohstoffe sehr kritisch: Lithium (Lithium-Ionen-Batterien für Elektromobilität), Schwere Seltene Erden (für Permanentmagnete in Elektromotoren bei Elektromobilität und Generatoren für Windkraft Offshore) und Iridium (PEM-Elektrolyseure).
- Bei der Gewinnung der Rohstoffe mittel kritisch: Nickel, Kobalt und Graphit (Lithium-Ionen-Batterien für Elektromobilität), Leichte Seltene Erden (für Permanentmagnete).
- Hinsichtlich der Rohstoffverarbeitung sehr kritisch: Leichte und Schwere Seltene Erden (Permanentmagnete) sowie Kobalt, Mangan und Graphit (Lithium-Ionen-Batterien. Hierdurch gerät die Entwicklung der Elektromobilität beim Verkehr und der Ausbau der Windenergie (vor allem Offshore) in Gefahr.
- Bei der Herstellung von Komponenten sehr kritisch: Ingots, Wafer, Zellen für Photovoltaik, Permanentmagnete sowie Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien
- Sehr hohe Kritikalität bei Herstellung von PV-Modulen und mittlere Kritikalität bei Produktion von Batteriezellen.
- Mittleres Risiko für einen schnellen Hochlauf von DRI-Schachtöfen zur Stahlproduktion in Deutschland.

Die Herausforderungen und kritischen Abhängigkeiten sind bei den einzelnen Technologien sehr unterschiedlich, sowohl hinsichtlich der Ursache der Kritikalität (vgl. KAP. 3): Länderkonzentration, Nachfrageüberhang) und auch dem Schweregrad. Zudem ist konkret für die Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems relevant, zu welchem Zeitpunkt die konkreten Technologieausprägungen sich durchsetzen. Technologien mit einem besonders starken kurz- bzw. mittelfristigen Hochlauf bis 2030/35 sind besonders im Fokus – da hier der Handlungsspielraum zur Erhöhung der Resilienz deutlich eingeschränkter ist als bei Risiken, die sich erst ab 2040 abzeichnen.

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.

Übersicht: Kritikalität bei 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 nur sehr geringe eigene Kapazitäten hat.
- **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.
- **Elektromobilität:** Für die Elektromobilität sind zudem weite Bereiche der Wertschöpfungskette der Lithium-Ionen-Zellen als sehr kritisch im Sinne dieser Studie einzustufen.

- **Elektrolyseure:** Für Elektrolyseure besteht die wesentliche Herausforderung im Bereich der PEM-Elektrolyseure. Hier ist die zukünftige Versorgung mit ausreichend Iridium sehr kritisch.
- **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.
- **Stahl:** Bei Stahl besteht ein mittleres Risiko für den schnellen Hochlauf von DRI-Schachtöfen in Deutschland, da es hier nur wenige Anbieter gibt. Ein mäßiges Risiko besteht 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-Windkraft und Elektromobilität) sowie Iridium (PEM-Elektrolyseure).

- **Lithium:** Im Falle von Lithium ist in erster Linie der fulminante 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 Einteilung.

ABB. 47 **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.

- **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 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.
- **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.

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.

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 in 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 dieser 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.

Mittel kritisch: Verarbeitung von Polysilizium, Lithium, Nickel

Für Polysilizium, Lithium und Nickel⁴¹ 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.

⁴¹ In der Verarbeitungsebene handelt es sich bei Lithium um Lithiumcarbonat und Lithiumhydroxid-Hydrat, für Nickel um Nickelsulfat.

TAB. 02 **Bedarf an kritischen Rohstoffen bis 2045 für Deutschland nach KNDE2045 Szenario**

Bei nahezu allen strategischen Gütern liegt der Peak der Nachfrage nach kritischen Rohstoffen zwischen 2030 und 2035.

Güter	Rohstoff	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen	Lithium	kt/a	2	12	21	21	19	17
	Nickel	kt/a	7	55	91	88	74	65
	Kobalt	kt/a	2	14	21	18	13	10
	Graphit	kt/a	13	104	187	198	179	168
Permanentmagnete	Schwere Seltene Erden (Dysprosium, Terbium)	t/a	34	180	267	245	194	162
Fahrzeuge								
Windkraft	Leichte Seltene Erden (Neodym, Praseodym)	t/a	134	730	1153	1127	954	850
Fahrzeuge								
Windkraft	Iridium	t/a	0	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
Elektrolyseure in DE (mit Materialreduktion)								

QUELLE Eigene Darstellung und Berechnungen

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, 2023

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 Nachfragerwachstums und der starken Position Chinas. Weiterhin wird der Anlagenbau von Direktreduktionsanlagen aufgrund der Anbieterkonzentration als mittel kritisch eingestuft.

Bedarf an kritischen Rohstoffen bis 2045

Tabelle 2 zeigt für die sehr kritischen Rohstoffe Lithium, Schwere Seltene Erden und Iridium sowie den hier in der Studie klassifizierten mittel kritischen Rohstoffen Nickel, Kobalt, Graphit und Leichte Seltene Erden den jährlichen Bedarf von heute bis 2045 im 5-Jahres-Intervallen. Bei nahezu allen sehr kritischen und mittel kritischen Rohstoffen sind vor allem die kommenden fünf bis zehn Jahre entscheidend, da hier nicht nur ein sehr steiler Hochlauf der Nachfrage zu beobachten ist, sondern die meisten Rohstoffe auch ihren Nachfragepeak haben.

6. Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz

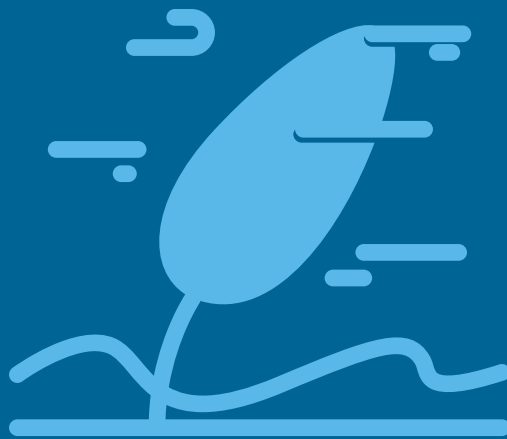
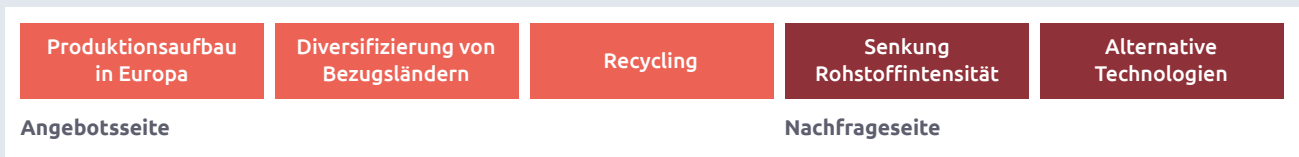


ABB. 48 **Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz**

In der Studie wurden für die Schlüsseltechnologien fünf Angebots- und Nachfrageseitige Maßnahmen untersucht.



QUELLE Eigene Zusammenstellung Öko-Institut

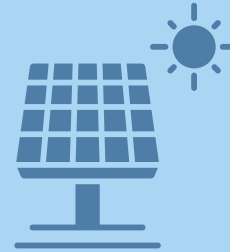
Öko-Institut, 2023

Nachdem im Kapitel 5 für die strategischen Schlüsseltechnologien analysiert worden ist, auf welchen Stufen der Lieferketten die größten Versorgungsrisiken zu finden sind, werden nun in Kapitel 6 mögliche Maßnahmen vorgestellt, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen und die Resilienz zu stärken.

Hierzu zählen insbesondere folgende nachfragegetriebene und angebotsseitige Maßnahmen:

- 1. 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 vereinzelten Rohstoffen möglich. Diese Maßnahme greift deshalb vor allem bei den nachgelagerten Wertschöpfungsstufen.
- 2. 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.
- 3. Recycling von kritischen Rohstoffen:** diese Maßnahmen wirken – mit wenigen Ausnahmen, wie 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.
- 4. Senkung 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.
- 5. Alternative Technologien:** Ausweichen auf Technologien mit geringerem Bedarf an kritischen Rohstoffen – z. B. Einsatz von nickel-, mangan- und kobaltfreien LFP-Batterien.

6.1. Photovoltaik



- Dominanz chinesischer Unternehmen entlang der gesamten Lieferkette Wafer-basierter PV-Anlagen (vor allem bei der Herstellung von Ingots und Wafern) als eines der größten Risiken für die Dekarbonisierung des Stromsektors.
- Produktionsaufbau in Europa als wichtigste Maßnahme. Ziel nach *Net-Zero Industry Act*: 40 Prozent inländische Produktion ist möglich, größtes Hemmnis sind günstigere Produktionskosten in den USA und in China (bis zu -30 Prozent) – vor allem durch Subventionen (IRA in den USA).
- Diversifizierungspotenziale sind schwer prognostizierbar, da die Kapazitäten gerade erst aufgebaut werden (USA, Indien).
- Recycling: Größere Potenziale erst ab 2035/2040 aufgrund der Langlebigkeit der Module. Recyclingverfahren zur Rückgewinnung von Polysilizium und Solarglas werden derzeit erst entwickelt und erprobt.
- Alternative Technologien: Geringere Wirkungsgrade bei Dünnschicht-Modulen sprechen gegen hohe Marktanteile. Perowskit- oder organische Zellen befinden sich noch in Entwicklung.
- Senkung der Materialintensität wirkt rohstoffseitig, löst aber nicht das Problem der Marktmacht in der nachgelagerten Lieferkette.

TAB. 03 **Heutige Produktionskapazitäten für Windkraft in Europa und Ziele 2030**

Bei Ingots, Wafern, Zellen und Solarglas sind heute kaum Produktionskapazitäten vorhanden.

Rohstoff/ Komponente	Stand 2022	EU-Ziel 2025	EU-Ziel 2030 nach Net-Zero Industry Act*
Polysilizium	~ 21 GW	30 GW	40 %
Ingots und Wafer	< 2 GW	30 GW	40 %
Zellen	< 2 GW	30 GW	40 %
Module	< 10 GW	30 GW	40 %
Solarglas	3 bis 4 GW	30 GW	40 %

* Nach Zielen des Net-Zero Industry Act sollen in 2030 40 Prozent des europäischen Zubaubedarfs in Europa gefertigt werden. Insgesamt soll 2030 die installierte Leistung 600 GW betragen.

QUELLE Eigene Darstellung nach (KOM, 2022a; KOM, 2023c; SolarPower Europe, 2023; Photovoltaik, 2022)

Prognos, 2023

Produktionsaufbau in Europa

In Europa hat sich die European Solar PV Industry Alliance das Ziel gesetzt, bis 2025 30 GW an europäischen Produktionskapazitäten entlang der gesamten PV-Lieferkette aufzubauen (KOM, 2022a). Für das Jahr 2030 plant die EU-Kommission, dass mindestens 40 Prozent der jährlich installierten PV-Module aus europäischer Produktion stammen (KOM, 2023c). Darüber hinaus sollen nach der EU-Strategie für Solarenergie, welche ein Teil des REPowerEU-Plans ist, im Jahr 2025 320 GW PV-Module installiert sein und im Jahr 2030 600 GW (KOM, 2022a).

Die Diskussion zum (Wieder-)Aufbau einer europäischen PV-Industrie hat nicht zuletzt wegen des Ukraine-Kriegs an Intensität gewonnen. Ein solcher Auf- und Ausbau ist jedoch mit enormen Herausforderungen verbunden und wäre nur durch eine entsprechend umfangreiche und andauernde Unterstützung der Europäischen Union bzw. ihrer Mitgliedstaaten denkbar. Die Wiederbelebung einer integrierten europäischen PV-Industrie müsste sich im laufenden Wettbewerb gegen chinesische Hersteller behaupten. Weiterhin stünde ein europäisches Investitionsprogramm in Konkurrenz zu den Programmen in den USA und Indien.

Ein Auf- und Ausbau europäischer Produktionskapazitäten würde insbesondere für energieintensive Prozesse (Herstellung von Polysilizium, Ingots & Wafern sowie Solarglas) eine große Herausforderung darstellen, da die Energiepreise für energieintensive Industrien in Europa deutlich über dem internationalen Durchschnitt

liegen. Die entsprechenden Hersteller bemängeln, dass im Rahmen des Net-Zero Industry Act sowie des Temporary Crisis and Transition Framework (TCTF) aktuell über mögliche umfangreiche Investitionszuschüsse bzw. Subventionen diskutiert wird, es bislang jedoch unklar ist, ob auch Betriebskostenzuschüsse erfolgen werden. Diese wären vor allem für die stromintensiven Prozessschritte notwendig, solange der Industriestrompreis deutlich über dem Niveau anderer Regionen, insbesondere China, liegt (Fuhs, M., 2023b). Langfristig muss eine europäische PV-Industrie dauerhaft auch ohne Subventionen wettbewerbsfähig sein können. Eine Unterstützung seitens der EU und der Mitgliedstaaten sollte daher nur als Überbrückungshilfe dienen.

Tabelle 3 stellt die aktuellen europäischen Produktionskapazitäten für die Wertschöpfungsstufen Polysilizium, Ingots und Wafer, Zellen und Module sowie für die Komponente Solarglas dar.

Um das 30-GW-Ziel bis 2025 auf allen Stufen erreichen zu können, wären zeitnahe, gemeinsame und richtungsweisende Entscheidungen auf den höchsten politischen Ebenen der EU und ihrer Mitgliedstaaten notwendig. Alle Wertschöpfungsstufen müssten gleichzeitig auf den Zielwert hochskaliert werden. Eine Erweiterung auf nur einzelnen Stufen würde nicht zielführend sein. So wäre ein Aufbau von 30 GW Produktionskapazität für Ingots & Wafer nur bei einem gleichzeitigen Ausbau auf den vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen sinnvoll. Aktuell bestehen Ankündigungen einzelner europäischer Unternehmen zur Erweiterung ihrer Produktionskapazitäten. So plant der italienische

6. Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz

6.1. Photovoltaik

Energiekonzern Enel, die Produktionskapazität der sizilianischen Modulfabrik von 3Sun bis zum Sommer 2024 von 200 MW auf 3 GW zu erweitern (Romano, V., 2023). Das Schweizer Unternehmen Meyer Burger will die Zellproduktion in Deutschland bis 2024 auf 3 GW steigern (Diermann, R., 2023). Wesentliche Herausforderungen bei der Umsetzung von Projekten zur Erweiterung der Fertigungskapazitäten liegen in bestehenden Kostenstrukturen und den im Ausland verfügbaren Subventionen.

Diversifizierung von Bezugsländern

Eine weitere Möglichkeit die starke Abhängigkeit von China zu reduzieren, besteht in einer diversifizierten Beschaffung der benötigten (Teil-)Komponenten. Dies ist kurz- bis mittelfristig jedoch mit größten Herausforderungen verbunden. Die Marktkonzentration entlang der gesamten Lieferkette ist teilweise so hoch, dass praktisch keine Alternativen bei der Beschaffung existieren. Selbst wenn es Indien und den USA gelingen sollte, die angestrebten Ziele der Produktionserweiterungen in den nächsten Jahren zu erreichen und somit der Aufbau eigener voll integrierter Produktionsketten erfolgreich umgesetzt werden könnte, bliebe es fraglich, ob die dort produzierten Mengen für die Versorgung des Weltmarkts ausreichen oder komplett für den eigenen PV-Ausbau benötigt würden.

Sollte es Ländern jedoch gelingen, qualitativ hochwertige PV-Module in ausreichender Menge und zu ähnlichen Kosten wie in China für den Weltmarkt zu produzieren, wäre es empfehlenswert die Beschaffung aus diesen Regionen im Sinne einer Diversifizierung zu fördern. Um eine solche Länderdiversifizierung realisieren zu können, müssten die benötigten Produktionskapazitäten zunächst aufgebaut werden und sich dann im Wettbewerb mit der Fertigung in angestammten Unternehmen behaupten. Der Aufbau solcher Kapazitäten hängt stark von der Ausgestaltung und Umsetzung staatlicher Unterstützungsprogramme ab.

Recycling

Bis zum Jahr 2030 werden nur wenige Gigawatt an PV-Leistung zurückgebaut. Der geringe Rückbau ist damit zu erklären, dass die Lebensdauer auch bei älteren PV-Modulen bei rund 25 bis 30 Jahren liegt. Somit ergeben sich die Rückbaumengen, zumindest bei den Aufdachanlagen der privaten Haushalte, größtenteils aus Modulen, die vor 25 bis 30 Jahren installiert wurden. Folglich stehen erst ab den 2040er Jahren größere Rückbaumengen zur Verfügung.

Bei industriellen Anlagen könnten die aktuellen Anpassungen im EEG 2023 hinsichtlich des Repowerings dazu führen, dass die Anlagen nicht nur vor dem Ende der technischen Lebensdauer, sondern bereits vor dem Ablauf der EEG-Förderung ersetzt und somit früher dem Recycling zugeführt werden (Herz, S., 2023).

Das Recycling der Altmodule konzentriert sich aktuell noch auf die Wertstoffe Aluminium, Glas und Kupfer. Darüber hinaus bestehen erste Ansätze im Entwicklungsmaßstab, bei denen hochreines Silizium zurückgewonnen werden konnte und anschließend zu Solarzellen weiterverarbeitet wurde. Allerdings weisen diese Zellen bislang deutlich niedrigere Wirkungsgrade als die aktuellen Zellgenerationen auf (Fraunhofer ISE, 2022b). Für die Herstellung wettbewerbsfähiger, recycelter Solarzellen ist daher zur Erhöhung der Effizienz weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.

Auch das Solarglas aus Altmodulen kann derzeit noch nicht für die Produktion neuer Photovoltaik-Module verwendet werden (Rueter, G., 2021). Es stellt beim Recycling mit rund 70 Prozent den massenmäßig größten Anteil der Komponenten dar (BDEW, 2022). Aus dem recycelten Solarglas kann bislang nur minderwertige Glaswolle gewonnen werden, da im Rezyklat Verunreinigungen aufgrund der Verbindung des Glases mit Klebstoffen, Beschichtungen und Schwermetallpasten auftreten (Scherhauser, Part, & Beigl, 2021). Auch hier ist weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.

Senkung der Rohstoffintensität

Wie in den vorherigen Abschnitten dargestellt, liegt bei der Photovoltaik weniger ein Rohstoffproblem als ein Problem der Marktkonzentration entlang der Lieferkette vor. Aus diesem Grund würde eine Senkung der Materialintensitäten nicht direkt zu einer Reduktion der Marktkonzentration in China führen. Sie könnte jedoch einen positiven Effekt auf die produzierten Einheiten auf den jeweiligen Wertschöpfungsstufen haben, da die verfügbaren Ausgangsprodukte (z. B. Ingots für die Herstellung von Wafern) effizienter genutzt werden könnten. Dies kann zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht pauschal beurteilt werden.

Grundsätzlich ist eine Senkung der Materialintensität, insbesondere hinsichtlich der Reduktion des Rohstoffeinsatzes, sinnvoll und kann Kosteneinsparungen ermöglichen.

Alternative Technologien

Neben dem Ausbau einer europäischen PV-Produktion könnten alternative Technologien helfen, die Abhängigkeit von chinesischen Herstellern zu reduzieren. Die Wafer-basierte PV-Technologie wird klar von China dominiert. Neben bereits eingesetzten Dünnschichtmodulen existieren weitere, alternative PV-Technologien, wie die Perowskit-Zellen, Tandemsolarzellen oder andere neuartige Zelltechnologien, in unterschiedlich weit entwickelten Reifegraden.

Dabei erscheint die Perowskit-Zelltechnologie derzeit als die aussichtsreichste Alternative. Sie besitzt einen sehr hohen Wirkungsgrad, da mehrere Bereiche des Lichtspektrums zur Energieerzeugung genutzt werden können. Gleichzeitig geht die Wissenschaft von niedrigeren Produktionskosten aus. Allerdings müssen der Materialeinsatz hinsichtlich diverser Schadstoffe (z. B. Blei in wasserlöslicher Form) und insbesondere die Haltbarkeit der Technologie verbessert werden (mindestens 20 Jahre Lebensdauer), um eine wettbewerbsfähig attraktive Alternative bereitzustellen (Fischer, A., 2022). Zu welchem Zeitpunkt die Technologie ihre Marktreife er-

langen wird, ist derzeit schwer zu prognostizieren. Erste Hersteller planen die Inbetriebnahme von Produktionslinien ab 2024 mit dem Ziel einer kommerziellen Vermarktung ab 2026 (Hannen, P., 2023). Es bleibt abzuwarten, ob bzw. wie schnell und in welchem Umfang die Perowskit-Technologie Marktanteile gegenüber klassischen, Silizium-basierten Modulen gewinnen wird.

Auch eine verstärkte Nutzung der bereits eingesetzten Dünnschicht-Technologie könnte die Abhängigkeit von China reduzieren. Die geringeren Wirkungsgrade und der Einsatz kritischer Rohstoffe stellen hierbei wesentliche Herausforderungen dar. Laut (Fraunhofer ISE, 2023) liegen für die langfristige Verfügbarkeit von Tellur und Indium für CdTe-Module widersprüchliche Aussagen vor. Allerdings steigt in den USA in der jüngsten Vergangenheit der Einsatz von Dünnschicht-Modulen bei Großprojekten (NREL, 2022).

6.2. Windkraft



- Derzeit noch starke Fertigungsindustrie in Deutschland und in der EU, die wachsenden Ausbaudarf auch mittelfristig decken kann.
- Die EU-Ziele aus dem Net-Zero Industry Act von 85 Prozent europäischem Fertigungsanteil können voraussichtlich erreicht werden.
- 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).
- Dazu beitragen könnten insbesondere europäisch abgestimmte Ausbaupfade, die zu einer Verstärkung in den Fertigungsaufträgen führen, sowie Ausschreibungsregeln, die den Einsatz europäischer Anlagen belohnen.
- Die kritischste Abhängigkeit besteht im Bezug von Permanentmagneten aus China.
- Eine Senkung der Kritikalität durch alternative Technologien scheint kaum möglich und wäre mit hohen Nebenwirkungen verbunden, ggf. bis hin zur Unterstützung des massiven Markteintritts chinesischer Hersteller.

TAB. 04 **Heutige Produktionskapazitäten für Windkraft in Europa und Ziele 2030**

Die voraussichtliche Produktionskapazität in 2030 könnte durch Steigerung der Turbinenleistung voraussichtlich 100 Prozent des Zubaubedarfs decken.

Rohstoff/ Komponente	Stand 2022	Voraussichtliche Kapazität 2030	Ziele 2030 nach Net-Zero Industry Act: mind. 85 %*
Rotor (Nabe, Blätter)	18 GW	~ 30 GW	36 GW
Generator	36 GW	~ 65 GW	36 GW
Getriebe	22 GW	~ 40 GW	36 GW
Gondel	22 GW	~ 40 GW	36 GW

* Nach Zielen des Net-Zero Industry Act sollen mindestens 85 Prozent der neuen Anlagen 2030 in Europa gefertigt werden. Dieses entspricht einer Fertigungskapazität von 36 GW.

QUELLE Eigene Darstellung nach (Telsnig, Georgakaki, & Letout, 2022)

Prognos, 2023

Produktionsaufbau in Europa

Gemäß EU Climate Target Plan werden in der EU bis zum Jahr 2030 bei Windkraft an Land etwa 40 GW jährlicher Zubau an erwartet. Nach den Zielen des Net-Zero Industry Acts sollen mindestens 85 Prozent der neu installierten Anlagen im Jahr 2030 in Europa gefertigt werden. Dafür wird eine Fertigungskapazität von 36 GW benötigt. Die voraussichtlichen europäischen Produktionskapazitäten für die Hauptkomponenten von Windenergieanlagen (vgl. TAB. 04) könnten dieses Ziel sogar übersteigen (Telsnig, Georgakaki, & Letout, 2022). Grund für diese Annahme ist die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fertigungen hin zu größeren Turbinenleistungen. Vereinfacht gesprochen, würde durch den Trend zu Anlagen mit mehr Leistung bei gleicher Anzahl produzierter Anlagen auch die Produktion in GW ansteigen. Dies gilt entsprechend auch für die weiteren Anlagenkomponenten, wie Rotoren oder Türme.

Bei der Betrachtung der Produktionskapazitäten für Windenergie-Komponenten spielt jedoch auch die Größenklasse der gefertigten Turbinen eine zunehmend wichtige Rolle bei der Bewertung. Grund ist, dass in einer Fertigungsanlage für Turbinen der 3-MW-Klasse nicht ohne weiteres Anlagenteile einer höheren MW-Klasse gefertigt werden können.

Insbesondere im Bereich von Offshore-Turbinen mit Leistungen größer als 12 MW bestehen daher die größten Gefahren für Knappheiten in der europäischen Lieferkette. Derzeit besteht für die Fertigung von Anlagen mit mehr als 12 MW Leistung in Europa nur eine

Fertigungskapazität von ca. zwei bis drei GW pro Jahr. Der jährliche Zubaubedarf wird aber in Europa in diesem Segment bis zum Jahr 2030 auf voraussichtlich mehr als 20 GW pro Jahr ansteigen. Herausforderung ist die Fertigungskapazitäten entsprechend aufzubauen bzw. bestehende Produktionsstätten entsprechend zu erweitern.

Im Gegensatz zur Photovoltaik existiert bei Wind Onshore in der EU also weiterhin eine starke heimische Fertigungsindustrie, die in der Lage ist, auch den mittelfristig stark ansteigenden Ausbaubedarf zu bedienen. Ziel aller Maßnahmen in diesem Bereich muss es daher sein, diese vorhandenen Kapazitäten zu erhalten und Kapazitätserweiterungen an vorhandenen Standorten zu ermöglichen, sodass auch der zukünftig stark wachsende Bedarf an Turbinen der größten Leistungsklasse im Offshore-Sektor bedient werden kann.

Wie bereits beschrieben bestehen Windenergieanlagen aus zahlreichen Teilkomponenten, von denen derzeit ebenfalls viele aus China bezogen werden. Sehr kritisch ist die Abhängigkeit wie auch in der Elektromobilität bei Seltenen Erden bzw. den daraus gebauten Permanentmagneten für die Generatorfertigung. Auch bei Eisengussteilen, Elektroblechen und Glasfasermatten können derzeit signifikante Importanteile beobachtet werden, allerdings sind diese eher auf Preisvorteile ausländischer Hersteller als auf mangelnde Produktionskapazitäten in der EU zurückzuführen. Kritischer zu bewerten ist die Abhängigkeit bei Elektronikbauteilen, Chips und einzelnen Steuerungselementen aus dem asiatischen Raum. Die Problematik ist jedoch keinesfalls

spezifisch für die Windenergie und muss im Rahmen möglicher Verschiebungen in globalen Lieferketten vor dem Hintergrund der aktuellen geopolitischen Lage berücksichtigt werden.

Chinesische Windturbinenhersteller konnten in den letzten Jahren deutliche Reduktionen der Fertigungskosten erzielen. Sie liegen bei Onshore-Turbinen und Offshore-Turbinen um bis zu 40 Prozent unterhalb der Fertigungskosten europäischer Hersteller, insbesondere getrieben durch geringere Rohstoff- und Arbeitskosten (Totaro, P., 2022). Insbesondere durch die mit großen Anlagen verbundenen hohen Transportaufwände führt dies jedoch bislang nicht zu einem merklichen Markteintritt chinesischer Hersteller in den deutschen Markt. Trotzdem muss die Kostensituation im internationalen Vergleich bei allen Maßnahmen stets im Auge behalten werden.

Senkung Rohstoffintensität und alternative Technologien

Die Senkung der Materialintensität beim Einsatz von Seltenen Erden als Hauptbestandteil von Permanentmagneten kann voraussichtlich nur sehr begrenzt zu einer Reduzierung der Kritikalität bei der Abhängigkeit des Bezugs dieser Teilkomponenten aus China beitragen.

Eine signifikante Reduzierung des Einsatzes von Permanentmagneten in Windenergieanlagen könnte durch einen technologischen Fokus beim Ausbau auf solche Anlagentypen erreicht werden, die Getriebe und/oder keine Permanentmagneten verwenden. Allein durch den Einsatz von Getrieben und damit einer Reduktion der Generatorgröße kann die Materialintensität von Seltenen Erden um 65 bis 90 Prozent reduziert werden.

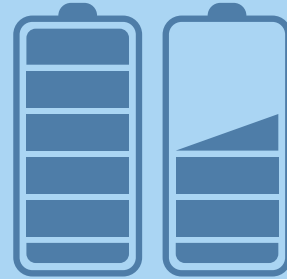
Insbesondere im Offshore-Bereich werden jedoch fast ausschließlich Windenergieanlagen mit Permanentmagneten eingesetzt, wobei derzeit ein klarer Trend in Richtung getriebeloser Anlagen zu beobachten ist. Dies liegt insbesondere in der Dominanz sehr großer Anlagen (mit Leistungen von derzeit bis zu 15 MW) begründet. Durch die Leistungssteigerungen pro Anlage werden die Gesamtkosten eines Windparks durch die sinkende Anzahl an erforderlichen Gründungsstrukturen erheb-

lich gesenkt. Ein Eingriff in die Technologiewahl würde daher insbesondere im Offshore-Bereich vermutlich zu starken Verwerfungen führen. Vor dem Hintergrund der ohnehin vorhandenen Vorteile Nicht-Europäischer Anlagenhersteller bei den Fertigungskosten würde sich daraus sogar die Gefahr ergeben, dass die zusätzlichen Vorteile bei den Gesamtkosten bei Verwendung größerer und effizienterer Anlagen (auf Basis von (getriebelosen) Permanentmagnet-Anlagen) die Marktposition europäischer Hersteller zusätzlich stark schwächen würde.

Diversifizierung und Recycling

Entscheidend für die Senkung der Kritikalität beim Ausbau der Windenergie sind daher analog zum Anwendungsfall der Elektromobilität Maßnahmen zu sehen, die zu einer Diversifizierung der Lieferketten bei Seltenen Erdmetallen bzw. Permanentmagneten führen bzw. durch Recycling den Importbedarf weiter senken (vgl. KAP. 6.4). Im Bereich der Windenergie ist jedoch erst in den Jahren 2030 bis 2035 mit signifikantem Rückbau von Offshore-Anlagen zu rechnen, die ein nennenswertes Recyclingpotenzial für Seltene Erden bieten.

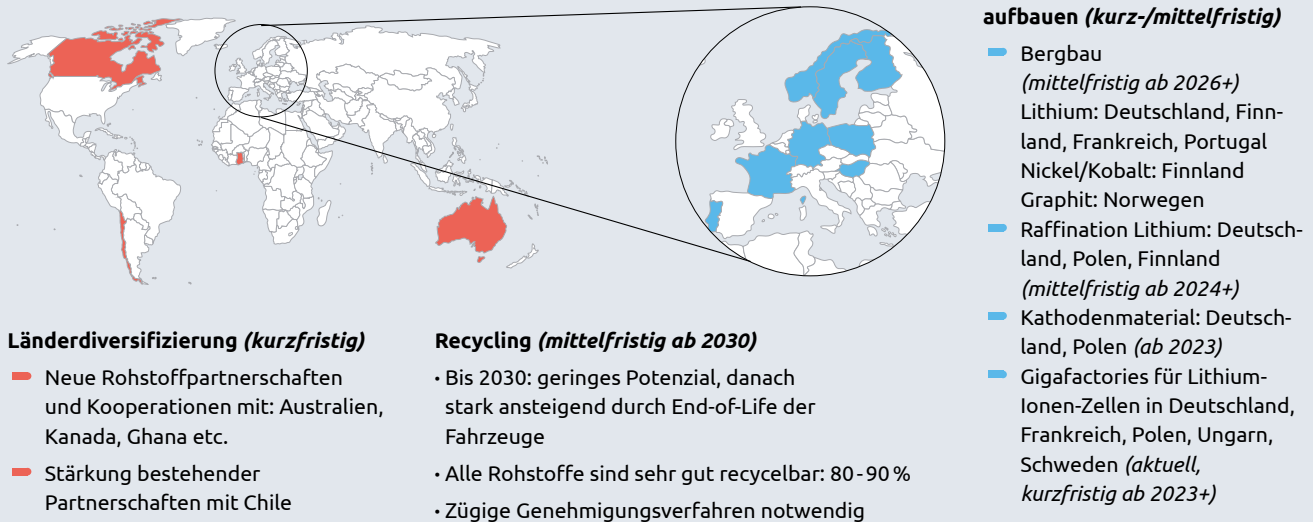
6.3. Lithium-Ionen-Batterien



- Der Hochlauf auf der Nachfrageseite ist auf der Angebotsseite bei den Rohstoffen vor allem bzgl. der Lithium-Lieferkette für Deutschland und Europa eine große Herausforderung.
- Darüber hinaus sind bei der Rohstoffverarbeitung Nickel, Kobalt, Graphit und auch Mangan von Relevanz, bei den (Teil-)Komponenten muss u. a. der Hochlauf der Anoden- und Kathodenmaterialproduktion innerhalb der EU unbedingt forciert werden.
- Die Gewinnung und Verarbeitung von Lithiumverbindungen in Deutschland und Europa ist eine strategische Aufgabe: Dieses betrifft Bergbau, Lithiumraffinerien, Kathodenmaterialproduktion, Gigafactories etc.
- Für die Batterierohstoffe, Aktivmaterialien und Batteriezellen – besonders Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen (LFP) – ist eine stärkere Differenzierung der Lieferländer nötig und auch möglich.
- Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wird in fünf bis 15 Jahren eine immer größere Relevanz für die Versorgung einnehmen (siehe Vorgaben der neuen EU-Batterieverordnung).

ABB. 49 **Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz der Lieferkette von Lithium-Ionen-Batterien**

Kurzfristig prioritär: verstärkte Länderdiversifizierung und Stärkung Wertschöpfungskette innerhalb Europas. Recycling wird sehr relevant nach 2030.



Prognos, 2023

Für die Lieferkette der Lithium-Ionen-Batterien besteht kurz- und mittelfristig ein dringender Handlungsbedarf, wirksame Hebel zu identifizieren und einzusetzen, um die Resilienz deutlich zu stärken. Die wesentlichen Hebel sind:

- Der robuste Aufbau einer innerdeutschen bzw. innereuropäischen Produktion über die gesamte Lieferkette hinweg,
- Die stärkere Diversifikation hinsichtlich Partnerländer für das Angebot auf wichtigen Ebenen der Lieferkette (Rohstoffe, wichtige Zwischenprodukte, strategische Güter und Komponenten),
- Der konsequente Aufbau und die Hochskalierung der Infrastruktur für ein Recycling von Lithium-Ionen-Batterien im industriellen Maßstab.

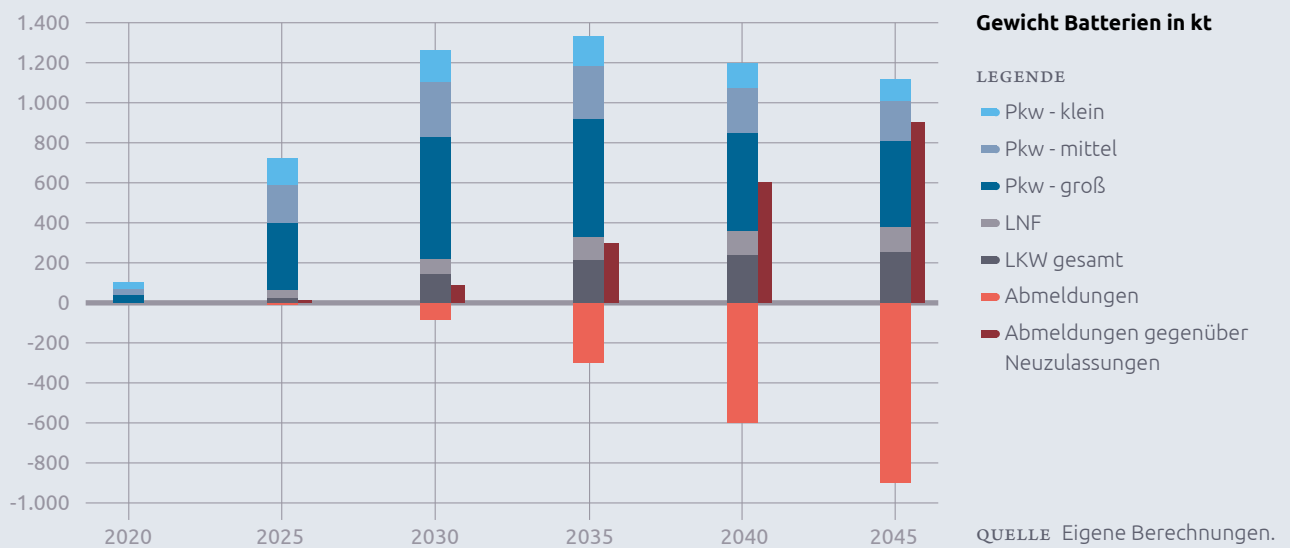
In Abbildung 49 sind einige Beispiele für diese Hebel zur Steigerung der Resilienz der Lieferkette Lithium-Ionen-Batterien anhand einer Weltkarte konkretisiert. Die Verringerung des Materialaufwands kritischer Rohstoffe durch kleinere Batterien und weniger und kleinerer Fahrzeuge ist schon Bestandteil des sehr ambitionierten Szenarios «KNDE2045», auf dem diese Studie aufbaut, und wird hier nur am Rande betrachtet.

Der Aufbau von Gigafactories für die Produktion von Lithium-Zellen innerhalb der EU wird aktuell durch die EU und Mitgliedsstaaten wie Frankreich und Deutschland strategisch forciert. Es gibt kurz- und mittelfristig viele Großprojekte, die dazu beitragen können, die Resilienz der Lieferkette für Deutschland bzw. für die EU zu stärken. Wichtige Beispiele für Projekte in Europa, jeweils häufig mit Investitionen im Bereich mehrerer hundert Millionen oder einiger Milliarden Euro verbunden, sind:

- **Bergbau:** vor allem Bergbauprojekte für die inländische Förderung von Lithiumverbindungen in Deutschland, Finnland, Frankreich, Portugal usw.; dazu Bergbauprojekte bzgl. Nickel und Kobalt in Finnland sowie Graphit in Norwegen und Schweden,
- **Zwischenprodukte:** es sind mehrere Projekte für sogenannte Lithiumraffinerien zur Produktion von Lithiumverbindungen in Batteriequalität in Deutschland, Finnland, Polen in der Planungs- oder gar bereits in der Bauphase,
- **Kathodenmaterial:** in Finnland (auch Vorprodukte), Deutschland bzw. in Polen sind neue Anlagen zur Produktion von Kathodenmaterial im Bau bzw. neuerdings bereits in der Produktion,

ABB. 50 **Gesamtgewicht der Lithium-Ionen-Batterien für Neuzulassungen sowie Abmeldungen in Deutschland nach dem Szenario «KNDE2045»**

Die potenziellen Rücklaufmengen von End-of-Life-Batterien wachsen nach 2030 massiv an.



Öko-Institut, 2023

- **Anodenmaterial:** es gibt neuerdings Pläne für den Aufbau größerer Produktionskapazitäten in Schweden (Benchmark Source, 2023b),
- **Gigafactories:** große Anlagen zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen sind in zahlreichen Staaten der EU (Ungarn, Polen, Deutschland, Frankreich, Schweden usw.) in Planung, Bau oder bereits im Betrieb.

Recycling

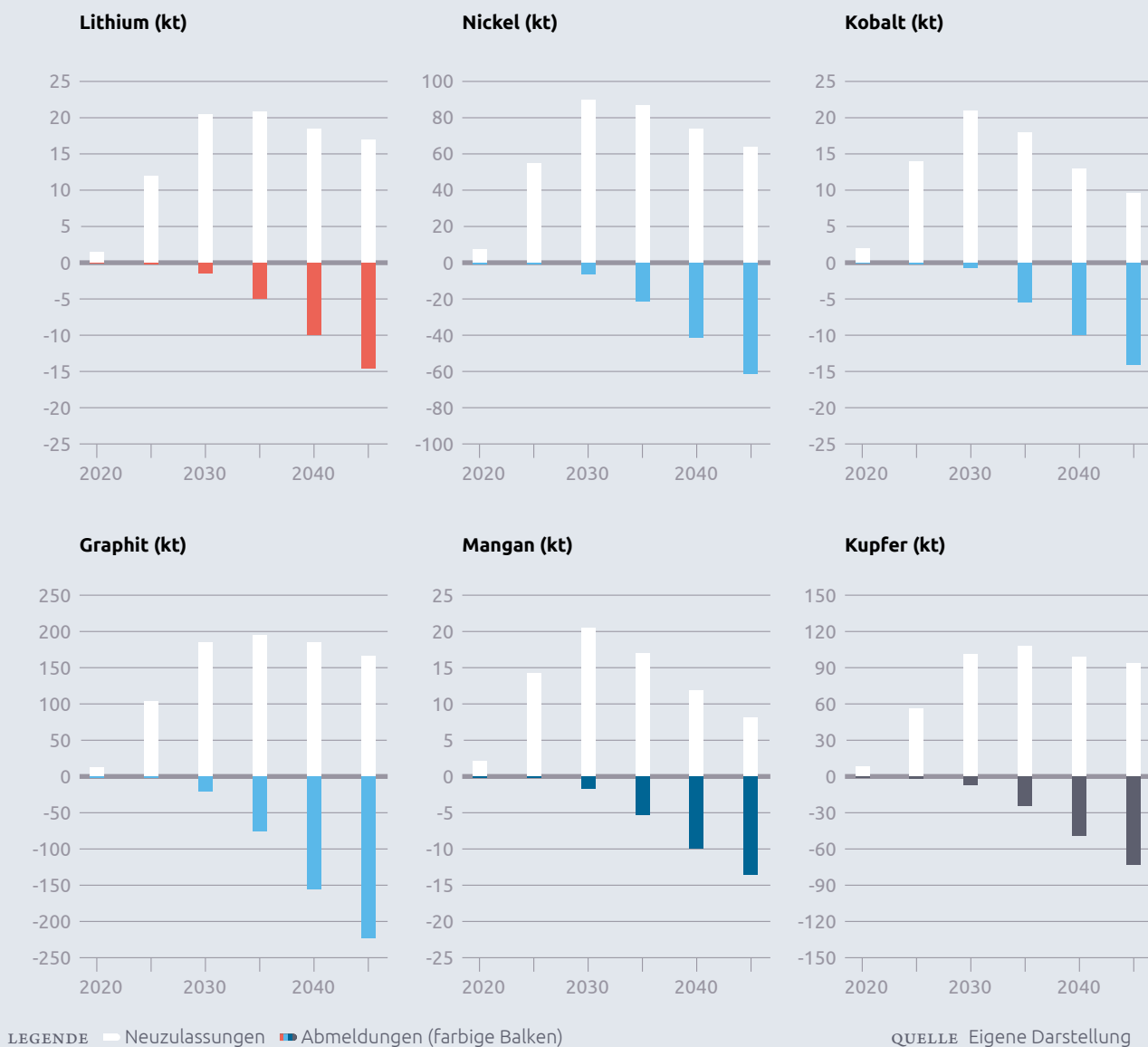
Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wird im kleinen Maßstab⁴² in Deutschland und anderen EU-Ländern bereits praktiziert. Bislang zielen die Verfahren vor allem auf die Rückgewinnung von Kupfer sowie Nickel- und Kobaltverbindungen. Verfahren zur Rückgewinnung von Lithiumverbindungen – und unter Umständen auch Manganverbindungen – sind kurz vor der industriellen Realisierung. An der anspruchsvollen Rückgewinnung von Graphit wird sich in einer Reihe von For-

schungs- und Entwicklungsprojekten gegenwärtig noch versucht. Zur Beantwortung der Frage inwieweit Sekundärrohstoffe (Lithium, Kobalt, Nickel etc.) aus dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zukünftig eine relevante Rolle einnehmen können, ist in Abbildung 50 für das Szenario «KNDE2045» der Gesamtbedarf an Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland (in Tonnen Gesamtgewicht der Batterien inkl. Gehäuse etc.) für die Fahrzeugneuzulassungen und das jeweilige theoretische Potenzial aus abgemeldeten Fahrzeugen in Deutschland zwischen 2020 und 2045 aufgeführt.

Nach dem Szenario «KNDE2045» ergibt sich ein Gesamtbedarf für die Fahrzeugneuzulassungen im Jahr 2030 von rund 1,26 Millionen Tonnen Lithium-Ionen-Batterien – dieser Menge stehen im gleichen Jahr rund 86.000 Tonnen Lithium-Ionen-Batterien aus abgemeldeten Fahrzeugen gegenüber. Die enorme Dynamik in diesem System (Neuzulassungen vs. Abmeldungen) ist bereits fünf Jahre später – also 2035 erkennbar: hier stehen nun 1,33 Millionen Tonnen Lithium-Ionen-Batterien für Neuzulassungen bereits rund 297.000 Tonnen Lithium-Ionen-Batterien aus abgemeldeten Fahrzeugen gegenüber. Etwas geringer wird dieses Potenzial in der mittelfristigen Perspektive, wenn man die erhöhten Mengen an benötigten Rohstoffen für das Szenario «Inlandsproduktion» bedenkt.

42 Die bisherigen Anlagenkapazitäten für Recycling von Lithium-Ionen-Batterien liegen in D und der EU liegen bislang meist im vierstelligen jährlichen Tonnenbereich bzw. vereinzelt im unteren fünfstelligen jährlichen Tonnenbereich (bezogen auf den Inputstrom der Anlagen).

ABB. 51 **Jährliche Rohstoffbedarfe für Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeugneuzulassungen sowie theoretische Rohstoffpotenziale aus Fahrzeugabmeldungen in Deutschland nach dem Szenario «KNDE2045»**
Vor allem für Lithium, Kobalt, Nickel und Kupfer zeigen sich ab 2030 erheblich wachsende Recyclingpotenziale.



Öko-Institut, 2023

Darüber hinaus kann aus verschiedenen Gründen (Zweitnutzungen von Batterien, Exporte von Gebrauchtfahrzeugen in das Ausland etc.) nicht davon ausgegangen werden, dass das Potenzial an Lithium-Ionen-Batterien in Gänze dem Recycling zur Verfügung stehen wird. Allerdings werden auch in den anderen EU-Ländern und darüber hinaus Recyclingkapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien zunehmend aufgebaut (fortum, 2023). Dennoch sind die Verschiebungen im Verhältnis Tonnage Neuanmeldungen versus Tonnage Abmeldungen im Zeitverlauf signifikant – zumal sich das Verhält-

nis der Größenordnungen nach 2035 bis 2045 weiter annähert.

In Abbildung 51 sind nun für die Fahrzeugneuzulassungen und Fahrzeugabmeldungen in Deutschland die jeweiligen Tonnagen für die strategischen Rohstoffe Lithium, Mangan, Kobalt, Graphit, Nickel und Kupfer zwischen 2020 und 2045 dargestellt.

Im Detail unterscheiden sich die Entwicklungen der Mengenverhältnisse der einzelnen Rohstoffe zwischen Neuzulassungen und Abmeldungen. Diese Detailunterschiede spiegeln die weiter oben geschilderten Verän-

derungen der Zellchemien der Lithium-Ionen-Batterien über den Zeitstrahl des Szenarios wider. Für den strategischen Rohstoff Lithium zeigen die Neuzulassungen für das Jahr 2030 einen Bedarf von rund 20.500 Tonnen Lithium; dem steht ein theoretisches Potenzial im Jahr 2030 aus Abmeldungen von rund 1.400 Tonnen Lithium gegenüber. Die Verhältnisse verschieben sich in den folgenden Jahren rasant: bereits 2035 beträgt das Verhältnis aus Neuzulassungen und Abmeldungen für Lithium rund 21.000 Tonnen (Neuzulassungen) gegenüber rund 4.900 Tonnen Lithium (Abmeldungen). Wenn nach Abzug von Verlusten in der Recyclingkette (bei der Sammlung, in den Aufbereitungs- und Recyclingprozessen selbst) lediglich 50 Prozent des theoretischen Potenzials für Lithium im Jahr 2035 erschlossen werden könnte, würde dennoch mehr als zehn Prozent des Lithiumbedarfs bereits aus Sekundärquellen gespeist werden können.⁴³

Im Falle von Kobalt entwickelt sich das Recyclingpotenzial noch deutlich steiler als im Falle von Lithium. Hier zeigen die Neuzulassungen für das Jahr 2030 einen Bedarf von rund 20.900 Tonnen Kobalt; dem steht ein theoretisches Potenzial im Jahr 2030 aus Abmeldungen von rund 1.700 Tonnen Kobalt gegenüber. Die Verhältnisse verschieben sich in den folgenden Jahren rasant: bereits 2035 beträgt das Verhältnis aus Neuzulassungen und Abmeldungen für Kobalt rund 18.000 Tonnen (Neuzulassungen) gegenüber rund 5.400 Tonnen Kobalt (Abmeldungen). Wenn nach Abzug von Verlusten in der Recyclingkette lediglich 80 Prozent des theoretischen Potenzials für Kobalt in 2035 erschlossen werden könnte, würde dennoch rund 24 Prozent des Kobaltbedarfs bereits aus Sekundärquellen gespeist werden können.⁴⁴

43 Mittel- und langfristig sind höherer Rückgewinnungsraten auch für Lithium zu erwarten. Die neue EU Battery Regulation sieht strenge Sammelziele und in einer zweiten Stufe Rückgewinnungsraten für Lithium aus den Aufbereitungs- und Recyclingprozessen von > 80 Prozent vor.

44 Die neue EU Battery Regulation sieht strenge Sammelziele und in einer zweiten Stufe Rückgewinnungsraten für Kobalt aus den Aufbereitungs- und Recyclingprozessen von mind. 95 Prozent vor. Exporte aus der EU werden dabei allerdings vernachlässigt.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die neue EU-Battery Regulation, die noch im Jahr 2023 in Kraft treten soll, folgende Sekundärmetalleinsatzquoten für neu in die EU in Verkehr gebrachte Lithium-Ionen-Batterien fortschreibt (Council of the European Union, 2023b):

- Acht Jahre nach in Kraft treten: je sechs Prozent für Lithium und Nickel, 16 Prozent für Kobalt,
- 13 Jahre nach in Kraft treten: zwölf Prozent für Lithium, 15 Prozent für Nickel, 26 Prozent für Kobalt.

Wie aus Abbildung 51 zu entnehmen ist, sind langfristig (2045) durchaus Sekundärmetalleinsatzquoten in der Größenordnung von rund 50 Prozent (Lithium) und von rund 70 Prozent (Kupfer) aus dem Kreislauf der Lithium-Ionen-Batterien möglich. Im Falle von Nickel und Kobalt errechnet sich bis 2045 gar nahezu eine Vollversorgung durch Sekundärrohstoffe aus dem Batteriekreislauf. Gleiches gilt rechnerisch für Mangan – allerdings ist Mangan nicht spezifisch in der kommenden neuen EU Battery Regulation adressiert und bislang ist der ökonomische Anreiz in der Recyclingwirtschaft für die Rückgewinnung von Mangan aufgrund der spezifischen relativ niedrigen Manganpreise bislang noch überschaubar. Allerdings ist es gut möglich, dass mit dem mittelfristigen Aufbau einer Recyclingwirtschaft für Lithium-Ionen-Batterien in der EU im großindustriellen Maßstab Mangan als «Beifang» ebenfalls zurückgewonnen und verwertet werden wird.

In allen Fällen muss der erhöhte Bedarf der deutschen Automobilindustrie im Szenario «Inlandsproduktion» mitbedacht werden. Wenn lediglich die deutschen Abmeldungen an Fahrzeugen als Recyclingpotenzial der gesamten Fahrzeugproduktion gegenübergestellt werden, sinkt dieses Potenzial stark. Jedoch muss auch hier der Blick auf die EU erweitert werden, in denen ebenfalls Fahrzeuge anfallen und recycelt werden, die Automobilproduktion im Vergleich zu Deutschland jedoch meist eine geringere Rolle spielt.

Produktionsaufbau in Europa

Der Aufbau von Gigafactories für die Produktion von Lithium-Zellen innerhalb der EU wird aktuell strategisch forciert. Es gibt kurz- und mittelfristig viele geplante und bestehende Großprojekte für unterschiedliche Stufen der Lieferkette: vom Bergbau zu den Lithium-Ionen-Zellen (vgl. TAB. 15 und TAB. 16 im Anhang). Der Fokus liegt auf Grund des steilen kurz- bis mittelfristigen Nachfragehochlaufs für Lithium-Ionen-Batterien auf dem Zeithorizont von heute bis 2030. Sie unterscheiden sich allerdings untereinander sehr stark in ihrer Konkretisierung. Teils sind die genannten Projekte schon komplett etabliert und produzieren schon, teils handelt es sich nur um vage Ankündigungen. Gleichzeitig zeigen sich damit doch sehr große Potenziale für eine zukünftige Versorgung mit zum Teil in der EU gewonnenen bzw. verarbeiteten Rohstoffen und Materialien bis zum Jahr 2030, dargestellt in Tabelle 5.

In diesem Zusammenhang sei auf veröffentlichte Einschätzungen der DERA zum möglichen Selbstversorgungsgrad Europas bzgl. Lithium im Jahr 2030 verwiesen. Die DERA sieht dabei nach zwei verschiedenen Szenarien eine Größenordnung von 27 Prozent bis 34 Prozent für die Selbstversorgung hinsichtlich des Lithiumbedarfs in Europa für möglich. Dabei tragen sowohl heimische Bergbauförderung von Lithium als auch Recycling (Schaal, S., 2023a) zu dieser Potenzialeinschätzung bei (Al Barazi, S., 2022). Sollten sich alle angekündigten Vorhaben in der zuvor genannten Tabelle bis 2030 realisieren lassen, könnte dieser Anteil sogar noch übertroffen werden. Dies ist jedoch eher unwahrscheinlich.

Die unterschiedliche Bedeutung der Rohstoffe wird auch nochmal deutlich an der Menge an schon heute in der EU gefördertem Kupfer (>500 kt/a) und im Vergleich dazu der Bedarf der Batterieindustrie während des absoluten Hochlaufs. Dabei wird der Bedarf vom verfügbaren Angebot deutlich übertroffen. Allerdings muss dabei bedacht werden, dass Lithium-Ionen-Batterien nur eine von sehr vielen Anwendungen sind, die Kupfer benötigen und besonders der zusätzliche Bedarf an Kupfer in der Zukunft zu Herausforderungen führen

könnte. Im Vergleich zu den anderen Rohstoffen, wie Lithium und Kobalt, ist der Batteriemarkt dafür allerdings weniger entscheidend.

Die angekündigten Batteriezellproduktionskapazitäten in der EU (bis zum Jahr 2030) zum jetzigen Stand (Mai 2023) sind in Tabelle 16 im Anhang aufgelistet. Auch dieser Markt ist geprägt von starken Veränderungen und die quantitativen Entwicklungen von einer hohen Dynamik gekennzeichnet. Die großen Zahlen an angekündigter Kapazität für die Produktion an Lithium-Ionen-Zellen (insgesamt über 1,5 TWh) zeigen ebenfalls, dass die EU ihren eigenen Bedarf an Zellen (ca. 1 TWh)⁴⁵ in Zukunft (für das Jahr 2030) aus der Produktion innerhalb der EU decken könnte. Dies lässt allerdings die Nachfrage nach unterschiedlichen Batteriezellchemien außer Acht, die ggf. nur von anderen Firmen außerhalb der EU gedeckt werden kann.

Darüber hinaus muss dabei beachtet werden, dass sich die meisten Projekte bisher verzögern und einige insgesamt noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Gerade bei Ankündigungen ohne Startjahr oder mit großem zeitlichem Vorlauf muss die Zukunft zeigen, inwiefern sich diese Projekte realisieren lassen. Die Subventionen von US-amerikanischer Seite (Inflation Reduction Act) haben aktuell zur Verunsicherung beigetragen. Darüber hinaus hat die bisherige Erfahrung gezeigt, dass gerade zu Beginn die angekündigten Kapazitäten der sogenannten Gigafactories mit aller Wahrscheinlichkeit nicht erreicht werden und erst nach und nach gesteigert werden. Daher muss nun alles daran gesetzt werden, dass die angekündigten Gigafactories auch tatsächlich zeitnah in der Praxis realisiert werden und dieser Hochlauf unterstützt wird.

Diversifizierung von Bezugsländern

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. Die allgemei-

⁴⁵ Benchmark Minerals Januar 2023

TAB. 05 **Heutige Kapazitäten der Lieferkette von Lithium-Ionen-Batterien in der EU sowie bisher angekündigte Kapazitäten und Ziele bis 2030**

Bei den meisten Rohstoffen und weiteren Schritten sind heute keine bzw. kaum Produktionskapazitäten in der EU vorhanden.

	Stand 2022	Angekündigte Kapazitäten	EU-Ziel 2030
Rohstoffe	Lithium: 0 kt Kobalt: 0 kt Kupfer: >500 kt Nickel: ca. 30 kt Graphit: 0 kt	Lithium: >50 kt Kobalt: < 1 kt Kupfer: >500 kt Nickel: ca. 30 kt Graphit: 19,5 kt	10 % *
Prozessierte Materialien	Lithium: 0 kt Kobalt: 0 kt Kupfer: >500 kt Nickel: ca. 30 kt Graphit: 0 kt	Lithium: >50 kt Kobalt: < 1 kt Kupfer: >500 kt Nickel: ca. 30 kt Graphit: 19,5 kt	40 % *
Komponenten	Anode: 0 kt Kathode: 20 kt	Anode: 77 kt Kathoden: 300 kt	n. v.
Batteriezellen	ca. 35 GWh	>1500 GWh	90 % **

* Ziel des Critical Raw Materials Acts zu strategischen Rohstoffen über den Anteil der Gesamtkapazität der EU am jährlichen Verbrauch
 ** Sektorziel der EU

HINWEIS Daten s. Tabelle 15 und Tabelle 16, Ziele nach (KOM, 2023a) und (Bloss, M., 2022)

QUELLE Eigene Darstellung

Öko-Institut 2023

nen Kriterien hierfür sind zu Beginn dieses Hauptkapitels aufgeführt.

Ungeachtet der massiv gestiegenen Investitionen in den Aufbau der innereuropäischen Lieferkette für Lithium-Ionen-Batterien⁴⁶, bedarf der steile Hochlauf der Elektromobilität in der EU zusätzlich einer Stärkung der Diversifikation mit bereits bestehenden oder potentiell zukünftig möglichen neuen Lieferländern außerhalb der EU für wichtige Rohstoffe, Zwischenprodukte, und strategische Güter der Lieferkette von Lithium-Ionen-Batterien. Beispiele bzgl. der wichtigen Batterierohstoffe sind die Stärkung der bestehenden Lieferbeziehungen mit Chile hinsichtlich Lithiumverbindungen und neue Lieferbeziehungen mit Unternehmen, die in klassischen wichtigen Bergbauländern wie Australien, Kanada oder Brasilien aktiv sind (vor allem bzgl. Lithium, Kobalt, Nickel). Weiterhin sind auch mögliche Partnerländer des globalen Südens hier verstärkt ins Auge zu fassen. Für Lithium könnte sich hier beispielsweise das westafrikanische Land Ghana als zukünftiger Wirtschaftspartner anbieten.

46 Siehe hierzu weitere Informationen zu konkreten Projekten in der EU in Tabelle 15 und Tabelle 16 im Anhang

Senkung Rohstoffintensität

Die Materialintensität bzgl. kritischer Rohstoffe für Batterien kann durch kleinere Batterien und weniger bzw. kleinere Fahrzeuge mit verringertem Energieverbrauch erreicht werden. Diese Maßnahmen sind zum Teil jedoch schon im ambitionierten Szenario «KNDE2045» beinhaltet und spielt hier daher nur eine untergeordnete Rolle, um den Bedarf noch weiter zu reduzieren. Dennoch müssen sie bei jeder politischen Regulierung unbedingt mitbedacht werden, um überhaupt die Ziele der Klimaneutralität bis 2045 erreichen zu können. Auch ein Technologiewechsel zu einer anderen Batteriechemie, die ohne oder zumindest mäßig kritischen Rohstoffen auskommt, kann die Lieferketten entlasten. Jedoch kommen diese mit ihren eigenen Herausforderungen bzgl. Recyclingfähigkeit und ggf. erhöhtem THG-Emissionen pro kWh in der Produktion und in der Benutzung. Dies muss bei der Erarbeitung der politischen Rahmenbedingungen mitbedacht werden. Darüber hinaus wird es bei Technologien, wie Natrium-Ionen-Batterien noch einige Jahre dauern, bis diese signifikanten Produktionsvolumina erreichen könnten, sofern sie den notwendigen technologischen Reifegrad erreichen.

6.4. Permanentmagnete



- Deutschland und die EU sollten die europäische Wertschöpfungskette und die Differenzierung der Lieferländer kurz- und mittelfristig massiv ausweiten, um erhebliche Abhängigkeiten durch die starke Dominanz Chinas zu mindern.
- Die starke gegenwärtige Dominanz Chinas bei wichtigen Zwischenstufen, wie Separation der Seltenen Erden und Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten, stellt vor dem steilen Hochlauf der Nachfrage ein signifikantes Risiko dar.
- Vor allem die USA verfolgt daher mit Nachdruck den Aufbau einer eigenen Lieferkette: Aufbereitungsanlagen für Leichte Seltene Erden sowie Schwere Seltene Erden, Aufbau einer eigenen Magnetproduktion (GM/VAC) in den USA (Minenproduktion in USA; Australien, Kanada etc.).
- Auch die EU versucht hier mit zeitlicher Verzögerung nachzuziehen, aber europäische Akteure in der Lieferkette benötigen Investitionssicherheit für neue Anlagen und Produktionen unabhängig von kurzfristigen Veränderungen.
- Recycling von Seltenen Erden bzw. Permanentmagneten ist mittel- und langfristig strategisch relevant (Material mit 30 Gewichtsprozent der gewünschten Seltenen Erden) für eine größere Unabhängigkeit Europas: die wenigen industriellen Player in Europa sollten hier unbedingt gestärkt werden.

Die effizientesten Elektromotoren und Generatoren (Windkraftanlagen) enthalten Permanentmagnete (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) auf Basis Seltener Erden, d. h. die Leichten Seltenen Erden (LSE) Neodym und Praseodym sowie die Schweren Seltenen Erden (SSE) Dysprosium und Terbium, die als die derzeit kritischsten Rohstoffe überhaupt eingestuft werden (JRC, 2021).

In Abbildung 52 sind wichtige Beispiele für geplante Projekte zur Stärkung der Lieferkette in Europa (inkl. Recycling) sowie zu einer stärkeren Diversifikation hinsichtlich der Lieferländer von außerhalb der EU aufgeführt. Alle diese Projekte können im Erfolgsfall dazu beitragen, die Resilienz der Lieferkette von Neodym-Eisen-Bor-Magneten zu erhöhen.

Produktionsaufbau in Europa

Es haben sich in den letzten Jahren aus unterschiedlichen Aktivitäten interessante Perspektiven für die Stärkung der Lieferkette der Neodym-Eisen-Bor-Magnete innerhalb der EU und benachbarter Staaten wie Norwegen und Großbritannien ergeben (siehe auch die Übersichtstabelle im Anhang). So gibt es konkrete Pläne in Estland gleich mehrere wichtige Stufen der Lieferkette (Separation der Seltenen Erden, Herstellung von Seltenerdmetallen) bis hin zur Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten (u. a. aus verwerteten Magneten) zu realisieren (Antea Group, 2023, Turovski, M., 2022). Ein entsprechendes Projekt ist kürzlich mit dem Baubeginn einer Anlage zur Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten (zunächst 2.000 Tonnen pro Jahr ab 2025; mit einer avisierten Phase 2 bis insgesamt 5.000 Tonnen pro Jahr) unter Förderung mit EU-Mitteln konkret gestartet worden (neomaterials, 2023).

Auch in Schweden (Bergbauförderung) und Norwegen (Separation) gibt es über ein schwedisch-norwegisches Konsortium Investitionspläne im Zeithorizont bis 2026 (vgl. TAB. 18 im Anhang). In Frankreich wiederum plant das mit der Aufbereitung von Seltenen Erden vertraute Unternehmen Solvay einen Ausbau der Separation speziell für Seltene Erden, die für die Magnetpro-

duktion benötigt werden (SOLVAY, 2022). Auch in diesem Vorhaben soll Material aus Magnetrecycling eine Rolle als Inputstrom spielen (SOLVAY, 2023). Schließlich wird auch über konkrete Pläne für eine Separationsanlage für Seltenen Erden in Großbritannien berichtet.

Im Bericht der EIT Raw Materials «Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action» (ERMA; Gauß et al., 2021) wird über Einschätzung diverser Projekte in Europa hochgerechnet, das bis 2020 die Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten bis 2030 von heute rund 500 Tonnen pro Jahr auf 7.000 Tonnen pro Jahr erheblich ausgeweitet werden könnte. Damit könnten 20 Prozent des europäischen Bedarfs in 2030 aus heimischer Produktion gedeckt werden (vgl. TAB. 06).

Recycling

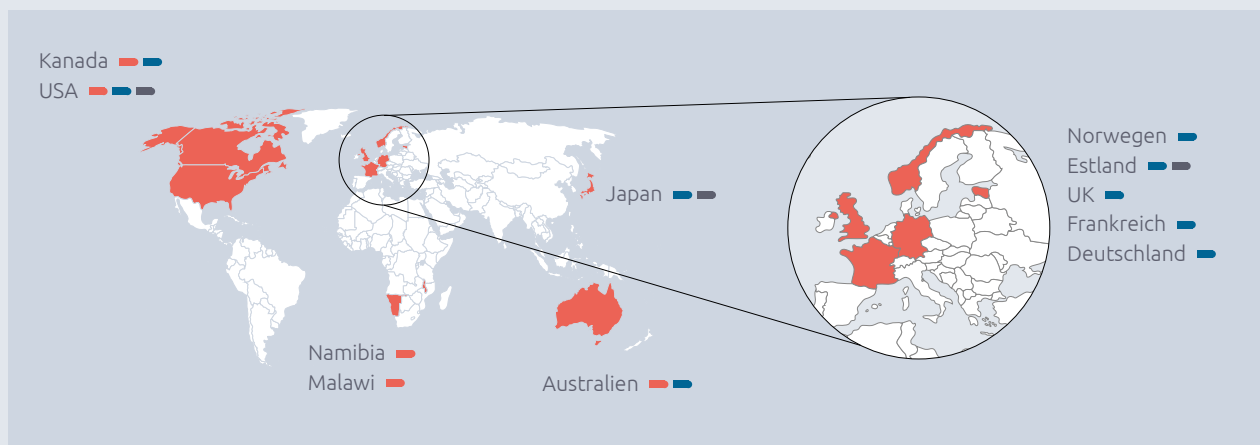
Recycling von Neodym-Eisen-Bor-Magneten und der darin enthaltenen Seltenen Erden steckt bislang auf globaler Ebene – und erst recht in Deutschland und der EU – noch in den Kinderschuhen. Allerdings rückt in den letzten Jahren aufgrund der beschriebenen äußerst vulnerablen Lieferkette für Neodym-Eisen-Bor-Magnete (vgl. KAP. 5.4.) das Recycling dieser Magnete und damit die Sicherung der Seltenen Erden für die Produktion neuer Permanentmagnete in vielen Ländern und auch in der EU und in Deutschland stark in den Fokus von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik (van Nielen, S. et al., 2023). Der Bedarf an einer diversifizierten Materialversorgung und verbesserten Herstellungsmöglichkeiten wird in einer Studie der Europäischen Kommission über kritische Rohstoffe (Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., et al., 2020) klar beschrieben. Im aktuellen Gesetzentwurf der EC zur Versorgung mit kritischen Rohstoffen (KOM, 2023a) (Vorschlag für den Critical Raw Materials Act) wird für das Jahr 2030 eine Recyclingquote von mehr als 15 Prozent angestrebt. Bisher gibt es in der EU jedoch kein industriell entwickeltes Recycling von Seltenen Erden.

Das strategische Potenzial des Recyclings ergibt sich einerseits aus der Tatsache, dass Neodym-Eisen-Bor-

ABB. 52 **Übersicht kurz- und mittelfristiger Alternativen zur Erhöhung der Resilienz der Lieferkette Permanentmagnete**

Kurzfristige Aktivitäten: Länderdiversifizierung, mittelfristig Produktionsaufbau Europa. USA, Kanada, Australien, UK, EU, Japan forcieren derzeit den Aufbau eigener «westlicher» Supply Chains.

LEGENDE ■ Bergbau ■ Weiterverarbeitung und Produktion von Seltenerdmetallen ■ Permanentmagnete



Länderdiversifizierung (kurzfristig)

- Neue Rohstoffpartnerschaften und Kooperationen mit Namibia, Malawi, Kanada, Australien und USA

Rohstoff-Recycling (mittelfristig ab 2030)

- Bislang nur marginal in China
- Erste kleine Anlagen in Deutschland und Großbritannien geplant.
- 2030: moderates Potenzial aus dem Rücklauf von E-Motoren: ab 2035 stark wachsend
- Revision der EU ELV (End-of-Life Vehicles) Directive: Ausbau und angemessene Zerlegung von E-Motoren

Produktion in Europa aufbauen (kurz-/mittelfristig)

- Weiterverarbeitung Seltenerdoxidien: Norwegen, Estland
- Herstellung Seltenerdmetallen: Estland, Großbritannien
- Produktion Permanentmagnete: Deutschland*, Estland
- ERMA-Plan: 20 %-Selbstversorgung der EU in 2030

* VAC in Deutschland hat eine Produktionskapazität von rund 1000 t: mehr als 5-facher Bedarf ist allein für Deutschland bis 2035 notwendig.

QUELLE Eigene Darstellung, Daten s. Tabelle 14 und Tabelle 15, Ziele nach (European Commission, 2023) und (Bloss, 2022)

Öko-Institut, 2023

TAB. 06 **Heutige Kapazitäten der Lieferkette von Permanentmagneten in der EU in Tonnen sowie Ziele bis 2030**

Die Lieferkette in der EU ist erst im Aufbau.

Rohstoff / Komponente	Stand 2022	EU-Ziel 2030
Seltene Erden	0 t	n.v.
SE-Oxide	< 1000 t	6.000 t
SE-Metalle	0 t	5.000 t
Permanentmagnete	1000 t	7.000* t

* entspricht 20 % der prognostizierten Nachfrage

QUELLE Eigene Darstellung nach (ERMA; Gauß et al., 2021)

Öko-Institut 2023

Magnete rund 30 Gewichtsprozent genau der Seltenen Erden (Neodym und Praseodym sowie Dysprosium und Terbium) enthalten, die für die Produktion neuer Hochleistungsmagnete benötigt werden, während in natürlichen Vorkommen, die Gehalte an Seltenen Erden insgesamt in der Regel nur zwischen 0,5 – 1,5 Gewichtsprozent betragen und dabei immer große Anteile an anderen Seltenen Erden wie Cer und Lanthan aufwendig abgetrennt werden müssen (Gielen, D.; Lyons, M., 2022. Andererseits zeigen auch die Ergebnisse dieser Studie für das Szenario «KNDE2045» das mittel- und langfristig stark wachsende Aufkommenspotenzial aus dann stillgelegten Elektrofahrzeugen – und zeitlich etwas später aus abgebauten Windkraftanlagen.

Die Analyse der Szenarienergebnisse (vgl. ABB. 53) zeigt, dass für den Elektrofahrzeugbereich in Deutschland im Jahr 2030 ein Verhältnis der in Neuzulassungen eingesetzten Seltenen Erden gegenüber dem Materialinhalt in abgemeldeten Fahrzeugen von gut 10:1 zu erwarten ist. Bereits fünf Jahre später im Jahr 2035 beträgt dieses Verhältnis rund 4:1 und nähert sich bis 2045 auf gleiche Größenordnungen an. Im Vergleich dazu liegt die Nachfrage nach dem Szenario «Inlandsproduktion» deutlich höher (vgl. KAP. 4 und 5), so dass das Verhältnis auch im Jahr 2045 noch bei ca. 2,5:1 liegt. Auch wenn nicht alle in Deutschland abgemeldeten Fahrzeuge gleich verschrottet werden⁴⁷, zeigt diese Übersicht eindrücklich, dass das mengenmäßige Recyclingpotenzial von Neodym-Eisen-Bor-Magneten und den darin enthaltenen Seltenen Erden ausgehend von heute sehr kleinen Dimensionen bereits in den kommenden sieben bis zwölf Jahren massiv anwachsen wird. Die EU hat dies inzwischen erkannt und legt im Vorschlag für den Cri-

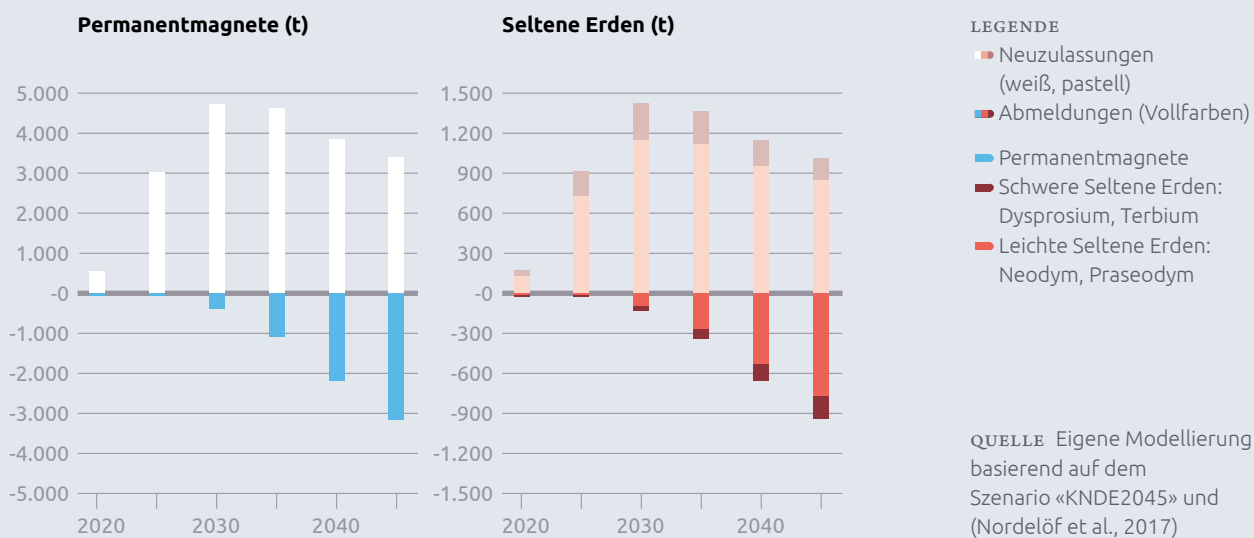
tical Raw Materials Act einen besonderen Schwerpunkt auf das Recycling von Permanentmagneten, um notwendige Rahmenbedingungen und Investitionen zeitnah auf den Weg zu bringen.

Im Vorschlag für den Critical Raw Materials Act werden relevante laufende Revisionen wichtiger Richtlinien mit Fokus auf die Rückgewinnung von Permanentmagneten explizit hervorgehoben (KOM, 2023a): *«Derzeit wird eine gemeinsame Überprüfung der Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge in Verbindung mit der Richtlinie 2005/64/EG über die Typgenehmigung für Kraftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit durchgeführt, um Abfälle aus Altfahrzeugen und ihren Bestandteilen zu verringern und die Kreislauffähigkeit sowohl von konventionellen als auch von Elektrofahrzeugen, die erhebliche Mengen kritischer Rohstoffe enthalten, zu erhöhen. Die auf dieser Überprüfung basierende Gesetzgebungsinitiative wird die in dieser Verordnung enthaltenen horizontalen Anforderungen an die Recyclingfähigkeit ergänzen, indem spezifischere Anforderungen zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit von Dauermagneten in Fahrzeugen eingeführt werden, wodurch die Abfallbehandlung und das Recycling erleichtert werden.»*

Weiterhin wird in dem Verordnungsentwurf bereits vorgedacht, in Zukunft spezifische Quoten (vgl. die demnächst in Kraft tretende EU Battery Regulation) zur Unterstützung des Recyclings von Magneten vorzuschreiben (KOM, 2023a): *«Damit das Recycling von Magneten wirtschaftlich sinnvoll ist, sollten Dauermagnete in Produkten, die auf dem Unionsmarkt in Verkehr gebracht werden, im Laufe der Zeit immer mehr recycelte Rohstoffe enthalten. Während in einer ersten Stufe für Transparenz in Bezug auf den Rezyklatanteil gesorgt wird, sollte nach einer speziellen Bewertung des angemessenen Umfangs und der Auswirkungen ein Mindestgehalt an Rezyklatanteil festgelegt werden.»*

47 Einerseits ist es wahrscheinlich, dass auch Elektrofahrzeuge wie heute Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor teilweise exportiert werden (v. a. in andere EU-Staaten) und noch einige Jahre weiterfahren. Zudem wird in Hinblick auf die E-Motoren, die eine deutlich längere Lebensdauer haben als die Batterien, die Möglichkeit der Weiternutzung diskutiert.

ABB. 53 **Jährliche Nachfrage nach Permanentmagneten bzw. Seltenen Erden für Elektromotoren für Fahrzeugantriebe (Neuzulassungen) sowie Abmeldungen aus der deutschen Flotte**
Nach 2030 wächst das Recyclingpotenzial für Permanentmagnete und Seltene Erden rasant.



Öko-Institut, 2023

Die politischen Diskussionen zur Lieferkette von Neodym-Eisen-Bor-Magneten, ihre Bedeutung für die Energie- und Verkehrswende sowie abgeschlossene und auch laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Recycling von Neodym-Eisen-Bor-Magneten (SUSMAGPRO, 2023) haben dazu geführt, dass nun in Großbritannien und auch in Deutschland erste Recyclinganlagen für Neodym-Eisen-Bor-Magnete im Bau sind und 2023 bzw. 2024 in Betrieb genommen werden sollen (Mining Magazine, 2022). Nach dem Vorschlag der EC für den Critical Raw Materials Act wird für das Jahr 2030 eine Recyclingquote von mehr als 15 Prozent gefordert (KOM, 2023a).

Zusammenfassend lässt sich für den Aufbau und eine Stärkung einer europäischen Lieferkette für Neodym-Eisen-Bor-Magnete konstatieren, dass mit politischer und finanzieller Unterstützung u.a. der EU in den letzten Jahren tatsächlich einige Projekte (vom Bergbau, Recycling und über alle Schritte der Lieferkette) auf den Weg gebracht worden sind. Im Vergleich mit entsprechenden Projekten der Lieferkette der Lithium-Ionen-Batterien wird deutlich, dass sowohl hinsichtlich der Konkretisierung (oft sind Kapazitäts- und Zeitpläne noch nicht bekannt) und der Reife der Projekte im Falle der europäischen Lieferkette für Neodym-Eisen-Bor-Magnete dringender Nachholbedarf besteht. Die starke Fokussierung auf Permanentmagnete im Vorschlag der EC für den Critical Raw Materials Act lässt erkennen, dass die EU dieses Defizit inzwischen erkannt hat. Ungeachtet dessen wird Europa selbst im Falle des Erfolgs einiger der oben genannten Projekte auch im Jahr 2030 auf Lieferungen von außerhalb der EU von Rohstoffen, Zwischenprodukten und strategischen Gütern angewiesen sein. Daher ist eine stärkere Diversifizierung der Lieferländer unbedingt zu verfolgen, um die sehr starke Abhängigkeit von China bei dieser Lieferkette zu verringern.

Diversifizierung von Bezugsländern

Für eine Diversifizierung der Rohstoffversorgung Europas und Deutschlands mit Seltenen Erden bzw. entsprechenden Zwischenprodukten sind neben klassischen westlichen Ländern mit starken Bergbausektoren wie Australien und Kanada auch eine Reihe von Ländern des globalen Südens in den Fokus gerückt. In u. a. den folgenden Ländern sind beispielsweise natürliche Vorkommen an Seltenen Erden bekannt und sollten Rohstoff- und Technologiepartnerschaften ins Auge genommen werden:

- Brasilien (BMBF, o. J. a, BMBF, o. J. b),
- Kenia (Kenya News Agency, 2023),
- Kolumbien (Mining.com, 2023),
(auxico resources, 2023),
- Malawi: Schwere Seltene Erden
(Mining Technology, 2023a),
- Namibia: Schwere Seltene Erden, Yttrium
(Nyaungwa, N., 2022),
(Innovation News Network, 2023)

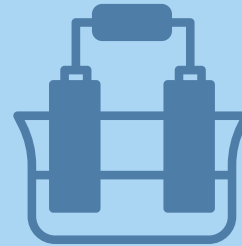
Für die Auswahl der potenziellen Partnerländer spielen neben Fragen der politischen Stabilität und guter Governance nicht zuletzt auch Fragen der Logistik und Infrastruktur (Straßenanbindungen, Anbindungen an Hochseehäfen, valides Stromnetz usw.) eine zentrale Rolle. Dies wird für die oben genannten Länder als positiv eingeschätzt.

Senkung Rohstoffintensität

Es gab und gibt zwar Bestrebungen, den Gehalt der sehr kritischen Schweren Seltenen Erden im Magnetmaterial zu reduzieren, das spezifische Magnetgewicht durch intelligentes Design der Elektromotoren zu reduzieren oder gar andere Elektromotoren, die ohne Permanentmagneten, d. h. die ohne jegliche Seltene Erden arbeiten, für Elektrofahrzeuge einzusetzen. Jedoch wird in Expertenkreisen übereinstimmend davon ausgegangen, dass Materialeffizienz und Substitution auf absehbare Zeit den rasanten Nachfrageanstieg nach Seltenen Erden für Neodym-Eisen-Bor-Magnete nicht entscheidend bremsen werden⁴⁸ und daher Beiträge zur Steigerung der Resilienz hierdurch nur moderate Effekte haben werden.

48 Expertenaussagen im Rahmen der (Automotive IQ, 2023)
10th Annual Advanced E-Motor Technology Februar 2023 in München.

6.5. Elektrolyseure



- Die Reduzierung des spezifischen Materialbedarfs an Iridium für PEM-Elektrolyseure stellt mit Abstand die wichtigste strategische Aufgabe für den Komplex der Elektrolyseure dar.
- Alkalische Elektrolyseure (AEL) und PEM-Elektrolyseure (PEMEL) sind entscheidend für den mittelfristigen Markthochlauf.
- Hochtemperatur-Elektrolyseure (HTEL) sind erst im Pilotstadium: deren Lieferkette ist kurz- und mittelfristig daher ungewiss.
- AEL enthalten keine kritischen Rohstoffe, für PEM-Elektrolyseure ist in erster Linie Iridium und in nachfolgender Priorität Platin und Titan relevant.
- Iridium ist der sehr kritische Rohstoff für Elektrolyseure: dessen Minenproduktion kann kaum gesteigert werden. Für die Versorgung sind deshalb zukünftig iridiumarme Elektrolyseure und Recycling sehr wichtig.
- Die Platinversorgung kann heute und verstärkt in der Zukunft aus dem Recycling (v. a. Autoabgaskatalysatoren) gespeist werden.
- Für die Versorgung mit Titanmetall über Titanschwamm kann die Zusammenarbeit mit Produktionsländern wie Japan vertieft werden.
- Für Hochtemperatur-Elektrolyseure ist die Versorgung mit Scandium zu beachten; hier ist Diversifizierung der Versorgung aus Ländern wie USA, Kanada, aber auch aus der EU (Finnland, Schweden, Griechenland) möglich.

Die Analyse der für den Hochlauf der unterschiedlichen Technologien der Elektrolyseure zur Produktion von Wasserstoff notwendigen kritischen Rohstoffe (vgl. KAP. 5.5) hat eine klare Priorisierung hinsichtlich Relevanz und zeitlicher Dringlichkeit ergeben. Diese Priorisierung drückt sich in folgender Reihenfolge aus:

- **Iridium:** sehr relevant, da Angebotsmenge nur gering ausgeweitet werden kann,
- **Scandium:** relevant, da nur bislang wenige Anbieter und Angebot muss (kann aber auch) zukünftig deutlich ausweitete werden,
- **Platin:** relevant aufgrund von Nachfragezuwachs, aber große Entspannung durch Recyclingpotenziale (siehe unten),
- **Titan und Yttrium:** nur mäßig relevant, da mengenmäßig großes Angebot und realistische Optionen zur Nachfragedämpfung durch Erhöhung der Materialeffizienz

Iridium

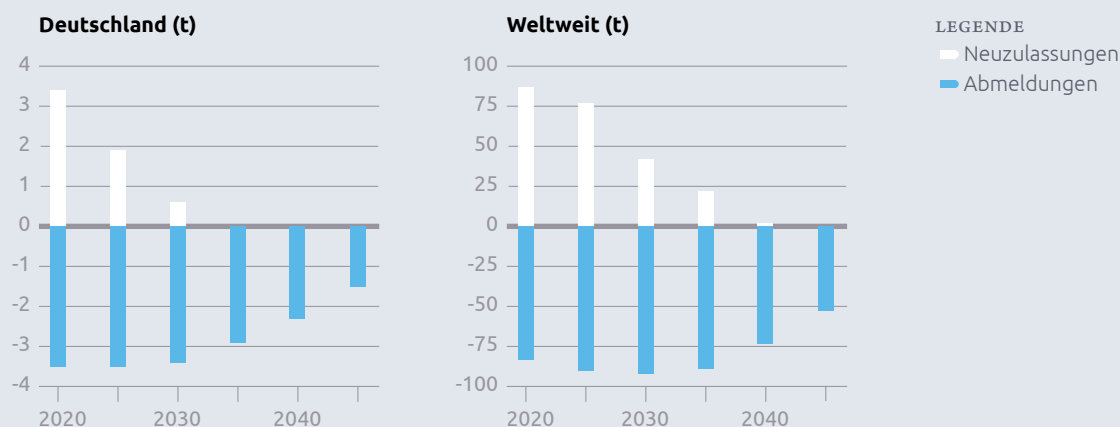
Aus dem Hochlauf der PEM-Elektrolyse nach dem «KNDE2045»-Szenario ergibt sich mit aktuellen Iridium-Beladungen ein Bedarf von bis zu 3,5 Tonnen pro Jahr nur für Deutschland. Dies unterstreicht die Relevanz der Entwicklungsbemühungen in dieser Richtung insbesondere bei Iridium. Das Technologieunternehmen Heraeus berichtet beispielsweise, dass ihre Katalysatoren der «nächsten Generation» bereits mit einem um 75 Prozent reduzierten Iridiumbedarf – 0,1 g/kWel statt aktuell ca. 0,4 g/kWel – auskommen (Heraeus; Walter, Ph., 2022). Der Bedarf an Iridium liegt jedoch kurzfristig auch bei Verfolgen des Pfades einer reduzierten Materialintensität (vgl. ABB. 44) bei ca. 0,5 Tonnen pro Jahr und sinkt bis 2045 auf 0,2 Tonnen pro Jahr, was allein für Deutschland einem Anteil von sechs bzw. 2,5 Prozent an der weltweiten aktuellen Iridiumförderung entspricht.

Da die Angebotsmenge an Iridium aus natürlichen Vorkommen kaum gesteigert werden kann (vgl. KAP. 5.5), bleibt zur Erhöhung der Resilienz neben der Erhöhung der Materialintensität hier nur ein forciertes Recycling als zweite Entlastungsoption. Europäische Unternehmen wie Umicore und Heraeus gewinnen bereits heute Iridium aus unterschiedlichen End-of-Life-Materialien zurück. Das deutsche Unternehmen Heraeus gibt an, bereits heute mehr als zwei Tonnen Iridium jährlich zu recyceln (Heraeus; Walter, Ph., 2022). Ein weiteres Entlastungspotenzial für Iridium ergibt sich aus der zukünftig nachlassenden Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Hier wird Iridium in Zündkerzen verwendet – in einer globalen Größenordnung von rund einer Tonne pro Jahr (JM, 2022, Heraeus; Walter, Ph., 2022). Diese Iridiummenge dürfte zukünftig zur Produktion von PEM-Elektrolyseuren zur Verfügung stehen.

Platin

Die Versorgung der Weltmärkte mit Platin aus der Minenproduktion konzentriert sich zwar zu 74 Prozent auf Südafrika (U.S. Geological Survey, 2023), aber das Recycling von Platin aus diversen Anwendungen wie Schmuck, Elektronik aber vor allem aus verbrauchten Industrie- und Abgaskatalysatoren ist ein technologisch und logistisch schon seit Jahrzehnten sehr effizientes und gut eingespieltes System (Hagelüken, C.; Buchert, M. et al., 2005) und trägt mit Rückgewinnungsraten von weit mehr als 90 Prozent mit rund 50 Prozent im hohen Maße zur globalen Platinversorgung bei (Graedel, T. E. et al., 2011). Die Versorgung von Zukunftstechnologien wie Brennstoffzellen oder PEM-Elektrolyseuren hängt demnach bei weitem nicht nur von der Minenproduktion ab. Durch die Elektrifizierung des Fahrzeugsektors wird zudem zukünftig aus stillgelegten Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ein sehr großes Sekundärplatinpotenzial zur Verfügung stehen, welches nicht zuletzt für den Einsatz in PEM-Elektrolyseuren genutzt werden kann. Die Szenarienergebnisse in Abbildung 54 belegen das hohe Versorgungspotenzial für Platin aus Altkatalysatoren aus dem Fahrzeugbereich.

ABB. 54 **Platin in Abgaskatalysatoren von Verbrenner-Fahrzeugen in Deutschland und weltweit: Neuzulassungen und Abmeldungen pro Jahr**



QUELLE Eigene Modellierung basierend auf dem Szenario «KNDE2045» und dem Net-Zero-Szenario der IEA

Öko-Institut, 2023

TAB. 07 **Titanschwamm: Produktionskapazitäten und Auslastung im Jahr 2021**

Die Produktionsanlagen sind nur zum Teil ausgelastet

HINWEIS Auslastung ergibt sich aus der produzierten Menge pro Kapazität

QUELLE Eigene Darstellung nach (U.S. Geological Survey, 2023)

Land	Anlagenkapazität	Auslastung 2021
China	181.000 t/a	77 %
Japan	68.800 t/a	72 %
Russland	46.500 t/a	58 %
Kasachstan	26.000 t/a	58 %
Ukraine	12.000 t/a	51 %
Saudi-Arabien	15.600 t/a	37 %
Indien	500 t/a	50 %

Öko-Institut, 2023

Die Platinmenge, die in den Abgaskatalysatoren von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor steckt, wurde unter der Annahme abgeschätzt, dass je Fahrzeug etwa vier Gramm Platingruppenmetalle in den Katalysatoren eingesetzt werden, bei einem Platin-Anteil von 28 Prozent (Buchert, M. et al., 2019). Insgesamt ist – in den kommenden Jahren aus der deutschen Flotte mit einem Rücklauf von ca. 3,5 Tonnen pro Jahr zu rechnen ist, wohingegen der Bedarf für neue Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor kurzfristig bei ca. zwei Tonnen pro Jahr liegt und schon 2030 auf 0,6 Tonnen pro Jahr

sinkt. Ab 2035 werden im «KNDE2045»-Szenario keine Verbrenner mehr zugelassen. Dementsprechend sinken zeitversetzt auch die Rücklaufmengen, liegen aber 2035 noch bei drei Tonnen pro Jahr und 2045 noch bei über eine Tonne pro Jahr. Auf globaler Ebene liegt der Rücklauf bis 2035 konstant bei ca. 90 Tonnen pro Jahr. Der Bedarf für die Neuzulassung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sinkt ab 2025 unter den Wert des Rücklaufes an Fahrzeugen, ab 2030 liegt er aufgrund der fortschreitenden Elektrifizierung der globalen Fahrzeugflotte nach diesem Szenario schon um 50 Tonnen pro Jahr unter dem zu erwartenden Rücklauf. Das große Platinpotenzial aus den stillgelegten Fahrzeugen kann aufgrund der hervorragenden Recyclingquoten von über 90 Prozent ganz überwiegend in der Praxis erschlossen werden.

Die Ausführungen und Szenarienergebnisse machen deutlich, dass hinsichtlich der zukünftigen Platinversorgung die Transformation durch den Fahrzeugbereich gewinnt, da aus Sekundärpotenzialen (vor allem Autoabgaskatalysatoren) der zukünftige Platinbedarf für Elektrolyseure um ein Vielfaches gedeckt werden kann. Daher sind bzgl. der Platinversorgung keine besonderen neuen Hebel zur Steigerung der Resilienz der Lieferkette zu identifizieren – es müssen vielmehr die bestehenden professionellen Recyclingstrukturen für Platin und andere Edelmetalle in Europa aber auch weltweit aufrechterhalten werden. Die hohen ökonomischen Erlöse aus dem Platinrecycling sorgen hier für starke Anreize für die Wirtschaftsakteure.

Titan

Wie in Kapitel 5.5 dargestellt, wird der Markthochlauf für PEM-Elektrolyseure zwar die Nachfrage nach Titanschwamm erhöhen. Allerdings sind andere Nachfragesektoren wie die Flugzeugindustrie wesentlich relevanter. Zudem bestehen Produktionskapazitäten für Titanschwamm in einer Reihe von Ländern, die im Jahr 2021 lediglich zwischen 37 Prozent (Saudi-Arabien) und 72 Prozent (Japan) bzw. 77 Prozent (China) ausgelastet waren (vgl. TAB. 07). Es besteht demnach allein durch eine mögliche höhere Auslastung der bestehenden Kapazitäten noch ein großes Potenzial die Angebotsmengen global zu erhöhen. Für Deutschland und Europa bietet es sich vor allem an hier die Zusammenarbeit mit Japan zu intensivieren, welches nach China die größten Produktionskapazitäten aufweist.

Schließlich gibt es auch positive Entwicklungen bzgl. des Recyclings von Titanschrotten in Europa. 2018 wurde beispielsweise in Frankreich ein neues Recyclingwerk für Titanschrotte in Betrieb genommen, welches im Vollbetrieb jährlich bis zu 4.000 Tonnen Titanschrotte verwerten kann (Knight, Ch., 2018).

Scandium und Yttrium

Bei den beiden Seltenen Erden Yttrium und Scandium, die beide für zukünftige Hochtemperaturelektrolyseure eine Rolle spielen könnten, ist bzgl. der Resilienz der Lieferketten der Fokus hauptsächlich auf Scandium zu legen (vgl. KAP. 5.5). Die Szenarienergebnisse in diesem Projekt und die Analyse der Angebotsseite zeigen für den Fall, dass auf Scandium in der HTEL gesetzt wird, für die zukünftige Angebotssicherung deutlich Handlungsbedarf. Dies wird auch durch jüngste Arbeiten der DERA gestützt (DERA, 2022).

Für Scandium sind folgende Hebel zur Erhöhung der Resilienz der Angebotsseite wichtig:

- Erschließung der enormen Potenziale bei der Materialeffizienz der Stacks: hieraus ergibt sich ein hoher F&E-Bedarf zur Reduzierung des spezifischen Scandiumbedarfs,
- Diversifikation der Lieferländer

Bislang dominieren für die Scandiumversorgung China, Russland und die Philippinen (U.S. Geological Survey, 2023). Allerdings finden sich in vielen Ländern der Erde Reserven für Scandium – immer in recht geringen Konzentrationen vergesellschaftet mit anderen Rohstoffen wie Bauxit, Nickel-, Titan- und Zirkoniumerzen (vgl. KAP. 5.5). In jüngster Zeit sind hierzu mehrere Projekte in den USA, Kanada und Australien auf den Weg gebracht worden.

Auch die Versorgung mit Scandium aus europäischen Ländern sollte stärker in den Fokus genommen werden. Aktuell werden hier Projekte aus Griechenland (Rückgewinnung von Scandium aus Rückständen der Bauxitaufbereitung) und Finnland berichtet (U.S. Geological Survey, 2023). Abgeschlossene und laufende EU-Verbundprojekte wie SCALE (DERA, 2022) und (HARARE, 2021) sind in diesem Zusammenhang zu forcieren und zu unterstützen, um einen Einstieg in europäische Beiträge zur Scandiumversorgung sicherzustellen. Eine Quantifizierung der Potenziale für die zukünftige Versorgung Europas mit Scandium kann aufgrund des frühen Stadiums der Vorhaben noch nicht vorgenommen werden.

Senkung Rohstoffintensität

Ein entscheidender Hebel zur Erhöhung der Resilienz ist die Reduktion des spezifischen Materialbedarfes an kritischen Materialien. Abbildung 55 zeigt die deutliche Reduktion der kritischen Elektrolysematerialien in der Größenordnung von 90 Prozent bis 2040, die der Ermittlung des unteren Randes des Bedarfes für den Elektrolysehochlauf im Szenario zugrunde liegt und auf Literaturwerten basiert (Kiemel, S. et al., 2021). Diese Potenziale werden auch durch die Unternehmen bestätigt. Erste Hersteller von PEM-Anoden-Katalysatoren werben mit der höheren Wettbewerbsfähigkeit ihrer Produkte durch deutlich reduzierten Iridiumbedarf von 50 bis 90 Prozent (Heraeus, 2020). Die Realisierung dieses Potenzials ist abhängig von Erfolgen in Forschung und Entwicklung, ist aber auch eine wichtige Voraussetzung für den weiteren Hochlauf der PEMEL-Technologie.

Ansätze zur Reduktion des Materialbedarfes bestehen z.B. durch Kombination des kritischen Materials mit günstigeren Trägermaterialien, indem die kritische Komponente nur auf dessen Oberfläche aufgebracht wird und/oder der Substitution eines Teils der Metalle durch andere. Weitere Ansätze verfolgen die stetige Reduktion der Schichtdicken mittels innovativer automatisierter Prozesse (z. B. Aufdampfen von Nanoschichten) und Vergrößerung der aktiven Oberfläche bei gleichzeitiger Materialreduktion des kritischen Materials.

Alternative Technologien

Kritische Materialien betreffen nur die PEMEL und HTEL. Die etablierte AEL und die in der Entwicklung befindliche AEM sind weitestgehend unabhängig von kritischen Materialien, sodass im Falle von Rohstoffengpässen durch kritische Materialien Ersatztechnologien für die Elektrolyse verfügbar sind.

Produktionsaufbau in Europa

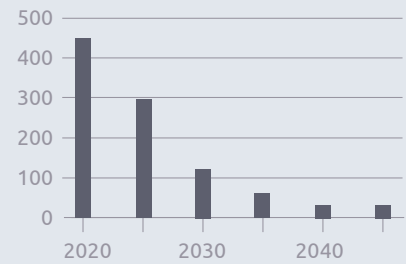
Weltweit wurden bislang erst 1,4 GWel an Elektrolyseure gebaut (IEA, 2023). Für das Szenario «KNDE2045» werden bis 2030 allein für den deutschen Bedarf 26 GWel (davon 10 GWel inländisch) Elektrolysekapazität benötigt (vgl. KAP. 4.4).

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.

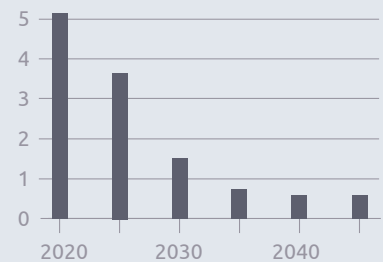
Im Vergleich zur Leistung der gebauten Elektrolyseure lag die Fertigungskapazität zum Bau der Elektrolyseure deutlich höher. Im Jahr 2021 lag die Fertigungskapazität weltweit bei rund acht GWel und hatte sich damit gegenüber dem Jahr 2020 fast verdoppelt. Gegenüber der jährlichen Realisierung von Elektrolyseprojekten in der Größenordnung einiger hundert MW in den letzten Jahren zeigt sich, dass die Fertigungskapazitäten nicht ausgelastet sind.

Die IEA geht, basierend auf Unternehmensankündigungen, davon aus, dass bis zum Jahr 2030 die Fertigungskapazitäten für den Bau der Elektrolyseure auf rund 60 GWel anwachsen könnten. Davon befinden sich 19 GWel – also rund ein Drittel – in Europa (vgl. Abbildung 56).

Iridium

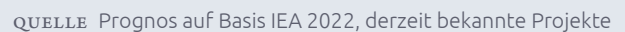


Scandium



Prognos, Öko-Institut, 2023

Das Fertigungsziel der EU von 25 GW_{el} wird den Schätzungen der IEA zufolge um 7 GW_{el} verfehlt.



Prognos, Öko-Institut, 2023

Annahme, dass diese Fertigungskapazitäten ab 2024 mit 90 Prozent Auslastung produzieren, könnten damit global bis zum Jahr 2030 rund 250 GWel an Elektrolyseuren gebaut werden. Nach dem Net-Zero-Szenario der IEA müssten weltweit bis 2030 aber 720 GWel Elektrolyseure, also fast dreimal so viel, gebaut sein (IEA, 2022d). Daraus lässt sich ableiten, dass die globalen Fertigungskapazitäten weiter gesteigert werden müssen.

PEM-Elektrolyseure (PEMEL) in t/a

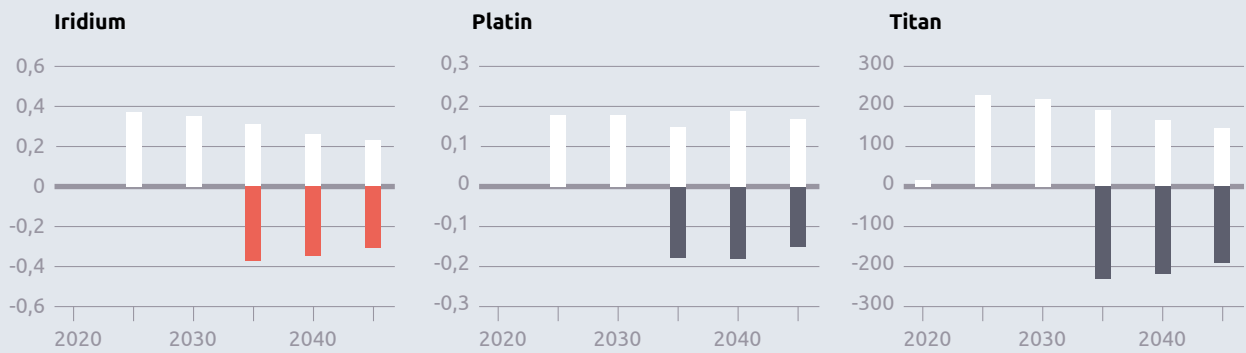
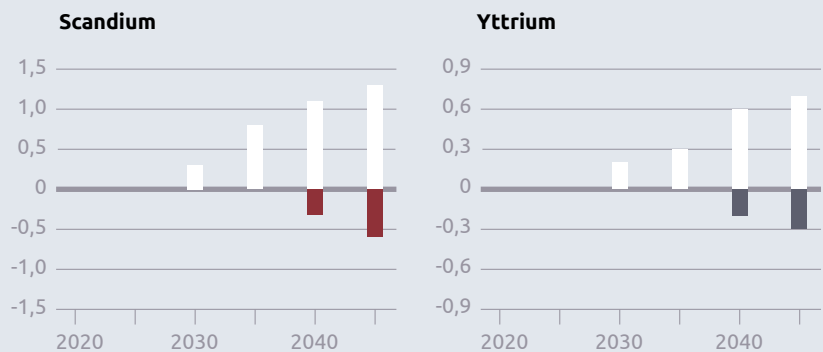


ABB. 57 **Zubau und potenzieller Rücklauf von Metallen (Elektrolyseure) im «KNDE2045»-Szenario**
Rückläufe aus Recycling werden erst ab 2035 relevant.

LEGENDE
 ■ jährlicher Bedarf
 ■ potenzieller Rücklauf (farbige Balken)

Hochtemperatur-Elektrolyseure (HTEL) in g/kW_{el}



ANNAHME Stack-Lebensdauer zehn Jahre. Mengen bei angesetzter kontinuierlicher Reduktion der Materialintensität (siehe Abschnitt Materialintensität) QUELLE Prognos auf Basis (IEA, 2022d), derzeit bekannte Projekte

ABB. 57 Öko-Institut, 2023

Recycling

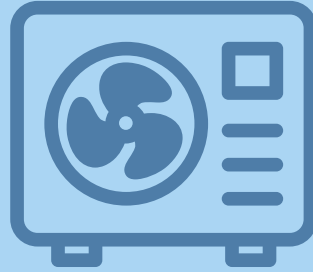
Rückläufe von Metallen am Lebensende der Elektrolyseure beginnen bei Annahme einer Stacklebensdauer von zehn Jahren (konservative Ableitung aus 45.000 Betriebsstunden (Smolinka, T. et al., 2018) und Volllaststunden von 4.500 h/a,) frühestens ab dem Jahr 2035 relevant zu werden (Abbildung 57). Die Mengen liegen bei Platin jedoch weit unter dem Niveau des heutigen Rücklaufes aus Katalysatoren von Verbrennungsmotoren. Allerdings wird für den Zubau neuer Elektrolyseure auch weniger Platin gebraucht (trotz noch steigender Kapazitäten, wegen sinkender Materialintensität), so dass die Mengen bereits im Bereich der für den jährlichen Kapazitätszubau benötigten Mengen liegen. Bei Iridium und Titan liegen die Rücklauf-Werte sogar bereits darüber. Anders verhält es sich mit den für die Hochtemperatur-elektrolyse relevanten Seltenen Erden, da der Hochlauf dieser Technologie erst später startet und somit bis 2045

keine Rücklauf-Mengen zu erwarten sind, die die Mengen für den Zubau ausgleichen könnten.

Das Recycling von Wertmetallen aus Elektrolyseuren ist zurzeit aufgrund der noch relativ neuen Technologie und den bislang sehr geringen installierten Kapazitäten weltweit noch ein absolutes Forschungs- und Entwicklungsfeld. Daher kann aus den Rücklaufmengen noch nicht sicher auf Recyclingpotenziale geschlossen werden. Ein Vergleich mit etablierten und ausgereiften Recyclingverfahren wie bei Autoabgaskatalysatoren verbietet sich daher auf absehbare Sicht.

Ein wesentlicher Aspekt in der kommerziellen Entwicklung der Elektrolyseanlagen ist jedoch, dass die Recyclingfähigkeit bereits mitgedacht wird, um das Potenzial zukünftig möglichst vollständig erschließen zu können. In Deutschland werden die potenziellen Recyclingprozesse für Elektrolyseure derzeit über ein vom BMBF gefördertes umfassendes Verbundprojekt untersucht, welches allerdings noch bis 2025 läuft (DECHEMA; Peuker et al., 2021).

6.6. Wärmepumpen



- Im Vergleich zu anderen Schlüsseltechnologien und deren Komponenten sind die Versorgungsrisiken bei Wärmepumpen deutlich geringer.
- Für den Ausbau der Fertigungskapazitäten ist ein stabiler Inlandsmarkt notwendig – um damit verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen zur Senkung der Emissionen im Gebäudesektor.

TAB. 08 **Heutige Produktionskapazitäten für Wärmepumpen in Europa und Ziele 2030**

Um die Ziele des Net-Zero Industry Act zu erfüllen, müssen die heutigen Fertigungskapazitäten in Europa um 50 Prozent ansteigen.

QUELLE Eigene Darstellung

	Stand 2021	Ziele 2030 nach Net-Zero Industry Act: 85 %
Wärmepumpen	19 GW	31 GW

Prognos, 2023

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 31 GW und einem notwendigen Zuwachs von 50 Prozent im Vergleich zu heute. Die Hersteller erwarten in Europa in Summe und insbesondere in Ländern mit großem Nachholbedarf an klimaneutralen Heizungen, wie Deutschland und Großbritannien, ein deutliches Marktwachstum und weiten entsprechend ihrer Kapazitäten aus.

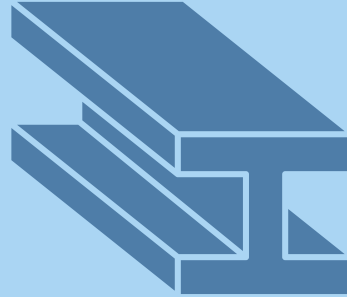
Um diesen Hochlauf und die Investitionen abzusichern, ist es wichtig, dass es verlässliche Rahmenbedingungen für die Minderung der Treibhausgase im Gebäudesektor gibt. Durch die Energiepreiskrise aufgrund des Russischen Angriffskriegs und die daraus resultierenden Knappheitspreise beim Erdgas führten in den vergangenen Monaten zu einem deutlichen Nachfrageanstieg nach Wärmepumpen und damit zu deutlichen Investitionssignalen für die Wärmepumpenbranche. Für die weitere Perspektive bis 2030 ist vor allem das Gebäudeenergiegesetz entscheidend.

Auch sollte das Thema Fachkräftemangel im Heizungsbereich flankierend angegangen werden. Zudem sollten durch eine Weiterführung der Forschung und Entwicklung dazu beigetragen werden, den technologischen Vorsprung der heimischen Hersteller möglichst zu halten.

Alternative Technologien, Diversifizierung

Hinsichtlich der Rohstoffe und der Komponenten ist der Einsatz von Permanentmagneten in den Motoren der Kompressoren und Umwälzpumpen als kritisch einzustufen. Es liegen aber derzeit keine Daten vor, welcher Anteil der Wärmepumpen Permanentmagnete einsetzt. Hierzu ist weiterer Forschungsbedarf notwendig. Zudem ist zu untersuchen, welche alternativen Antriebskonzepte geeignet sind. Zudem ist der Aufbau von Fertigungskapazitäten in Europa (Fertigung von Permanentmagneten) und eine Diversifizierung der Bezugsländern notwendig. Details hierzu finden sich in Kapitel 6.4.

6.7. Stahl



- Aufgrund der absehbaren Engpässe beim Bau der DRI-Anlagen ist Schnelligkeit entscheidend, damit die Stahlproduzenten rechtzeitig die Engineering-Kapazitäten im Inland sichern. Bisherige Investitionsentscheidungen der Unternehmen basierten auf der Zusage von staatlicher Förderung.
- Aufbau von Lieferbeziehungen zum Import von DRI-Eisenschwamm in Form von HBI (hot briquetted iron) und Stärkung von Sekundärstahl (Recycling) schaffen zusätzliche Versorgungssicherheit.

Produktionsaufbau in Deutschland und Europa

Um die 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.

Voraussetzung im Hinblick auf die Infrastruktur sind in erster Linie das Wasserstoffnetz sowie – fast noch wichtiger – leistungsfähige Anschlüsse an das Höchstspannungsnetz. An einer Elektrifizierung der Schmelzaggregate führt nämlich aus heutiger Sicht kein Weg vorbei – und sie bildet die Voraussetzung dafür, dass die Wertschöpfungsstufe der Stahlerzeugung im Land gehalten werden kann.

Die Investitionen der deutschen Unternehmen wurden bisher durchweg unter dem Vorbehalt einer staatlichen Förderung in Milliardenhöhe beschlossen, bisher liegen jedoch nur für die ersten Anlagen in Salzgitter und Duisburg Förderzusagen des Bundes vor. Die Projekte in Schweden werden dagegen durch die Unternehmen selbst finanziert⁴⁹. Wie auch in anderen Bereichen dürfte der Inflation Reduction Act (IRA) einen gewissen Sog für Projekte nach Nordamerika entfalten. Dort kann zudem an eine Kultur angeknüpft werden, in der die Marktteure bereits Erfahrung haben in der Interaktion zwischen Erz-, DRI- und Schrottmärkten. Kommen die geförderten Elektrolyseur-Projekte hinzu, so entstehen dort sehr attraktive Standortbedingungen für Grünstahl-Projekte.

⁴⁹ Im Falle des Privatunternehmens H2GreenSteel ist die öffentliche Hand zwar durch die Europäische Investitionsbank (EIB) als Fremdkapitalgeber beteiligt, überwiegend wird das Projekt aber durch seine Kunden finanziert, die Anteile am Unternehmen halten. Maßgebliche Kapitalgeber sind dabei deutsche Unternehmen aus dem Automobilkontext wie Mercedes-Benz, Schaeffler und Bilstein, daneben Miele und die bereits genannte SMS-Gruppe, die auch den Bau der Anlagen in Boden als Generalunternehmerin verantwortet.

Die Sicherstellung des Aufbaus von DRI-Anlagen in Deutschland hätte auch den Vorteil, dass durch große Ankerkunden im Stahlbereich eine gewisse Verlässlichkeit für die Abnahme großer Mengen an Wasserstoff besteht, was als Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft (Startnetz) eine wichtige Voraussetzung ist. Als Rückfalloption, in Zeiten knapper Wasserstoffverfügbarkeit, haben deutsche Unternehmen (anders als die nordschwedischen Konkurrenten) mittelfristig noch die Option Erdgas.

Diversifizierung von Bezugsländern

Deutschland sollte aber auch ein Interesse an einer sicheren DRI-Versorgung auch durch HBI-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, z. B. mit der schwedischen LKAB, die derzeit den Bau einer DRI-Anlage an der Mine in Gällivare vorbereitet, die bis 2026 in Betrieb gehen soll. 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.

Recycling

Eine stärkere Versorgung mit inländischem Sekundärmaterial bildet freilich auch im Stahlbereich die beste Versicherung gegen Importabhängigkeiten. Hierfür müssen die Schrotte jedoch deutlich besser sortiert werden, v. a. im Automobilbereich. Im Hinblick auf eine mögliche Kannibalisierung von DRI-Produktion und drohendem Carbon Leakage sollten dagegen (Netto-) Schrott-Importe einem intensiven Monitoring unterzogen werden. Bei fortgesetztem Netto-Export von stahlhaltigen Produkten wie z. B. Automobilen könnten jedoch auch diese im Sinne einer Circular Economy, die Downcycling vermeidet, ihre Berechtigung haben.

6.8. Zusammenfassung

Grundsätzlich konnten im Rahmen der Studie fünf unterschiedliche Maßnahmenbereiche zur Steigerung der Resilienz relevanter Lieferkettten für die Transformation zur Klimaneutralität identifiziert werden:

- Produktionsaufbau in Europa
- Diversifizierung von Bezugsländern
- Recycling
- Senkung der Rohstoffintensität
- Alternative Technologien

Für alle priorisierten Schlüsseltechnologien konnten aus diesen 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 marktdominierende 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.

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 dem Inflation Reduction Act (IRA) 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 Lieferkette 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 Pfeiler zur Steigerung der Resilienz. 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) und 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 (Nickel, Seltene Erden). In der Tabelle 9 sind beispielhaft potenzielle 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. Insofern ist eine Weiterentwicklung von Partnerschaften in Richtung transformationsorientierter Partnerschaften «auf Augenhöhe» zu begrüßen.

TAB. 09 **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

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 Recyclingpotenziale zu erschließen.

Auch bei Permanentmagneten (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 Europäischen Kommission 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.

Senkung 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 NMC8111-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.

7. Politische Empfehlungen



7. 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 Konformität mit WTO-Regeln relevant. Das Kriterium könnte unterschiedlich genutzt werden, z.B. durch Boni bei Ausschreibungen oder Einspeisevergütungen (in Anlehnung an das Staffelfmodell 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 Verstärkung 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 Magnetfabrik 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 beispielsweise 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.

Technologie- und Rohstoffpartnerschaften aufbauen 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.

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, spä-

ter 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 können, müssen die Instrumente für die Erschließung der Potenziale in den nächsten drei Jahren auf den Weg gebracht werden.

Anhang



Photovoltaik

TAB. 10 Rohstoffintensität von Photovoltaik-Anlagen in kg/MW

Komponente	Rohstoff bzw. Teilkomponente	c-Si	CIGS	CdTe	a-Si	GaAs
		Kristallines Silizium (Wafer-basiert)	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid	Cadmium-Tellur	Amorphes Silizium	Gallium-Arsenid
Zellen	Silizium	3.700 / 2.000 / 1.250*	–	–	146,7 / 130 / 115*	–
Zellen	Gallium	–	6,6/4,5/3*	–	–	22,7
Zellen	Germanium	–	–	–	45,3/32/23*	–
Silberpaste	Silber	18,5/11/6,5*	–	–	–	–
Verdrahtung/ Verkabelung	Kupfer	4.600	4.600	4.600	4.600	4.600
Glas		46.400	46.400	46.400	46.400	46.400
Trägerkonstruktion	Stahl	67.900	67.900	67.900	67.900	67.900
Trägerkonstruktion	Aluminium	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500

* 1. Wert: 2020, 2. Wert: 2030, 3. Wert: 2045

ANMERKUNG Die Rohstoffintensitäten aus (Carrara, Alves Dias, Plazzotta, & Pavel, 2020) wurden im Zuge einer konservativen Abschätzung der Bedarfe dem High Demand Scenario entnommen. Davon abweichend wurden für den Siliziumbedarf Wafer-basierter Zellen, aufgrund eines vergleichsweise starken Rückgangs der Rohstoffintensität in den letzten Jahren, die Werte aus dem Low Demand Scenario verwendet. Es besteht die berechnete Annahme, dass es, aufgrund technologischer Fortschritte, bei einem starken zukünftigen Ausbau der Photovoltaik zu einem weiteren, deutlichen Rückgang der Rohstoffintensität kommen wird. Im Medium Demand Scenario liegt der spezifische Bedarf für Silizium im Jahr 2050 bei 2.000 kg/MW und ist damit doppelt so hoch wie im Low Demand Scenario.

QUELLE Eigene Darstellung nach (Carrara, Alves Dias, Plazzotta, & Pavel, 2020; Jean, Brown, Jaffe, Buonassisi, & Bulović, 2015).

Prognos, 2023

Lithium-Ionen-Batterien

In der nachfolgenden Abbildung 58 ist die Entwicklung der Bestandsentwicklung der Elektrofahrzeuge für das Szenario «KNDE2045» differenziert nach den Fahrzeugtypen Pkw vollelektrisch (BEV), Pkw Plug-in Hybrid (PHEV), Pkw Hybrid (HEV), leichte Nutzfahrzeuge vollelektrisch (LNF BEV) und schwere Nutzfahrzeuge vollelektrisch (SNF BEV) im Detail in den Fünfjahresschritten ab 2020 bis 2045 abgebildet. Die Pkw ohne Traktionsbatterie, die für die Gesamtzahl der Pkw bis zum Jahr 2045 fehlen, sind in dieser Darstellung vernachlässigt. Der steile Hochlauf vor allem der batterie-elektrischen Fahrzeuge (BEV) zeigt sich in der Bestandentwicklung nicht zuletzt im mit-

telfristigen Zeithorizont zwischen 2025 und 2035. Für die Berechnung der Bedarfe an Lithium-Ionen-Batterien erfolgte eine detaillierte Betrachtung der Größenklassen innerhalb der Fahrzeugsegmente. Eine Übersicht über die Zuordnung der Segmente zu den Größenklassen bzw. der Einteilung nach dem zulässigen Gesamtgewicht bietet Tabelle 12. Zudem sind die Annahmen zur durchschnittlichen Batteriekapazität¹ je Größenklasse aufgeführt. Für Pkw bilden die Batteriekapazitäten jeweils den Marktdurchschnitt heute verfügbarer Modelle. Für schwere Nutzfahrzeuge sind erst

¹ In dieser Arbeit wird der Begriff «Batteriekapazität» (Einheit kWh) für den Energiegehalt der Batterien verwendet, da er sich umgangssprachlich in vielen Publikationen durchgesetzt hat.

Windkraft

TAB. 11 **Marktanteile von Windkraftanlagen nach Technologie und Rohstoffintensität (Seltene Erden):**

Windkraftanlagen mit Permanentmagnet und ohne Getriebe haben den höchsten Einsatz von kritischen Seltenen Erden. Sie machen heute rund 75 Prozent der neu gebauten Offshore-Anlagen aus.

Technologie	Marktanteil	Permanentmagnete	Getriebeeinsatz	Rohstoffintensität	Seltene Erden [t/GW]
GB-PMSG Permanentmagnet-Synchro-Generator mit Getriebe	5 Prozent der Onshore-Anlagen und 20 Prozent der Offshore-Anlagen	ja	ja	hoch	Neodym: 51 Praseodym: 4 Dysprosium: 6 Terbium: 1
DD-PMSG Permanentmagnet-Synchro-Generator mit Direktantrieb	15-20 Prozent der Onshore-Anlagen und 75-80 Prozent der Offshore-Anlagen	ja	nein	sehr hoch	Neodym: 180 Praseodym: 35 Dysprosium: 17 Terbium: 7
GB-DFIG Doppelt gespeister Synchrogenerator mit Getriebe	70-75 Prozent der Onshore-Anlagen und bis 5 Prozent der Offshore-Anlagen	nein	ja	sehr niedrig	Neodym: 12 Praseodym: 0 Dysprosium: 2 Terbium: 0
DD-EESG fremderregter Synchrogenerator mit Direktantrieb	5 Prozent der Onshore-Anlagen	nein	nein	niedrig	Neodym: 28 Praseodym: 9 Dysprosium: 6 Terbium: 1

QUELLE Eigene Darstellung nach (Carrara, Alves Dias, Plazzotta, & Pavel, 2020; IEA, 2021a).

Prognos, 2023

wenige Modelle verfügbar und eine weitere Steigerung der Reichweite ist wahrscheinlich. Die Batteriekapazitäten orientieren sich an dem für 2030 angenommenen Energieverbrauch und berücksichtigen eine Restladung von 15 Prozent. Die angegebene Spannweite zeigt den Bereich der vier in der Modellierung berücksichtigten Fahrzeugkonfigurationen für schwere Nutzfahrzeuge (Lkw > 3,5t) mit Reichweiten von 200 km, 400 km und 600 km auf.

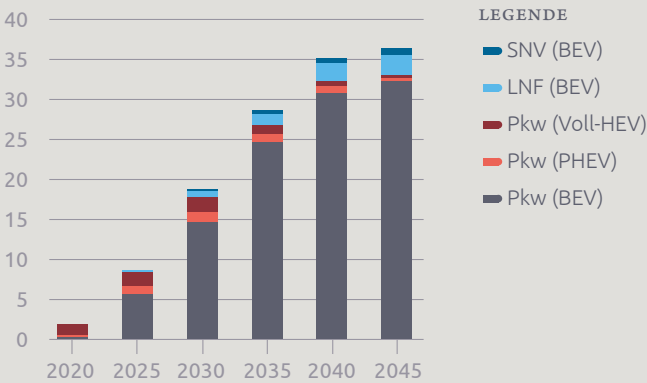
Die Wahl des Kathodenmaterials hat entscheidenden Einfluss auf die elektrochemischen Eigenschaften der Batterie, weshalb die Art des Kathodenmaterials dazu dient, zwischen verschiedenen Li-Ionen Batterien zu unterscheiden. Darüber hinaus beeinflusst die Wahl des Kathodenmaterials die kritischen Rohstoffe, die für

die Batterie benötigt werden.² Die Mengen pro Pkw, abhängig von Kathodenmaterial, sind in Tabelle 12 dargestellt. Sie entstammen aus den gemachten Annahmen und Berechnungen für diese Studie.

² Als Anodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien hat sich Graphit als Standard etabliert, wobei es einen kleinen Anteil an weiteren Materialien gibt (Lithiumtitanoxid, LTO, andere Kohlenstoffbasierte Anoden, Graphitanoden mit einem Anteil an Silizium). Für den Fokus dieser Studie sind diese anderen Anodenmaterialien weder qualitativ noch quantitativ von Relevanz und werden hier daher nicht weiter betrachtet.

ABB. 58 **Bestand an elektrischen Fahrzeugen in Millionen Stück**
Besonders in der Zeit vor 2035 nimmt der Bestand an Elektrofahrzeugen in dem Szenario «KNDE2045» sehr stark zu.

ABKÜRZUNGEN SNF: Schwere Nutzfahrzeuge, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge, EV: Electric vehicle, HEV: Hybrid electric vehicle, BEV: battery electric vehicle und PHEV: Plug-in hybrid electric vehicle, Voll-HEV: Vollhybrid
QUELLE Eigene Modellierung basierend auf dem Szenario «KNDE2045»



Öko-Institut 2023

TAB. 12 **Definition der modellierten Größenklassen und Annahme der durchschnittlichen Batteriekapazität in kWh je Größenklasse**
Die Größenklasse der großen Pkw beinhaltet sehr viele Segmente und hat daher eine große Bandbreite an Batteriegrößen und ist daher auch von der Zahl der Fahrzeuge signifikant.

Größenklassen	Pkw klein	Pkw mittel	Pkw groß	LNF	SNF			
Segmente	Mini, Kleinwagen	Kompaktklasse, Mini-Vans	Mittel-, obere Mittelklasse, Sportwagen, SUVs, etc.		Lkw von 3,5 bis 7,49 t	Lkw von 7,5 bis 11,99 t	Lkw ab 12 t	Last- und Sattelzüge
Batteriekapazität BEV	40 kWh	70 kWh	80 kWh	80 kWh				
Batteriekapazität PHEV	15 kWh	15 kWh	15 kWh					
Batteriekapazität HEV	2 kWh	2 kWh	2 kWh					
Batteriekapazität BEV mit 200 km, 400 km und 600 km Reichweite					130-380 kWh	210-630 kWh	290-860 kWh	430-1.300 kWh

QUELLE Eigene Annahmen basierend auf der Zulassungsstatistik des KBA und Fahrzeugdaten von u.a. ADAC

Öko-Institut, 2023

TAB. 13 **Materialintensitäten kritischer und sonstiger Rohstoffe von Lithium-Ionen-Batterien unterschiedlicher Zellchemie für Pkw Mittel**

Anders als für die anderen essenziellen Rohstoffe ist die Lithiummenge abhängig von der Batteriegröße, aber relativ unabhängig von der Batteriechemie.

Zellchemie		LFP	NMC 111	NMC 622	NMC 811	NCA	LMO
Gesamtmasse	kg / BEV	516	423	403	383	392	508
Batteriekapazität / Energie	kWh	70	70	70	70	70	70
Antriebsleistung	kW	125	125	125	125	125	125
Spezifische Energie	Wh/kg	135,6	165,3	173,7	182,8	178,6	137,9
Lithium	kg / BEV	6,2	8,2	7,3	6,5	7,0	6,7
Nickel	kg / BEV		22,5	36,2	43,0	46,2	
Kobalt	kg / BEV		22,6	12,1	5,4	8,7	
Mangan	kg / BEV		21,0	11,3	5,0		88,8
Graphit	kg / BEV	67,0	60,5	60,8	60,8	61,0	56,4
Kupfer	kg / BEV	49,1	32,8	30,2	27,7	28,5	47,8

QUELLE Eigene Berechnung mit dem BatPaC Modell des Argonne National Lab

Öko-Institut, 2023

TAB. 14 **Annahme des Anteils pro Kathodenmaterial für die Fahrzeugtypen der schweren Nutzfahrzeuge**

Da bei großen Lkw die Energiedichte entscheidender wird, wurde von einem geringeren LFP-Anteil im Gegenzug zur nickelreichen NMC-Batteriechemie ausgegangen.

Fahrzeugtyp	LFP	NMC 622	NMC 811
Lkw – von 3,5 bis 7,49 t	100 %	0 Prozent	0 Prozent
Lkw – von 7,5 bis 11,99 t	80 %	20 %	0 Prozent
Lkw – ab 12 t	70 %	20 %	10 %
Lkw – Last- und Sattelzüge	50 %	30 %	20 %

QUELLE Eigene Annahmen, basierend auf Expert*inneninterviews

Öko-Institut, 2023

TAB. 15 **Bestehende Kapazitäten und Ziele/Prognosen für die Lieferkette der Lithium-Ionen-Batterien in der EU***

Aufgeführt sind Anlagen, die schon stehen, und andere, die erst noch realisiert werden müssen. Dabei sind bestimmte Ankündigungen noch mit sehr großer Unsicherheit behaftet, während andere noch dazukommen werden.

Bergbau

Rohstoff	Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
Lithium	Deutschland	Vulcan Energie Ressourcen	4 kt/a Li in 2024, >11,5 kt/a in 2025 (Schaal, S., 2022)	1.120 kt Reserven
	Deutschland	Zinnwald Lithium	3,5 kt/a Li ohne Jahresangabe (Zinnwald Lithium, 2023)	
	Österreich	European Lithium	3 kt/a ab 2025 (European Lithium, 2020)**	Laufzeit: über 10 Jahre; auch Aufbereitung zu LiOH
	Finnland	Sibanye-Stillwater/Keliber Oy	4 kt/a ab 2025 (Sibanye-Stillwater, 2023a, Randall, C., 2022)	Laufzeit: mindestens 16 Jahre; Anlage im Bau (Sibanye-Stillwater, 2023b). Auch Aufbereitung zu LiOH
	Frankreich	eramet	3.8 kt/a	In Planung, Pilot abgeschlossen (eramet, 2023)
	Frankreich	Imerys	9.9 kt/a ab 2028	In Planung (IMERYS, 2022)
	Portugal	Savannah Resources		In Planung, keine Kapazität benannt (savannah resources, 2023)
	Spanien	Infinity Lithium	5,7 kt/a (Stockhead, 2021)**	In Planung; Laufzeit: 26 Jahre
	Schweden, Finnland	United Lithium		In Erforschung (United Lithium, 2021)
	Tschechien	European Metals	8,5 kt/a (European Metals, 2022)	In Planung; Laufzeit: 25 Jahre
Kupfer	Schweden, Finnland	Boliden	109 kt im Jahr 2022 (Boliden, 2023a)	
	Finnland	Eurobattery Minerals	0,86 kt/a (AFRY, 2023) ohne Jahresangabe	
	Polen	KGHM Polska Miedź S.A	392,5 kt im Jahr 2022 (KGHM, 2023)	Wird bereits abgebaut
Nickel	Finnland	Eurobattery Minerals	0,9 kt/a (AFRY, 2023) ohne Jahresangabe	
	Finnland	Boliden	25-35 kt/a (Boliden, 2023b)	Wird bereits abgebaut
Natürlicher Graphit	Schweden	Talga Resources	Material für 19,5 kt/a Anoden	Umweltgenehmigung erteilt (Mining Technology, 2023b)
Kobalt	Finnland	Eurobattery Minerals	0,26 kt/a (AFRY, 2023) ohne Jahresangabe	

* Die Tabelle erhebt trotz intensiver Recherchen nicht den Anspruch auf Vollständigkeit – gerade in dieser Lieferkette sind in jüngster Zeit ständig aktuelle Meldungen zu verzeichnen.

** Berechnet aus LiOH-Mengen

Weiterverarbeitung

Rohstoff	Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
Lithium	Deutschland	AMG Lithium	Ab 2024 >5 kt/a Li, Ausbau auf ca. 29 kt/a geplant (IWR, 2023)	Anlage im Bau
	Deutschland	Rock Tech Lithium	7 kt ab 2025 (cleanthinking.de, 2023)	
	Deutschland	Livista Energy Europe	Bis zu 8,5 kt ab 2026	
Kobalt	Finnland	Umicore	16 kt/a	Erweiterung auf 21 kt/a geplant ab 2025 (Coastline, 2023)
Kupfer	Schweden	Boliden	350 kt im Jahr 2022 (Boliden, 2023a)	
	Polen	KGHM Polska Miedź S.A	586 kt im Jahr 2022 (KGHM, 2023)	Davon 381,5 kt aus eigenen Minen
Nickel	Schweden	Boliden	25-35 kt im Jahr 2022 (Boliden, 2023b)	
	Finnland	Terrafame		Produziert schon, keine Angaben der Mengen (Terrafame, 2023)
Kobalt	Finnland	Terrafame		Produziert schon, keine Angaben der Mengen (Terrafame, 2023)

Komponenten

Rohstoff	Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
Anodenmaterial	Schweden	Putailai	50 kt/a	Synthetischer Graphit, noch nicht im Bau, kein Datum genannt (FT, 2023)
	Schweden	Talga Ressources	19,5 kt/a	Bau ab 2. H 2023 geplant (Mining Technology, 2023b)
	Schweden	Leading Edge Materials	7,4 kt/a (Leading Edge Materials, 2021)	Bisher nur ökonomische Analyse, Abbau und Weiterverarbeitung über 15 Jahre, natürlicher Graphit;
Kathodenmaterial	Polen	Umicore	Material für 20 GWh/a 2023, 40 GWh 2024 und 200 GWh/a 2030	Produziert schon
	Finnland	Umicore	20 kt/a	Nur Vorprodukte, Erweiterung auf 104 kt/a geplant ab 2025 (Coastline, 2023)
	Finnland/Deutschland	BASF (Zeit, 2023)	Material für ca. 20 GWh/a	Start in 2023
	Frankreich	XTC New Energy Materials		Geplant ab 2026 (Werwitzke, C., 2023b)

QUELLE Eigene Darstellung mit verschiedenen Quellen

TAB. 16 **Bestehende Kapazitäten und Ziele/Prognosen für Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Zellen in der EU bis 2030**

Die Zahl der angekündigten Produktionskapazitäten und ihre Kapazität übersteigt den prognostizierten Bedarf der EU bei weitem. Viele sind jedoch mit hoher Unsicherheit bzgl. Realisierung und Zeitplan behaftet.

Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
Deutschland	Cellforce	0,1 GWh/a ab 2024, später >1 GWh (cellforce, 2022)	
	Northvolt	Bis zu 60 GWh/a ab 2026	
	Leclanché	0,5 GWh/a, geplanter Ausbau auf 1 GWh/a bis maximal 4 GWh/a	Produziert schon
	SVOLT	16 GWh/a	Geplante Kapazität ab 2025
	SVOLT	6 GWh/a bis maximal 24 GWh/a	Geplante Kapazität ab 2025
	Varta	Bis zu 2 GWh/a ab 2026	
	acc	13,4 GWh/a bis maximal 40 GWh/a ab 2025	
	CATL	8 GWh/a, geplanter Ausbau auf 14 GWh/a, bis zu 100 GWh/a ab 2025	Produziert schon
	Tesla	Bis zu 200 GWh/a	Geplanter Beginn vor 2030
	Gotion	3,5 GWh/a ab 2023, bis maximal 18 GWh/a	
	PowerCo/VW	20 GWh/a ab 2025 bis maximal 40 GWh/a	
	QuantumScape	Bis maximal 21 GWh/a	Geplanter Beginn unklar
	Liacon	0,5 GWh/a	Produziert schon
	UniverCell	1,5 GWh/a	Produziert schon
Polen	LG Chem	70 GWh/a, geplanter Ausbau auf 90 GWh/a bis maximal 115 GWh/a	Produziert schon
Slowakei	InoBat	0,045 GWh/a, geplanter Ausbau auf 4 GWh/a bis maximal 10 GWh/a ab 2026	
Ungarn	Samsung	40 GWh/a	Produziert schon
	SK innovation	18 GWh/a	Produziert schon
	SK innovation	30 GWh/a ab 2024	
	CATL	Bis zu 100 GWh/a	Geplanter Beginn unklar
	EVE Energy	Bis zu 28 GWh/a	Geplanter Beginn unklar
Tschechien	MES	0,2 GWh/a, geplanter Ausbau auf 1,2 GWh/a bis maximal 15 GWh/a	Produziert schon
Italien	acc	Bis zu 40 GWh/a ab 2026	
	ITALVOLT	Bis zu 45 GWh/a ab 2025	
	FAAM	0,35 GWh/a, geplanter Ausbau auf 8 GWh/a bis maximal 8,3 GWh/a	Produziert schon
Spanien	PowerCo/VW	40 GWh/a ab 2026 bis maximal 60 GWh/a	
	Envision AESC	10 GWh/a bis maximal 30 GWh/a ab 2025	
	Phi4tech	0,3 GWh/a, geplanter Ausbau auf 2 GWh/a bis maximal 10 GWh/a	Produziert schon

Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
Frankreich	acc	13 GWh/a ab 2024 bis maximal 40 GWh/a ab 2030 (Schaal, S., 2023b)	
	Envision AESC	9 GWh/a bis maximal 30 GWh/a ab 2027	
	Blue Solutions/ Bolloré	0,5 GWh/a, geplanter Ausbau auf 1 GWh/a	Produziert schon heute, Zeitpunkt des Ausbaus unbekannt
	Verkor	Bis zu 50 GWh/a ab 2025	
	ProLogium	Bis zu 48 GWh/a ab 2026	
Schweden	Northvolt	16 GWh/a, geplanter Ausbau auf 60 GWh/a	Produziert schon
	Northvolt	Bis zu 50 GWh/a ab 2025	
	Northvolt	0,35 GWh/a	Produziert schon
Schweden	novo	Bis zu 50 GWh/a ab 2025	
Portugal	CALB	15 GWh/a bis maximal 45 GWh/a ab 2025	
	Eurocell	Bis zu 6 GWh/a ab 2025	Produktionsstandort noch unbekannt
	PowerCo/VW	Bis zu 140 GWh/a	Produktionsstandort noch unbekannt, Zeit des Ausbaus unbekannt
	InoBat	Bis zu 32 GWh/a ab 2025	Produktionsstandort noch unbekannt
	Eurocell	Bis zu 6 GWh/a ab 2025	Produktionsstandort noch unbekannt

QUELLE Quelle: Eigene Darstellung mit verschiedenen Quellen, vor allem (IPCEI Batteries, 2023)

ÖKO-INSTITUT 2023

Permanentmagnete

Der Rohstoffbedarf für Elektromotoren leitet sich analog zu den Antriebsbatterien aus einer Bilanzierung von Größenklassen der Fahrzeuge ab. Die Aufteilung der Größenklassen und die angenommene Motorleistung je Größenklasse sind in Tabelle 17 aufgeführt. Die angenommenen Werte orientieren sich an aktuell verfügbaren Fahrzeugmodellen. Für «Pkw groß» ist die Bandbreite der Motorleistungen aufgrund der Vielzahl von Fahrzeugtypen in dieser Größenklasse (u.a. SUVs, Sportwagen) und in Folge der unterschiedlichen Motorisierung ähnlicher Fahrzeugtypen am größten. Unter der Annahme einer wachsenden Nachfrage nach Mittelklassemodellen in einem Massenmarkt an Elektrofahrzeugen, sind jeweils herausstechend hohe Motorleistungen einzelner Fahrzeugmodelle nicht in der Mittelwertbildung berücksichtigt worden. Im Vergleich zu den in dieser Studie zugrunde gelegten Werten lag

die durchschnittliche Motorleistung der Neuzulassungen im Jahr 2022 bei rund 145 kW für Pkw «mittel» und 240 kW für «Pkw groß». Dies ginge, insbesondere bei einer Fortschreibung dieser Werte, mit einem entsprechend höherem Rohstoffbedarf einher, dem jedoch Potenziale zur Materialeffizienz in der Motorentwicklung gegenüberstehen. Eine Quantifizierung dieser gegenläufigen Effekte war im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Die Leistungen wurden daher wie in Tabelle 17 gezeigt angesetzt und über die Jahre konstant gehalten.

TAB. 17 **Definition der modellierten Größenklassen und Annahme der durchschnittlichen Leistungen (in kW) der Antriebsmotoren je Größenklasse**

In den nächsten Jahren sinkt der Anteil der E-Motoren für Pkw mit Permanentmagnet Expertenaussagen nach von 95 % auf 80 %.

Größenklassen	Pkw klein	Pkw mittel	Pkw groß	LNF	SNF			
Segmente	Mini, Kleinwagen	Kompaktklasse, Mini-Vans	Mittel- und obere Mittelklasse, Sportwagen, SUVs, etc		Lkw von 3,5 bis 7,49 t	Lkw von 7,5 bis 11,99 t	Lkw ab 12 t	Last- und Sattelzüge
Motorleistung, gesamt (Anzahl Motoren) BEV	88 kW (1)	125 kW (2)	180 kW (2)	100 kW (2)	120 kW (2)	170 kW (2)	325 kW (2)	375 kW (2)
Motorleistung, gesamt (Anzahl Motoren) PHEV	80 kW (1)	80 kW (1)	80 kW (1)					
Motorleistung, gesamt (Anzahl Motoren) HEV	80 kW (1)	80 kW (1)	80 kW (1)					
Anteil Permanenterregte Synchronmotoren BEV	Aktuell 95 Prozent, sinkt linear auf 80 Prozent im Jahr 2045 in allen Größenklassen			Annahme: konstant 100 Prozent				
Anteil Permanenterregte Synchronmotoren PHEV, HEV	Annahme: konstant 100 Prozent in allen Größenklassen							

QUELLE Eigene Annahmen, basierend auf verschiedenen Quellen und Expert*innenaussagen

Öko-Institut, 2023

Im Hinblick auf den Permanentmagnetbedarf wurde nach (Nordelöf et al., 2017) eine grob lineare Abhängigkeit von der Leistung angenommen. Die Leistungsdichte liegt dabei bei gut 2 kW/kg_{Motorgewicht}, was bei ca. drei Prozent Magnetanteil einer Permanentmagnet-Menge von ca. 12-13 g/kW entspricht. Basierend auf den Motorleistungen in obiger Tabelle ergeben sich daraus zwischen 1 und 2,2 kg-NdFeB-Magnet je Pkw³, ca. 1,6 kg je LNF sowie zwischen 1,8 und 4,7 kg je SNF (Lkw).

3 Zahlen liegen im Bereich anderer Publikationen vgl. (ERMA; Gauß et al., 2021, REIA, 2022), Furgeri (2021): Design for motors: the way forward. REIA Webinar on Rare Earth Elements in Sustainable Circular Economy.

TAB. 18 **Ziele/Projekte für Lieferkette der Permanentmagnete in der EU/UK/Norwegen**

Obwohl es bislang kaum (angekündigte) Produktionen gibt, ist die Wertschöpfungskette der Permanentmagnete kaum in der EU etabliert.

Bergbau

Rohstoff	Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
LSE	Schweden	LKAB (High North News, 2022)	4 kt/a Li in 2024, >11,5 kt/a in 2025 (Schaal, S., 2022)	

Weiterverarbeitung

Material	Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
SE-Oxide	Estland (euronews.next, 2023)	Neo Performance Materials/Silmet (Turovski, M., 2022)	Nicht bekannt	Bis 2026
	Frankreich (SOLVAY, 2022), (FT, 2023)	Solvay	Für Magnetkapazität für Millionen von EVs (Kinch, D., 2023)	Details wie Zeitpläne etc. noch nicht veröffentlicht
	UK	Pensana (The Chemical Engineer, 2022)	5.000 t/a Nd-/Pr-Oxide	Ab 2024
	Norwegen	REEttec (High North News, 2022)	Nicht bekannt	2024/2026
SE-Metalle	Estland	Neo Performance Materials/Silmet (Turovski, M., 2022)	Nicht bekannt	Bis 2026
	UK	Pensana (The Chemical Engineer, 2022)	Nicht bekannt	

Recycling EU Permanentmagnete (SOLVAY, 2023)

	Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
Strategische Rohstoffe	EU-27		15 Prozent des jährlichen Verbrauchs: 2030	CRMA (KOM, 2023a)

Produktion Permanentmagnete

Material	Land	Firma	Prognostizierte Kapazität	Anmerkung
NdFeB-Magnet	Deutschland	Vacuumschmelze	1.000 t/a	Geschätzte aktuelle Kapazität
	Estland	Neo Performance Materials/Silmet (neomaterials, 2023)	2.000 t/a	Ab 2025, Ausbau später auf 5.000 t/a vorgesehen (Zieljahr noch nicht bekannt)
	verschiedene	Verschiedene	7.000 t/a 2030 = 20 Prozent des europ. Bedarfs	ERMA-Plan (ERMA; Gauß et al., 2021)

QUELLE Eigene Annahmen, basierend auf verschiedenen Quellen

Elektrolyseure

TAB. 19 Globale Unternehmensliste Elektrolyseurhersteller

Unternehmen	Land	AEL	PEMEL	HTEL	AEM
Acta	Italien				x
Angstrom Advanced	USA	x	x		
AREVA H ₂ Gen (heute Elogen)	Frankreich		x		
Asahi Kasei	Japan	x	x		
Auyan	China	x			
Beijing Zhongdian	China	x			
Cawolo	China		x		
Ceres Power Holdings	UK			x	
Cockerill Jingli Hydrogen	China	x			
Cummins	USA		x	x	
Ecolyzer	Deutschland	x			
Electric Hydrogen	USA		x		
Elogen (vorher H ₂ Gen)	Frankreich		x		
Enapter	Deutschland				x
Erredue	Österreich	x			
FuelCell Energy	USA			x	
Green Hydrogen Systems	Dänemark	x	x		
GTA Inc	USA		x		
GuofuHee	China	x			
H ₂ Core Systems GmbH	Deutschland				x
H ₂ PERIC	China	x			
HIAT GmbH	Deutschland		x		
Hitachi	Japan			x	
Hoeller Electrolyzer GmbH	Deutschland		x		
H-TEC Systems	Deutschland		x		
Hydrogenics	Kanada	x	x		
Idroenergy	Italien		x		
iGas Energy	Deutschland		x		x
iph Hähn GmbH	Deutschland		x		
ITM Power	UK	x			
John Cockerill	Belgien	x			
Kobelco Eco-Solutions	Japan	x	x		
Kohodo H ₂	China	x			

Unternehmen	Land	AEL	PEMEL	HTEL	AEM
Kylin Tech	China	x			
Kyocera AVX Group	USA		x	x	
Longi	China	x			
McPhy	Frankreich	x			
Millennium Reign Energy	USA	x			
Mitsubishi Power	Japan			x	
NEL	Norwegen	x	x		
Nel Hydrogen	Norwegen	x			
Nexceris	USA			x	
Ohmium	USA		x		
Ostermeier Hydrogen Solutions GmbH	Deutschland		x		
OxEon Energy	USA			x	
PERIC	China		x		
Plug Power	USA		x		
Pochari Technologies	USA	x			
Pro Puls	Deutschland		x		
Proton Onsite	USA		x		
ShaanXi HuaQin	China	x			
Shandong Saksay Hydrogen Energy	China		x		
Siemens Energy	Deutschland		x		
SinoHyEnergy	China	x			
SolydEra	Italien			x	
SPIC	China		x		
Sunfire	Deutschland	x			
Sungrow	China	x	x		
Suzhou Jingli	China	x			
Teledyne Energy Systems	USA	x			
ThyssenKrupp	Deutschland	x			
TianJin Mainland Hydrogen	China	x			
Toshiba Energy Systems	Japan	x			
Wasserelektrolyse Hydrotechnik	Deutschland	x			
Yangzhou Chungdean Hydrogen Equipment	China	x			

QUELLE Eigene Auflistung auf Basis von (Gallandat, Romanowicz, & Züttel, 2017, Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk, 2021, U.S. Department of Energy, 2022b, BNEF, 2022, Heuser, R., 2022) und Onlinerecherche

Gaskraftwerke (Wasserstoff)

Gaskraftwerke, die mit treibhausgasneutralem Wasserstoff betrieben werden, sichern das Stromsystem der Zukunft mit flexibler regelbarer Leistung ab. Als Technologieoptionen sind Gasturbinen (2 bis 100 MW-Klasse) und Gasmotoren (1 bis 10 MW-Klasse) für 100 Prozent Wasserstoff in der Entwicklung, erste Modelle sind marktverfügbar. Auch die Option der Umrüstung auf den zukünftigen Betrieb mit 100 Prozent Wasserstoff wird unter der Bezeichnung «H₂-Ready» von einer zunehmenden Zahl an Anbietern angeboten. Aufgrund der etablierten Erdgas-Turbinen- und Motorfertigung sind keine Fertigungsengpässe bei den Herstellern zu erwarten:

Bei Gasmotoren gibt es ein breites Herstellerumfeld mit hoher Fertigungstiefe in Europa. Kritische Rohstoffe oder Materialien sind nicht bekannt. Es gibt Hinweise, dass zentrale Bauteile wie z. B. Ventile zur Saugrohreinspritzung von Wasserstoff in der Zulieferindustrie noch nicht als Serienprodukt verfügbar sind.

Bei Gasturbinen gibt es vier globale Hersteller – General Electric (USA), Kawasaki (Japan), Mitsubishi Hitachi (Japan) Power Systems und Siemens Energy (Deutschland) – mit hoher Fertigungstiefe. Kritische Elemente kommen teilweise in Superlegierungen und Verbundwerkstoffen vor, u.a. als Korrosionsinhibitoren, zur Erhöhung der Festigkeit von hochbelasteten Bauteilen wie Gasturbinenschaufeln: zu den kritischen Rohstoffen gehören Titan, Nickel, Kobalt, Chrom, teilweise auch Molybdän, Wolfram, Cer, Hafnium, Zirkonium, Yttrium, Niob, Rhenium und Ruthenium. Nach Aussage der DERA zeigt sich in den vergangenen Jahrzehnten der Entwicklung eine Zunahme der Anteile kritischer Elemente in Superlegierungen, die im Fall von Engpässen aber durch alternative Legierungszusammensetzungen ersetzt werden (Marscheider-Weidemann, F. et al., 2021).

Mangels Verfügbarkeit der Wasserstoffmengen und Verteilinfrastruktur für Wasserstoff hängt die weitere Technologieentwicklung auch vom Hochlauf der Wasserstoffverfügbarkeit ab.

Stromnetzinfrastruktur

Die Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems erfordert eine umfassende Erweiterung des Stromnetzes. Das Übertragungsnetz muss nach Einschätzungen von Consentec und Agora Energiewende von heute 35.000 Leitungskilometern auf 50.000 in 2035 (Agora Energiewende, Prognos, Consentec, 2022) und 55.000 Leitungskilometern in 2045¹ ausgebaut werden. Hierzu erforderlich ist auch der Ausbau von Strommasten, Kabel, Leiterseilen, Isolatoren, Transformatoren, Gleichrichter, Wechselrichter und Schaltanlagen.

Da ein Großteil der erneuerbaren Energien im Verteilnetz angeschlossen werden, steht auch hier ein umfangreicher Um- und Ausbau bevor. Waren die Verteilnetze ursprünglich eher als Einbahnstraße in Richtung Endverbraucher vorgesehen, ist bereits heute und in Zukunft eine große Flexibilität und eine intelligente Steuerung nötig.

Neben Rohstoffen, Komponenten und Anlagenbau ist bei der Kritikalitätsbetrachtung bei Stromnetzen auch das Thema Cybersecurity wichtig, insbesondere der Fremdzugriff z. B. über Gleich- und Wechselrichter. Hier hat das chinesische Unternehmen Huawei hohe Marktanteile. Für PV-Wechselrichter ist das Unternehmen bereits das siebte Jahr in Folge Marktführer (2021: 22 Prozent Marktanteil). Ebenfalls gibt es nur wenige Konkurrenten, welche gleichwertige Gleichstrom-Systeme bauen können. Das Thema wurde in dieser Studie nicht untersucht, bedarf aber weiterer Analysen.

¹ <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de:8443/open-view/55705/66acc1cfdc47cfea01308bccbdb375f7>

TAB. 20 **Komponenten, Teilkomponenten und Rohstoffe im Stromnetz**

Komponente	Rohstoff, Teilkomponenten
Fundament/Gründung	Beton
Freileitungsmasten	Stahl-Fachwerk
Freileitungen	Aluminium, Stahl, Zink
Kabel	Kupfer, Isolieröl/Haftmasse, Kunststoffe, Stahlrohr, Blei, Sand
Hochtemperaturseile	Karbonfasern, Aluminium, Zirkonium, Stahl
Transformatoren	Eisenkern, Kupferspulen, Öl
Gleichrichter, Wechselrichter	Silizium, Nickel, Silber
Schaltanlagen	Sammelschienen (Aluminium, Stahl), Isolatoren, Transformatoren

QUELLE Eigene Darstellung

Prognos, 2023

Fernwärme

Neben der dezentralen Wärmepumpe ist die klimaneutrale Erzeugung von Fernwärme und deren Verteilung mit Hilfe von Wärmenetzen ein wesentlicher Baustein der zukünftigen Wärmeversorgung, insbesondere in verdichteten Gebieten. Fernwärmesysteme haben gegenüber Einzelheizungen den Vorteil, dass sie eine breites Technologiespektrum nutzen können. Neben Großwärmepumpen, Elektrokesseln, Heizkraftwerken und Heizwerken mit klimaneutralen Brennstoffen, Solarthermieranlagen, Geothermie kann auch Abwärme aus Industrieanlagen oder der Müllverbrennung genutzt werden. In den Netzen werden mehrere Erzeugungsanlagen sich gegenseitig ergänzen und zudem mit Hilfe von Wärmespeichern flexibel auf die Wärmenachfrage und die Signale des Stromsystems reagieren.

Die genannten Technologien sind alle marktreif und gut verfügbar. In den nächsten Jahren ist aber mit einem deutlich steigenden Bedarf dieser Anlagen zu rechnen. Neben der Schaffung eines stabilen Umfeldes für eine wirtschaftlich tragfähige Transformation der Fernwärmenetze gilt es entsprechende Kapazitäten und Wissen bei den Herstellern, Planern, Genehmigungsbehörden und den Wärmenetzbetreibern aufzubauen.

Im Vergleich zu anderen Schlüsseltechnologien gibt es bei der Fernwärme weniger strategische Abhängigkeiten, da die Anlagenbauer zu großen Teilen in Deutschland und Europa beheimatet sind und aufgrund der großen Technologiebandbreite auftretenden Knappheiten gut kompensiert werden können.

Direct Air Capture (DAC)

Zur Begrenzung der Erderwärmung sind auch negative CO₂-Emissionen aus technischen CO₂-Senken notwendig (IPCC, 2018). Eine der technischen Optionen ist dabei die CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre (Direct Air Carbon Dioxide Capture – DAC). Im Gegensatz zur CO₂-Abscheidung an Punktquellen wird bei der direkten Abscheidung aus der Umgebungsluft CO₂ direkt aus der Atmosphäre abgeschieden. Das abgeschiedene CO₂ kann entweder für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen genutzt (Direct Air Carbon Dioxide Capture and Utilisation – DACCU) oder dauerhaft geologisch gespeichert werden (Direct Air Carbon Capture and Storage – DACCS).

Bei der Abscheidung wird zunächst mit Hilfe von Ventilatoren die Umgebungsluft zu einem Sorptionsmittel geleitet. Mit Hilfe von ab- oder adsorbierenden Substanzen wird das CO₂ aus der Umgebungsluft gebunden. Im letzten Schritt wird durch Zufuhr von Wärme das CO₂ vom Sorbent abgetrennt. Je nach Wahl des Sorptionsmittels, der Art der Regeneration und dem benötigten Temperaturniveau können verschiedene Anlagentypen unterschieden werden. Das Schweizer Unternehmen Climeworks hat sich auf die Entwicklung der Niedrigtemperatur DAC-Anlagen (100° C) spezialisiert. Das Unternehmen betreibt im Pilotmaßstab DAC-Anlagen in Island, Norwegen und in Italien. Das kanadische Unternehmen Carbon Engineering hingegen setzt Hochtemperatur-DAC-Anlagen ein (900° C) und hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2035 100 Millionen Tonnen CO₂ der Atmosphäre permanent zu entziehen.

Entscheidend für einen industriellen Hochlaufpfad von DAC-Anlagen ist die Reduktion der hohen Investitionskosten und den enormen Energiebedarf. Derzeit weisen DAC-Anlagen, je nach Technologie und Entwicklungsstand, einen Strombedarf von 350 - 500 kWhel/t CO₂ und einen Wärmebedarf von 1.500 - 2.000 kWhth/t CO₂ auf (Danish Energy Agency, 2021). Darüber hinaus sind auch der Wasser- und Flächenbedarf kritische Einflussfaktoren.

Gemäß der IEA gibt es derzeit sieben DAC-Projekte in Europa mit einer Abscheidekapazität von rund 2,6 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr, wovon in fünf Projekten CO₂ langfristig geologisch gespeichert werden soll und in zwei Projekten wird das atmosphärische CO₂ in synthetischen Energieträgern weiterverarbeitet (IEA, 2023).

Laut (Deutz & Bardow, 2021) besteht eine Niedrigtemperatur DAC-Anlage, wie z. B. die von Climeworks, aus den Komponenten Fundament, Gebäude/Halle/Rohre, Adsorptionsmittel, Container mit CO₂-Kollektoren, Vakuum-System mit Kondensator und CO₂-Wasser-Abtrennung und den Ersatzteilen. Zusätzlich entsteht ein Flächenbedarf von rund 8 km² um eine Million Tonnen CO₂ pro Jahr abzuscheiden. Die Hauptrohstoffe sind vor allem Beton und Stahl.

Weitere Technologien

Neben die in dieser Studie dargestellten Technologien sind noch weitere Anlagen zur Erreichung der Klimaneutralität 2045 notwendig, wie z. B. Bioenergieanlagen (inkl. Biomethan-Aufbereitungsanlagen), Wärmedämmung, CO₂-Infrastruktur, elektrische Steamcracker etc. Diese Technologien standen nicht im Fokus der Analysen, da es entweder etablierte Technologien ohne kritischen Rohstoff und Komponentenbedarf (Dämmung) sind oder/und weil die Technologien für den kritischen Zeitraum bis 2030/2035 zu vergleichsweise geringen Treibhausgaseinsparungen beitragen. Ggf. bedarf es hier weiterführender Analysen.

Literaturverzeichnis

- Adam, P., Engelshove, S., Thiemann, T., Heunemann, F., & von dem Bussche, C. (2020). **Wasserstoffinfrastruktur – tragende Säule der Energiewende – Umstellung von Ferngasnetzen auf Wasserstoffbetrieb in der Praxis.** Siemens Energy, Gascade Gastransport GmbH, Nowega GmbH. Von <https://www.nowega.de/wp-content/uploads/200915-whitepaper-h2-infrastruktur-DE.pdf> abgerufen
- AFRY. (2023). **PFS Study for Hautalampi Ni-, Cu-, Co-Deposit, Outokumpu, Finland.** Von <https://eurobatteryminerals.com/wp-content/uploads/2019/04/pfs-2023-update-hautalampi-deposit.pdf> abgerufen
- Agamloh, E. B. et al. (2020). **An Overview of Electric machine Trends in Modern Electric Vehicles, Experteneinschätzung E-Motorentwickler.** Von https://www.researchgate.net/publication/340841920_An_Overview_of_Electric_Machine_Trends_in_Modern_Electric_Vehicles abgerufen
- Agora Energiewende. (o. J.). **Global Steel Transformation Tracker.** Von <https://www.agora-energiewende.de/en/service/global-steel-transformation-tracker/> abgerufen
- Agora Energiewende, Prognos, Consentec. (2022). **Klimaneutrales Stromsystem 2035. Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann.** Berlin: Agora Energiewende. Von https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE_KNStrom2035/A-EW_264_KNStrom2035_WEB.pdf abgerufen
- Agora Verkehrswende. (2021). **Automobile Arbeitswelt im Wandel - Jobeffekte in Deutschland bis 2030.** Von <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/automobile-arbeitswelt-im-wandel/> abgerufen
- Al Barazi, S. (2022). **Battery Raw Materials Outlook for Demand and Supply in Europe.** 3rd Future Battery Forum. DERA.
- Al Barazi, S. et al. (2017). **Cobalt from the DR Congo – Potential, Risks and Significance for the Global Cobalt Market.** Von BGR: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo_en.pdf?__blob=publicationFile&v=6 abgerufen
- Antea Group. (2023). **Estonia's First Climate Proofing Project on a Unique Magnet Factory.** Von <https://finance.yahoo.com/news/estonia-first-climate-proofing-project-195000956.html> abgerufen
- Arnold Magnetic Technologies. (2023). **Leitfaden für Anwendungen mit Permanentmagneten.** Von <https://www.arnoldmagnetics.de/resources/permanent-magnet-applications-guide/> abgerufen
- Automotive IQ. (2023). **10th International Conference Advanced E-Motor Technology 2023.** Von <https://www.automotive-iq.com/events-e-motor-conference> abgerufen
- auxico resources. (2023). **Auxico Announces Light and Heavy Rare Earths Separation Results.** Von https://www.auxicoresources.com/_files/ugd/6f9bc0_40deb8ee387e4e6394a10eca8d5c6e48.pdf abgerufen
- BDEW. (2022). **PV-Anlagen: Im Angesicht der Entsorgungswelle. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.** Von <https://www.bdew.de/online-magazin-zweitausend50/stoffwechsel/pv-anlagen-im-angesicht-der-entsorgungswelle/> abgerufen
- BDI. (2021). **Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Bundesverband der Deutschen Industrie.** Von https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve abgerufen

- Bellini, E. (2022). **China's solar cell production capacity may reach 600 GW by year-end**. Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2022/10/24/chinas-solar-cell-production-capacity-may-reach-600-gw-by-year-end/> abgerufen
- Bellini, E. (2023). **Tongwei led global polysilicon capacity in 2022, says Bernreuter Research**. Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2023/05/16/tongwei-led-global-polysilicon-output-in-2022-says-bernreuter-research/> abgerufen
- Benchmark Source. (2022). **Infographic: China's lithium ion battery supply chain dominance**. Von <https://source.benchmarkminerals.com/article/infographic-chinas-lithium-ion-battery-supply-chain-dominance> abgerufen
- Benchmark Source. (2023a). **Myanmar protests may put Chinese rare earth mining on hold**. Von <https://source.benchmarkminerals.com/article/myanmar-protests-may-put-chinese-rare-earth-mining-on-hold> abgerufen
- Benchmark Source. (2023b). **Europe's anode market set to accelerate with Putailai, Talga plants**. Von <https://source.benchmarkminerals.com/article/europes-anode-market-set-to-accelerate-with-putailai-talga-plants> abgerufen
- Beneking, C. (2023). **Chinas Weg zur Solarmacht und was wir daraus lernen können**. Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2023/03/14/chinas-weg-zur-solarmacht-und-was-wir-daraus-lernen-koennen/> abgerufen
- BGR. (2020). **Kobalt – Informationen zur Nachhaltigkeit**. Von https://www.deutsche-rohstoffagen-tur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kobalt.pdf?__blob=publicationFile&v=3 abgerufen
- BGS Minerals UK. (2023). **What is the difference between resources and reserves for aggregates?** Von <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/mineralsYou/resourcesReserves.html> abgerufen
- Bloss, M. (2022). **Industrielle Klima-Revolution, jetzt!** Von <https://michaelbloss.eu/de/presse/themenhintergrund/industrielle-klima-revolution-jetzt> abgerufen
- BMBF. (o. J. a). **MoCa – Development of a Production Chain for Rare Earth Elements from Tailings of the Ultramafic Alkali-Carbonatite Complex Catalão / Goiás**. Von Bundesministerium für Bildung und Forschung: <https://www.bmbf-client.de/en/projects/moca> abgerufen
- BMBF. (o. J. b). **REGINA – Rare Earth Global Industry and New Applications**. Von Bundesministerium für Bildung und Forschung: <https://www.bmbf-client.de/en/projects/regina> abgerufen
- BMWK. (2023a). **Photovoltaik-Strategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz**. Von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.html> abgerufen
- BMWK. (2023b). **Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie – NWS 2023**. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.html> abgerufen
- BNEF. (2022). **A Breakneck Growth Pivot Nears for Green Hydrogen**. Von BloombergNEF: <https://about.bnef.com/blog/a-breakneck-growth-pivot-nears-for-green-hydrogen/> abgerufen

- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., et al. (2020). **Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study**. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Luxemburg: Publications Office of the European Union. Von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en> abgerufen
- Boliden. (2023a). **Copper – For efficient energy conversion**. Von <https://www.boliden.com/operations/products/copper> abgerufen
- Boliden. (2023b). **Nickel – The key to producing stainless steel**. Von <https://www.boliden.com/operations/products/nickel> abgerufen
- Buchert, M. et al. (2019). **Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen**. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/substitution-als-strategie-minderungrohstoffkritikalitaet> abgerufen
- Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., & Pavel, C. (2020). **Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system**. Europäische Kommission. Luxemburg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/160859
- cellforce. (2022). **Cellforce Group legt Grundstein für moderne, nachhaltige Batterieproduktion in Europa**. Von <https://www.cellforce.de/2022/10/18/cellforce-group-legt-grundstein-fuer-moderne-nachhaltige-batterieproduktion-in-europa/> abgerufen
- Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk. (2021). **Marktübersicht Elektrolyseure**. Von https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/12/Marktuebersicht-Elektrolyseure_2023-03.pdf abgerufen
- cleanthinking.de. (2023). **Guben-Konverter: Rock Tech startet Bau von Europas erster Lithiumhydroxid-Raffinerie**. Von <https://www.cleanthinking.de/rock-tech-brandenburg-lithiumhydroxid-fabrik/> abgerufen
- Coastline. (2023). **Umicore Finland helps build a European supply chain for electric car batteries**. Von <https://www.coastline.fi/umicore-finland-helps-build-a-european-supply-chain-for-electric-car-batteries/> abgerufen
- Council of the European Union. (2023a). **‘Fit for 55’: Council adopts regulation on CO₂ emissions for new cars and vans**. Von <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/> abgerufen
- Council of the European Union. (2023b). **Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020**. Von <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5469-2023-INIT/en/pdf> abgerufen
- Danish Energy Agency. (2021). **Technology Data for Carbon Capture, Transport and Storage**. Von <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-carbon-capture-transport-and> abgerufen
- DECHEMA; Peuker et al. (2021). **Technologieplattform H₂GIGA, ReNaRe Recycling – Nachhaltige Ressourcennutzung**. Von <https://dechema.de/Forschung/Projekte/ReNaRe.html> abgerufen

- DENA. (2022). **Abschlussbericht: Erkenntnisse aus dem Stakeholderdialog industrielle Produktionskapazitäten für die Energiewende (StiPE) - Entwurf einer industriepolitischen Strategie für erneuerbare Energien und Stromnetze.** Berlin: Deutsche Energie-Agentur. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikations-detailansicht/pub/abschlussbericht-erkenntnisse-aus-dem-stakeholderdialog-industrielle-produktionskapazitaeten-fuer-die-energiewende-stipe/> abgerufen
- DERA. (2022). **Mineralische Rohstoffe für die Wasserelektrolyse: DERA Themenheft – Wasserelektrolyse.** Von Deutsche Rohstoffagentur: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Produkte/Themenhefte/themenhefte_node.html abgerufen
- Deutz, S., & Bardow, A. (2021). **Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption.** Nature Energy, 6, 203–213. Von <https://www.nature.com/articles/s41560-020-00771-9> abgerufen
- Diermann, R. (2019). **Huawei, Sungrow und SMA verlieren Marktanteile.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2019/05/02/huawei-sungrow-und-sma-verlieren-marktanteile/> abgerufen
- Diermann, R. (2023). **Norsun secures wafer order from Meyer Burger.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2023/02/08/norsun-secures-wafer-order-from-meyer-burger/> abgerufen
- Enkhardt, S. (2022). **Tongwei und GCL weltweit führend – Wacker Chemie fällt weiter zurück.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2022/04/27/tongwei-und-gcl-weltweit-fuehrend-wacker-chemie-faellt-weiter-zurueck/> abgerufen
- Enkhardt, S. (2023). **Spatenstich für neue 20-Gigawatt-Fabrik von SMA in Deutschland.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2023/04/19/spatenstich-fuer-neue-20-gigawatt-fabrik-von-sma-in-deutschland/> abgerufen
- Enkhardt, S.; Shaw, V. (2023). **China erwägt Export-Beschränkungen für Equipment zur Herstellung von Polysilizium und Wafer.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2023/01/30/china-erwaegt-export-beschaenkungen-fuer-equipment-zur-herstellung-von-polysilizium-und-wafer/> abgerufen
- eramet. (2023). **French lithium for electric vehicle batteries, Producing lithium «made in France» is the ambition of Eramet and Électricité de Strasbourg, who are involved in a joint project for the sustainable development of Alsatian lithium.** Von <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/eugeli-project> abgerufen
- ERMA; Gauß et al. (2021). **Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance.** Berlin: ERMA.
- Ernst, R. (2023). **Jinko Solar plant neue Produktionslinien mit einer jährlichen Kapazität von 56 Gigawatt.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2023/05/24/jinko-solar-plant-neue-produktionslinien-mit-einer-jaehrlichen-kapazitaet-von-56-gigawatt/> abgerufen
- EUROFER. (o. J.). **Map of EU steel production sites.** Von The European Steel Association: https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/Map-20191113_Eurofer_SteelIndustry_Rev3-has-stainless.pdf abgerufen
- euronews.next. (2023). **Europe in race to secure raw materials critical for energy transition.** Von <https://www.euronews.com/next/2023/03/07/europe-in-race-to-secure-raw-materials-critical-for-energy-transition> abgerufen

- European Lithium. (2020). **Wolfsberg Lithium Project – Project Highlights**. Von <https://europeanlithium.com/wolfsberg-lithium-project/> abgerufen
- European Metals. (2022). **Cinovec vertically integrated battery metals project – (49 % – EMH / 51 % – CEZ)**. Von <https://www.europeanmet.com/cinovec-project-overview/> abgerufen
- FGG. (2022). **Annual Report 2022**. Flat Glass Group Co., Ltd. Von <https://www.flatgroup.com.cn/public/uploads/file/20230418/1681777470559907.pdf> abgerufen
- Fischer, A. (2022). **Perovskite solar cell technology on the road to commercialization**. Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2022/05/20/perovskite-solar-cell-technology-on-the-road-to-commercialization/> abgerufen
- fortum. (2023). **Fortum Battery Recycling Oy and AMG Lithium GmbH sign MoU for supply of recycled lithium hydroxide**. Von <https://www.fortum.com/media/2023/05/fortum-battery-recycling-oy-and-amg-lithium-gmbh-sign-mou-supply-recycled-lithium-hydroxide> abgerufen
- Fraunhofer ISE. (2022a). **Kupfer statt Silber: Neuer Schub für die Solarzellen-Produktion**. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Von <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2022/september-2022/kupfer-statt-silber-neuer-schub-fuer-solarzellen.html> abgerufen
- Fraunhofer ISE. (2022b). **PERC-Solarzellen aus 100 Prozent recyceltem Silizium**. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Von https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2022/0122_ISE_d_PI_PERC-Solarzellen-aus-recyceltem-Silizium-hergestellt.pdf abgerufen
- Fraunhofer ISE. (2023). **Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland**. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Von <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> abgerufen
- Fraunhofer ISI et al. (2022). **Langfristszenarien 3**. Von <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de> abgerufen
- FT. (2023). Financial Times. Von <https://www.ft.com/content/80d34254-3e12-4fa7-8f02-fdceb1c2fa2e> abgerufen
- Fuhs, M. (2023a). **Thalheim, Hambach, und wo noch?** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/archiv/thalheim-hambach-und-wo-noch/> abgerufen
- Fuhs, M. (2023b). **Wacker sieht viel Bewegung in der politischen Diskussion: Bald mehr europäische Photovoltaik-Module?** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2023/04/19/wacker-sieht-viel-bewegung-in-der-politischen-diskussion-bald-mehr-europaeische-photovoltaik-module/> abgerufen
- Gallandat, N., Romanowicz, K., & Züttel, A. (2017). **An Analytical Model for the Electrolyser Performance Derived from Materials Parameters**. *Journal of Power and Energy Engineering*, 5, 34-49. Von https://www.scrip.org/pdf/JPEE_2017102716120865.pdf abgerufen
- Gielen, D.; Lyons, M. (2022). **Critical materials for the energy transition: rare earth elements**. International Renewable Energy Agency. Von https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Rare_Earth_Elements_2022.pdf abgerufen

- Graedel, T. E. et al. (2011). **Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel.** UNEP. Von <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals> abgerufen
- Grohol, M., Veeh, C. (2023). **Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.** Luxemburg: Publications Office of the European Union. Von <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585> abgerufen
- Hagelüken, C.; Buchert, M. et al. (2005). **Materials Flow of Platinum Group Metals.** Von https://www.researchgate.net/profile/Christian_Hagelueken/publication/270687039_Materials_Flow_of_Platinum_Group_Metals/links/55cf8f7b08ae502646aa455e/Materials-Flow-of-Platinum-Group-Metals.pdf abgerufen
- Hall, M. (2021). **Europe had just 650 MW of solar cell manufacturing capacity at the end of 2020.** Von pv magazine: <https://pv-magazine-usa.com/2021/08/02/europe-had-just-650-mw-of-solar-cell-manufacturing-capacity-at-the-end-of-2020/> abgerufen
- Hannen, P. (2023). **Q-Cells baut Pilotlinie für Perowskit-Silizium-Tandem-Photovoltaik in Südkorea.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2023/05/17/q-cells-baut-pilotlinie-fuer-perowskit-silizium-tandem-photovoltaik-in-suedkorea/> abgerufen
- HARARE. (2021). **Hydrogen As the Reducing Agent in the REcovery of metals and minerals from metallurgical waste.** Von <https://www.rwth-aachen.de/cms/root/Forschung/Projekte/EU-Projekte/EU-Projekte-in-Horizon/~rbieq/HARARE/?lidx=1> abgerufen
- Harthan, R. et al. (2019). **Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung - Teilbericht des Projektes «THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 («Politiksznarien IX»).** Von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abschaetzung-der-treibhausgasminderungswirkung-des> abgerufen
- Heraeus. (2020). **Milestone for green hydrogen: Heraeus launches new electrocatalyst.** Von https://www.heraeus.com/en/hpm/company/hpm_news/2020_hpm_news/09_milestone_for_green_hydrogen.html abgerufen
- Heraeus; Walter, Ph. (2022). **Iridium Supply and Demand Solutions to Accompany the Growth of PEM Electrolysis, VDMA-Webinar.** Von https://www.heraeus.com/en/hpm/hmp_products_solutions/hydrogensystems/hydrogen_generation/hydrogen_generation.html?websiteCriteria=0010 abgerufen
- Herz, S. (2023). **Die EEG-Novelle – was ändert sich für Solaranlagen?** Von Bundesverband WindEnergie: <https://www.windindustrie-in-deutschland.de/fachartikel/die-eeeg-novelle-was-aendert-sich-fuer-solaranlagen> abgerufen
- Heuser, R. (2022). **Power-to-X-Marktübersicht: 92 Elektrolyseure von 17 Herstellern.** Von Power-to-X: <https://power-to-x.de/power-to-x-marktuebersicht-92-elektrolyseure-von-17-herstellern/> abgerufen
- High North News. (2022). **Norwegian-Swedish Cooperation on Rare Earth Metals: Marks the Beginning of Something New in Europe.** Von <https://www.highnorthnews.com/en/norwegian-swedish-cooperation-rare-earth-metals-marks-beginning-something-new-europe> abgerufen

- Hopf, E. (2023). **China baut Fertigungskapazitäten aus – Natrium-Ionen-Batterie vor dem Durchbruch?** Von elektroniknet.de: <https://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/natrium-ionen-batterie-vor-dem-durchbruch.204322.html> abgerufen
- IEA. (2021a). **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris: International Energy Agency. Von <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (Lizenz: CC BY 4.0) abgerufen
- IEA. (2021b). **Solar PV manufacturing capacity by country and region, 2021**. Paris: International Energy Agency. Von <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-manufacturing-capacity-by-country-and-region-2021> (Lizenz: CC BY 4.0) abgerufen
- IEA. (2021c). **World Energy Outlook 2021**. International Energy Agency. Von <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021> abgerufen
- IEA. (2022a). **Solar PV Global Supply Chains**. Paris: International Energy Agency. Von <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains> (Lizenz: CC BY 4.0) abgerufen
- IEA. (2022b). **SDS-Szenario IEA World Energy Outlook**. International Energy Agency. Von <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> abgerufen
- IEA. (2022c). **Global Hydrogen Review 2022**. Paris: International Energy Agency. Von <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf> abgerufen
- IEA. (2022d). **World Energy Outlook 2022**. International Energy Agency. Von <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> abgerufen
- IEA. (2023). **CCUS Projects Explorer**. Paris: International Energy Agency. Von <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ccus-projects-explorer> abgerufen
- IEEFA. (2023). **India's photovoltaic manufacturing capacity set to surge**. Von Institute for Energy Economics and Financial Analysis: <https://ieefa.org/resources/indias-photovoltaic-manufacturing-capacity-set-surge> abgerufen
- IMERYS. (2022). **By launching a project to mine lithium in France, Imerys is playing its part in the energy transition**. Von <https://www.imerys.com/news/launching-project-mine-lithium-france-imerys-playing-its-part-energy-transition> abgerufen
- Innovation News Network. (2023). **Lofdal: A tier-1 heavy rare earth project in development – Critical Raw Materials**. Von <https://www.innovationnewsnetwork.com/lofdal-tier-1-heavy-rare-earth-project-development/31930/> abgerufen
- IPCC. (2018). **Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung**. Intergovernmental Panel on Climate Change. Von https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/07/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf abgerufen
- IPCEI Batteries. (2023). **Build-up of the battery industry -status quo and challenges Q2 – 2023**. Von <https://www.ipcei-batteries.eu/accompanying-research/market-updates> abgerufen
- IWR. (2023). **AMG nimmt Lithium-Produktion in Bitterfeld-Wolfen auf – Investitionen von 1 Mrd. Euro – Start mit jährlich 20.000 Tonnen**. Von Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien: <https://www.iwr.de/ticker/start-mit-jaehrlich-20-000-tonnen-amg-nimmt-lithium-produktion-in-bitterfeld-wolfen-auf-investitionen-von-1-mrd-euro-artikel5326> abgerufen

- Jean, J., Brown, P., Jaffe, R., Buonassisi, T., & Bulović, V. (2015). *Pathways for Solar Photovoltaics*. Energy & Environmental Science, 8, 1200-1219. doi:10.1039/C4EE04073B
- JM. (2022). *Johnson Matthey publishes latest PGM Market Report 2022*. Von Johnson Matthey: <https://matthey.com/pgm-market-report-2022> abgerufen
- JRC. (2021). *Foresight On Critical Raw Materials For European Industry*. Luxemburg: Joint Research Centre of the European Union. Von <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128620> abgerufen
- Kenya News Agency. (2023). *Government Identifies 970 Minerals Across The Country*. Von <https://www.kenyanews.go.ke/government-identifies-970-minerals-across-the-country/> abgerufen
- KGHM. (2023). *Production-sales reports of the KGHM Group*. Von <https://kgbm.com/en/investors/results-center/production-sales-reports> abgerufen
- Kiemel, S. et al. (2021). *Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany*. International Journal of Energy Research, 45(7), 9914-9935. Von <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.6487> abgerufen
- Kinch, D. (2023). *Interview: Solvay proceeds with rare earths project, sees EV targets on track despite slowdown*. Von S&P Global: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/013023-interview-solvay-proceeds-with-rare-earths-project-sees-ev-targets-on-track-despite-slowdown> abgerufen
- Knight, Ch. (2018). *Titan: wertvoller Nachschub für Europa – Neues Recyclingwerk schont Klima und Ressourcen*. Von Europäische Investitionsbank: <https://www.eib.org/de/stories/titanium-recycling> abgerufen
- KoaV. (2021). *Bundesregierung Koalitionsvertrag 2021-2025: Mehr Fortschritt wagen*. Bundesregierung.
- KOM. (2022a). *REPowerEU: New industrial Alliance to boost the EU's solar power and energy security*. Brüssel: Europäische Kommission. Von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_7617 abgerufen
- KOM. (2022b). *Implementing the Repower EU Action Plan: Investment Needs, Hydrogen Accelerator and Achieving the Bio-Methane Targets*. Brüssel: Europäische Kommission. Von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022SC0230> abgerufen
- KOM. (2023a). *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials and Amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020*. Brüssel: Europäische Kommission. Von https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en abgerufen
- KOM. (2023b). *Kommissions-Vorschlag: Neue CO₂-Standards für Lkw, emissionsfreie Stadtbusse ab 2030*. Brüssel: Europäische Kommission. Von https://germany.representation.ec.europa.eu/news/kommissions-vorschlag-neue-co2-standards-fur-lkw-emissionsfreie-stadtbusse-ab-2030-2023-02-14_de abgerufen
- KOM. (2023c). *Net-Zero Industry Act: Making the EU the home of clean technologies manufacturing and green jobs*. Brüssel: Europäische Kommission. Von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1665 abgerufen
- Leading Edge Materials. (2021). *Leading Edge Materials Announces Positive Preliminary Economic Assessment*

- Results for its Woxna Graphite Anode Project With US\$317m Pre-Tax NPV and 42.9 % Pre-Tax IRR.** Von <https://leadingedgematerials.com/leading-edge-materials-announces-positive-preliminary-economic-assessment-results-for-its-woxna-graphite-anode-project-with-us317m-pre-tax-npv-and-42-9-pre-tax-irr/> abgerufen
- Lyons, L. et al. (2022). **Clean Energy Technology Observatory: Heat Pumps in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets.** Luxemburg: Publications Office of the European Union. Von <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130874> abgerufen
- Marscheider-Weidemann, F. et al. (2021). **DERA Rohstoffinformationen – Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur.** Von https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf;jsessionid=68BB43B2916F4F64AC0F4EE003038E57.internet941?__blob=publicationFile&v=4 abgerufen
- Mining Magazine. (2022). **Mkango to develop German rare earth magnet recycling plant – HyProMag GmbH will develop a rare earth magnet recycling plant in Germany after receiving €3.7 million in grants.** Von <https://www.miningmagazine.com/design-build/news/1443895/mkango-to-develop-german-rare-earth-magnet-recycling-plant> abgerufen
- Mining Technology. (2023a). **Mkango gets environmental clearance for Malawi rare earths project – With an anticipated operational life of 18 years, the Songwe Hill project will require an initial capital expenditure of \$277.4m.** Von <https://www.mining-technology.com/news/mkango-clearance-malawi-rare-earths/> abgerufen
- Mining Technology. (2023b). **Talga's natural graphite mine in Sweden obtains environmental approval.** Von <https://www.mining-technology.com/news/talgas-graphite-sweden/> abgerufen
- Mining.com. (2023). **Ecuador, Colombia and Peru Snapshot: Eight companies pursuing copper, gold and more.** Von <https://www.mining.com/ecuador-colombia-and-peru-snapshot-eight-companies-pursuing-copper-gold-and-more/> abgerufen
- MiningScout. (2023). **Chile will Lithium verstaatlichen: Die ersten Konsequenzen sind da.** Von <https://www.miningscout.de/blog/2023/04/25/chile-will-lithium-verstaatlichen-die-ersten-konsequenzen-sind-da/> abgerufen
- neomaterials. (2023). **Neo Launches Construction of Permanent Rare Earth Magnet Facility; Europe's First Mine-to-Magnets Supply Chain.** Von <https://www.neomaterials.com/neo-launches-construction-of-re-magnet-manufacturing-plant/> abgerufen
- Nordelöf et al. (2017). **A Scalable Life Cycle Inventory of an Electrical Automotive Traction Machine – Technical and Methodological Description, version 1.01. Report No. 2016:4 (1.01) model file: Nordelöf (2017).** Von [chalmers.se: http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/Scalable_PMSM_LCI_Model_v1.01.xlsm](http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/Scalable_PMSM_LCI_Model_v1.01.xlsm) abgerufen
- NREL. (2022). **Summer 2022 – Solar Industry Update.** National Renewable Energy Laboratory. Von <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83718.pdf> abgerufen
- Nyaungwa, N. (2022). **Namibian rare earth minerals project targets 2026 production.** Von [Mining.com: https://www.mining.com/web/namibian-rare-earth-minerals-project-targets-2026-production/](https://www.mining.com/web/namibian-rare-earth-minerals-project-targets-2026-production/) abgerufen

- Öko-Institut. (2021). **Resource consumption of the passenger vehicle sector in Germany until 2035 – the impact of different drive systems, Study on behalf of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety**. Von <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/resource-consumption-of-the-passenger-vehicle-sector-in-germany-until-2035-the-impact-of-different-drive-systems> abgerufen
- Öko-Institut et al. (2022). **Projektionsbericht 2021 (Politiksznarien X)**. Von <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/projektionsbericht-2021-politiksznarien-x> abgerufen
- Photovoltaik. (2022). **Solarglas: Gewaltiger Engpass droht in Europa**. Von <https://www.photovoltaik.eu/solarmodule/solarglas-gewaltiger-engpass-droht-europa> abgerufen
- Photovoltaik.org. (o. J.). **Dünnschichtmodule**. Von <https://photovoltaik.org/photovoltaikanlagen/solarmodule/duennschichtmodule> abgerufen
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut. (2021): **Klimaneutrales Deutschland 2045**. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Von: https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/08/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf abgerufen
- Randall, C. (2022). **Keliber to mine and refine lithium in Finland**. Von [electrive.com: https://www.electrive.com/2022/11/29/keliber-to-mine-and-refine-lithium-in-finland/](https://www.electrive.com/2022/11/29/keliber-to-mine-and-refine-lithium-in-finland/) abgerufen
- REIA. (2022). **REIA's Input for the EU Raw Materials Act. What it takes to establish European supply chains of rare earth permanent magnets that will fast-forward Europe's transition to energy saving technologies for Electric Vehicles & Wind Energy**. Rare Earth Industry Association. Von <https://www.global-reia.org/wp-content/uploads/2022/11/REIA-Input-for-EU-RawMaterials-Act.pdf> abgerufen
- Re-Sourcing. (2020). **Project Outputs**. Von <https://re-sourcing.eu/project-outputs/> abgerufen
- Rizos, V. et al. (2022). **Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU – Challenges and opportunities**. Von CEPS: <https://www.ceps.eu/ceps-publications/developing-a-supply-chain-for-recycled-rare-earth-permanent-magnets-in-the-eu/> abgerufen
- Romano, V. (2023). **Enel baut sizilianische Solarmodul-Fabrik zur größten Europas aus**. Von EURACTIV: <https://www.euractiv.de/section/all/news/enel-baut-sizilianische-solarmodul-fabrik-zur-groessten-europas-aus/> abgerufen
- Rueter, G. (2021). **Wie nachhaltig sind Solarmodule?** Von Deutsche Welle: <https://www.dw.com/de/wie-nachhaltig-sind-solarmodule-%C3%B6kobilanz-klima-recycling-blei-cadmium-photovoltaik/a-58850892> abgerufen
- Sánchez Molina, P. (2023). **Global PV manufacturing capacity to reach 1 TW by 2024**. Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2023/06/08/global-pv-manufacturing-capacity-to-reach-1-tw-by-2024/> abgerufen
- Santos, B. (2022). **PV InfoLink forecasts polysilicon prices to be halved by end of 2023**. Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2022/10/25/pv-infolink-forecasts-polysilicon-prices-to-be-halved-by-end-of-2023/> abgerufen
- savannah resources. (2023). **Barroso Lithium Project, Portugal – The most significant conventional lithium project in Europe**. Von <https://www.savannahresources.com/project/barroso-lithium-project-portugal/> abgerufen

- Schaal, S. (2022). **Umicore eröffnet Kathodenmaterialfabrik in Polen.** Von electrive.net: <https://www.electrive.net/2022/09/21/umicore-eroeffnet-kathodenmaterialfabrik-in-polen/> abgerufen
- Schaal, S. (2023a). **Glencore und Li-Cycle wollen Batterien auf Sardinien recyceln.** Von electrive.net: <https://www.electrive.net/2023/05/10/glencore-und-li-cycle-wollen-batterien-auf-sardinien-recyceln/> abgerufen
- Schaal, S. (2023b). **ACC eröffnet Batteriefabrik in Frankreich.** Von electrive.net: <https://www.electrive.net/2023/05/30/acc-eroeffnet-batteriefabrik-in-frankreich/> abgerufen
- Scherhauser, S., Part, F., & Beigl, P. (2021). **Das Sekundärressourcenpotenzial aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen.** Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 73, 36-48. doi:10.1007/s00506-020-00723-3
- Schüler, D. et al. (2011). **Study on Rare Earths and Their Recycling.** Darmstadt: Öko-Institut. Von <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf> abgerufen
- Schüler, D. et al. (2018). **Social, economic and environmental challenges in primary lithium and cobalt – STRADE European Policy Brief No. 06/2018.** Von https://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADE_PB_Li_Co_EMobility.pdf abgerufen
- Shaw, V. (2023a). **Trina Solar to expand n-type ingot capacity by 35 GW.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2023/02/09/trina-solar-to-expand-n-type-ingot-capacity-by-35-gw/> abgerufen
- Shaw, V. (2023b). **China added 87.41 GW of solar in 2022.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2023/01/18/china-added-87-41-gw-of-solar-in-2022/> abgerufen
- Shaw, V. (2023c). **Weekend Read: China's solar century.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2023/05/20/weekend-read-chinas-solar-century/> abgerufen
- Shaw, V.; Hall, M. (2022). **Chinese PV Industry Brief: JinkoSolar commissions 20 GW n-type ingot fab in Qinghai Province.** Von pv magazine: <https://www.pv-magazine.com/2022/07/05/chinese-pv-industry-brief-jinkosolar-commissions-20-gw-n-type-ingot-fab-in-qinghai-province/> abgerufen
- Sibanye-Stillwater. (2023a). **Sibanye-Stillwater's Keliber lithium project.** Von <https://www.sibanyestillwater.com/business/europe/keliber/> abgerufen
- Sibanye-Stillwater. (2023b). **Sibanye-Stillwater celebrates the foundation stone laying of the Keliber lithium refinery in Finland.** Von <https://www.sibanyestillwater.com/keliber-news/2023/keliber-lithium-refinery-foundation-stone-11may2023/> abgerufen
- Smolinka, T. et al. (2018). **Studie IndWEde – Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme.** Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie - NOW GmbH. Von https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie_v04.1.pdf abgerufen
- solarenergie.de. (2021a). **Dünnschicht-Solarmodule: Pro & Contra.** Von <https://solarenergie.de/solarmodule/arten/duennschicht-solarmodule> abgerufen
- solarenergie.de. (2021b). **Industrielle Solarzellen Herstellung.** Von <https://solarenergie.de/hintergrundwissen/solarenergie-nutzen/solarzellen/solarzellen-herstellung> abgerufen
- SolarPower Europe. (2023). **EU Solar Manufacturing Map.** Von <https://www.solarpowereurope.org/insights/interactive-data/solar-manufacturing-map> abgerufen

- Solarserver. (2021). **Solarzellen – Photovoltaik**. Von <https://www.solarserver.de/wissen/basiswissen/photovoltaik-typen-und-eigenschaften-von-solarzellen/> abgerufen
- SOLVAY. (2022). **Solvay to develop major hub for rare earth magnets in Europe; The Group is investing in the rare earths magnet value chain to serve fast growing electric vehicles, clean energy and electronics markets**. Von <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-develop-major-hub-rare-earth-magnets-europe> abgerufen
- SOLVAY. (2023). **Solvay and Cyclic Materials sign Memorandum of Understanding for circular rare earth elements, MOU further reinforces both companies' strategy to develop a European supply chain for rare earth permanent magnets**. Von <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-and-cyclic-materials-sign-memorandum-understanding-circular-rare-earth> abgerufen
- Stahl, H., Mehlhart, G., Gsell, M., et al. (2021). **Assessment of options to improve particular aspects of the EU regulatory framework on batteries – Final report**. European Commission, Directorate-General for Environment. Luxemburg: Publications Office of the European Union. Von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/78f09953-8c53-11eb-b85c-01aa75ed71a1/language-en> abgerufen
- Statista. (2022). **Market share of the solar PV inverter market worldwide in 2021, based on shipments**. Von <https://www.statista.com/statistics/1003705/global-pv-inverter-market-share-shipments/> abgerufen
- Stockhead. (2021). **Infinity takes San Jose lithium plan underground as EU demand grows – Mining News**. Von <https://stockhead.com.au/resources/infinity-takes-san-jose-lithium-plan-underground-as-eu-demand-grows/> abgerufen
- STRADE. (2016). **Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe**. Von <https://www.stradeproject.eu/home> abgerufen
- SUSMAGPRO. (2023). **Sustainable Recovery, Reprocessing and Reuse of Rare Earth Magnets in a European Circular Economy**. Von <https://www.susmagpro.eu/> abgerufen
- TAZ. (2023). **Der Schatz vom Jadar-Tal**. Von <https://taz.de/Umstrittenes-Lithium-aus-Serbien/!5899786/> abgerufen
- Telsnig, T., Georgakaki, A., & Letout, S. (2022). **Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets**. Publications Office of the European Union.
- Terrafame. (2023). **Battery chemicals – Reducing transport emissions one battery at a time**. Von <https://www.terrafame.com/offering/battery-chemicals.html> abgerufen
- The Chemical Engineer. (2022). **UK set to host rare earths processing hub in push for cleantech security**. Von <https://www.thechemicalengineer.com/news/uk-set-to-host-rare-earths-processing-hub-in-push-for-cleantech-security/> abgerufen
- Totaro, P. (2022). **Chinese wind turbine makers in a better place than ever to start displacing western OEMs**. Von Recharge: <https://www.rechargenews.com/wind/chinese-wind-turbine-makers-in-a-better-place-than-ever-to-start-displacing-western-oems/2-1-1196826> abgerufen
- Turovski, M. (2022). **Silmet owner to construct €100 million magnet factory in Narva**. Von ERR: <https://news.err.ee/1608783190/silmet-owner-to-construct-100-million-magnet-factory-in-narva> abgerufen

- U.S. Department of Energy. (2022a). **Water Electrolyzers and Fuel Cells Supply Chain**. Von <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Fuel%20Cells%20%26%20Electrolyzers%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf> abgerufen
- U.S. Department of Energy. (2022b). **America's Strategy to Secure the Supply Chain for a Robust Clean Energy Transition**. Von <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/FuelProzent20CellsProzent20Prozent-26Prozent20ElectrolyzersProzent20SupplyProzent20ChainProzent20ReportProzent20-Prozent20Final.pdf> abgerufen
- U.S. Geological Survey. (2010). **Mineral Commodity Summaries**. Von <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2010.pdf> abgerufen
- U.S. Geological Survey. (2013). **Mineral Commodity Summaries**. Von <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mineral2013> abgerufen
- U.S. Geological Survey. (2023). **Mineral Commodity Summaries**. Von USGS: <https://doi.org/10.3133/mcs2023> abgerufen
- United Lithium. (2021). **European GIGAFACTORIES**. Von <https://unitedlithium.com/projects/sweden/> abgerufen
- VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. (2014). **Selten-Erd-Dauermagnete Vacodym – Vacomax**. Von https://vacuumschmelze.de/03_Documents/Brochures/VACODYM-VACOMAX%20de.pdf abgerufen
- van Nielen, S. et al. (2023). **Journal of Cleaner Production – Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows**. Von https://research.tudelft.nl/files/148277200/1_s2.0_S0959652623004109_main.pdf abgerufen
- Werwitzke, C. (2023b). **XTC und Orano planen Kathodenmaterial-Werk in Dünkirchen**. Von [electrive.net: https://www.electrive.net/2023/05/15/xtc-und-orano-planen-kathodenmaterial-werk-in-duenkirchen/](https://www.electrive.net/2023/05/15/xtc-und-orano-planen-kathodenmaterial-werk-in-duenkirchen/) abgerufen
- Wicke, T. (2023). **Ausgangsmaterialien von Batterien – die asiatische Dominanz bei Batteriekomponenten**. Von Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/batterien-ausgangs-materialien-asiatische-dominanz-bei-batteriekomponenten.html> abgerufen
- Xiao, S. et al. (2022). **Uncovering the Key Features of Dysprosium Flows and Stocks in China**. Von <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c07724> abgerufen
- Xinyi Solar. (2022). **Introduction**. Von <https://www.xinyisolar.com/en/aboutus/index.aspx#page1> abgerufen
- ZEIT (2023). **BASF plant keinen Stellenabbau am Standort Schwarzheide**. Von <https://www.zeit.de/news/2023-02/24/basf-plant-keinen-stellenabbau-am-standort-schwarzheide> abgerufen
- Zinnwald Lithium. (2023). **Zinnwald-Lithium-Project, Zinnwald – 100 % interest and operational control**. Von <https://www.zinnwaldlithium.com/projects/zinnwald-lithium-project/> abgerufen

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



Spanische Fassung

