

Kritische Rohstoffe

Substitution als Minderungsstrategie für die Kritikalität von Rohstoffen, die für Umwelttechnologien benötigt werden

Von Stefanie Degreif, Matthias Buchert, Winfried Bulach, Siegfried Behrendt und Felix Müller

Zitierweise: Degreif, Stefanie; Buchert, Matthias; Bulach, Winfried; Behrendt, Siegfried; Müller, Felix: Kritische Rohstoffe Substitution als Minderungsstrategie für die Kritikalität von Rohstoffen, die für Umwelttechnologien benötigt werden. in: ReSource, 30. Jg., 4/2017, S. 9-17, Rhombos-Verlag, Berlin, ISSN: 1868-9531.

Dipl.-Geogr.
Stefanie Degreif
Wissenschaftliche
Mitarbeiterin im Bereich
Ressourcen & Mobilität,
Öko-Institut e.V.,
Darmstadt



Dr.-Ing.
Matthias Buchert
Bereichsleiter
Ressourcen & Mobilität
Öko-Institut e.V.,
Darmstadt



Dr.-Ing.
Winfried Bulach
Wissenschaftlicher
Mitarbeiter im Bereich
Ressourcen & Mobilität,
Öko-Institut e.V.,
Darmstadt



Dr. Dipl.-Pol.,
Dipl.-Biol.
Siegfried Behrendt
Forschungsleiter „Techno-
logie und Innovation“
IZT - Institut für Zukunfts-
studien und Technologie-
bewertung gGmbH, Berlin



Dipl.-Wirtsch.-Chem.
Felix Müller
Umweltbundesamt, FG III
2.2 – Ressourcenschonung,
Stoffkreisläufe, Mineral-
und Metallindustrie,
Dessau-Roßlau



Das Öko-Institut in Darmstadt und das Berliner Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) führen seit August 2014 im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) das Projekt *Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien* (SubSKrit) durch. Das UFOPLAN-Forschungsvorhaben (FKZ: 3714 93 316 0), das aus Bundesmitteln finanziert wird, läuft bis Februar 2018. Die Zielsetzung des Vorhabens besteht darin, eine Roadmap für die Substitution von kritischen Rohstoffen zu erarbeiten, die für Umwelttechnologien verwendet werden. Diese Roadmap soll aufzeigen, welche Substitutionsmaßnahmen wesentlich dazu beitragen können, dass Umwelttechnologien zukünftig auch dann ausgebaut werden können, wenn mit steigenden Risiken im Rohstoffbereich zu rechnen ist. Berücksichtigt werden sollen hierbei die langen Vorlaufzeiten, die Hemmnisse und begünstigenden Faktoren der Entwicklungen vom Forschungsstadium bis zur Marktreife und zur Marktdurchdringung. Die Roadmap soll einen wichtigen Beitrag bei der Umsetzung und Fortentwicklung der nationalen Rohstoffstrategie und des deutschen Ressourceneffizienzprogramms leisten und Impulse in die nationale und internationale politische Debatte einfließen lassen. Dazu werden nicht nur Maßnahmen identifiziert, sondern auch die verantwortlichen Akteure und Instrumente benannt sowie externe Experten in das Projekt einbezogen.

Keywords:

Substitution, Umwelttechnologie, Green Economy, Ressourceneffizienz, Kritikalität, Versorgungsrisiko, Vulnerabilität, kritische Rohstoffe, Öko-Institut, IZT, UBA

1 Substitution als Strategie zur Ressourcenschonung

Der Ausbau und der Einsatz innovativer Umwelttechniken zählen zu den wichtigsten Zukunftsfaktoren für eine Steigerung der Ressourceneffizienz und für eine Transformation zur Green Economy. Viele Umwelttechniken sind essentiell auf den funktionalen Einsatz von speziellen Rohstoffen angewiesen, für die sich schon heute vielfältige Versorgungsrisiken abzeichnen. Für diese sogenannten kritischen Rohstoffe führt die Europäische Kommission regelmäßig Listen [5]. Eine Studie für die Kreditanstalt für Wiederaufbau untersuchte die Risiken in Bezug auf die Versorgung Deutschlands mit mineralischen Rohstoffen [4]. Demzufolge sind die identifizierten kritischen Rohstoffe für viele Umwelttech-

nologien insbesondere für den nachhaltigen Umbau der Energieversorgung von herausragender Bedeutung. Es ist absehbar, dass Effizienz- und Recyclingstrategien allein nicht ausreichen werden, um deren Kritikalität entscheidend zu mindern und einen tiefgreifenden Ausbau maßgeblicher Umwelttechnologien nicht nur in Industrienationen wie Deutschland, sondern auch weltweit zu gewährleisten. Es bedarf zusätzlich einer vorausschauenden Orientierung auf Substitutionsstrategien. Im Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung (ProgRes) wird in dieser Hinsicht ein erheblicher Forschungsbedarf attestiert. Als zielführend werden Maßnahmen betrachtet, die es ermöglichen, seltene und strategische Metalle durch Rohstoffe mit geringeren Umweltbelastungen zu substituieren beziehungsweise zu unterstützen. Um dem

besonderen Interesse Deutschlands als Nachfrager, Produzent, Exporteur und Technologieführer gerecht zu werden, wird die Bundesregierung die Substitutionsforschung systematisch intensivieren und ein Konzept für die Substitution kritischer Rohstoffe für Umwelt- und sonstige Technologien entwickeln und umsetzen [3].

Betrachtet man die Substitutionsoptionen, dann ist es wichtig, die Ressourceneffizienzpotentiale, aber auch mögliche Mehrbelastungen zu untersuchen. So benötigen beispielsweise Windenergieanlagen ohne Seltene Erden deutlich mehr Kupfer, was mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden ist. Eine vergleichende Bewertung von Technologien ist daher ausgesprochen wichtig. Hierbei ist die Art der Substitution maßgeblich. Während Substitutionen bereits auf Materialebene durch den Austausch eines einzigen Werkstoffs erfolgen können, erstrecken sich diese auch auf gänzlich neue Faktorkombinationen, mit neuen technologischen Konzepten und Funktionsweisen [12], [15]. Alle Ausprägungen der Substitutionen stellen auch Qualitätssubstitutionen dar, die in unterschiedlichem Maße die wirtschaftliche, ökologische oder technische Leistung beeinflussen (Abbildung 1).

2 Das Projekt SubSKrit, seine Ziele und sein aktueller Stand

Das Projekt *Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien* (SubSKrit, FKZ: 3714 93 316 0) gliedert sich in folgende sechs Arbeitspakete (AP):

- AP 1: **Systematisierung und Screening: Entwicklung einer Auswahlmethodik zum Screening von Umwelttechnologien**
- AP 2: **Funktionaler Materialbedarf: Abschätzung des funktionalen Materialbedarfs für 40 prioritäre Umwelttechnologien**
- AP 3: **Kritikalitätsanalyse: Kritikalitätsanalyse zur Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien**
- AP 4: **Substitutionspotentialscreening: Screening und vertiefte Analysen zu ausgewählten Substitutionen**
- AP 5: **Kritikalitätsauswirkungen: Mehrdimensionale Analyse der Kritikalitätsauswirkungen**
- AP 6: **Roadmap: Ausarbeitung einer Substitutions-Roadmap.**

Anfang 2017 befand sich das Projekt in der Phase der Untersuchung der Kritikalitätsauswirkungen (AP 5). In einem Fachgespräch mit Stakeholdern¹ aus Industrie, Wissenschaft und Administration im Herbst 2016 wurden die Substitutionsoptionen ausgewählter Umwelttechnologien intensiv diskutiert.

In den folgenden Kapiteln werden die Zwischenergebnisse des Projektes SubSKrit zusammengefasst und an ausgewählten Beispielen veranschaulicht. Abschließend wird ein Ausblick über die weiteren Projektaktivitäten gegeben.

3 Auswahl der 40 prioritären Umwelttechnologien und Rohstoffe im Fokus des Projektes

Das Projekt begann mit einer breit angelegten Auswahl an 115 Umwelttechnologien (UT). Im Anschluss an das Screening und der Festlegung der 115 Umwelttechnologien wurde eine Auswahlmethodik entwickelt, um 40 Umwelttechnologien für die weitere Bearbeitung zu selektieren.

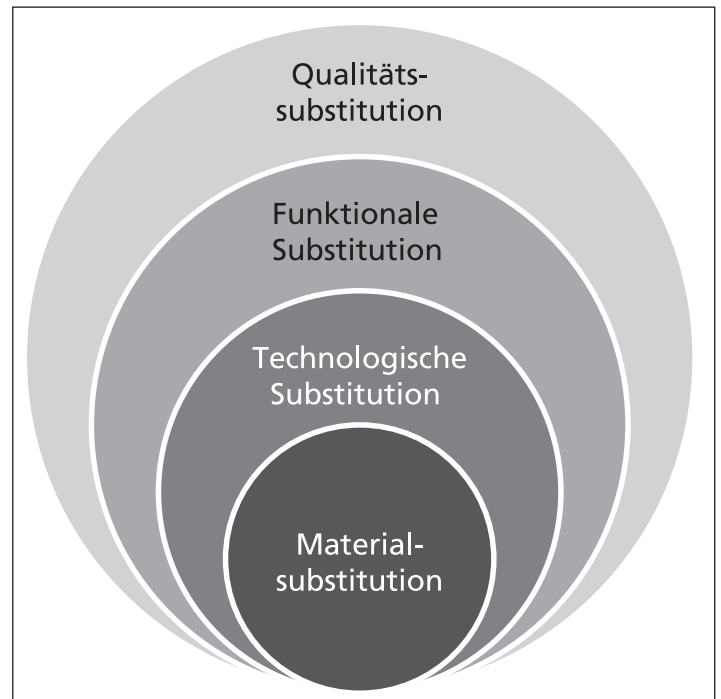


Abbildung 1: Schematische Klassifikation der Substitutionsformen

3.1 Auswahl der vierzig prioritären Umwelttechnologien

In einem ersten Schritt wurden 115 Umwelttechnologien aus verschiedenen Quellen wie dem *GreenTech Made in Germany 4.0 – Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland* [2] oder *Ressourcenschonung durch ausgewählte grüne Zukunftstechnologien* [9] zusammengetragen und mit dem UBA und dem BMUB abgestimmt. Diese Umwelttechnologien wurden nach dem GreenTech-Atlas in folgende sechs Leitmärkte unterteilt. In Klammern ist jeweils ein Beispiel einer UT genannt:

- Umweltfreundliche Energien und Speicherung (etwa Li-Ionen-Batterien für Fahrzeuge),
- Energieeffizienz (etwa Celitement),
- Rohstoff- und Materialeffizienz (etwa Precision Farming),
- Nachhaltige Mobilität (etwa Elektroantriebsmotoren),
- Kreislaufwirtschaft (etwa Automatische Stofftrennverfahren),
- Nachhaltige Wasserwirtschaft (etwa Phosphatrückgewinnung).

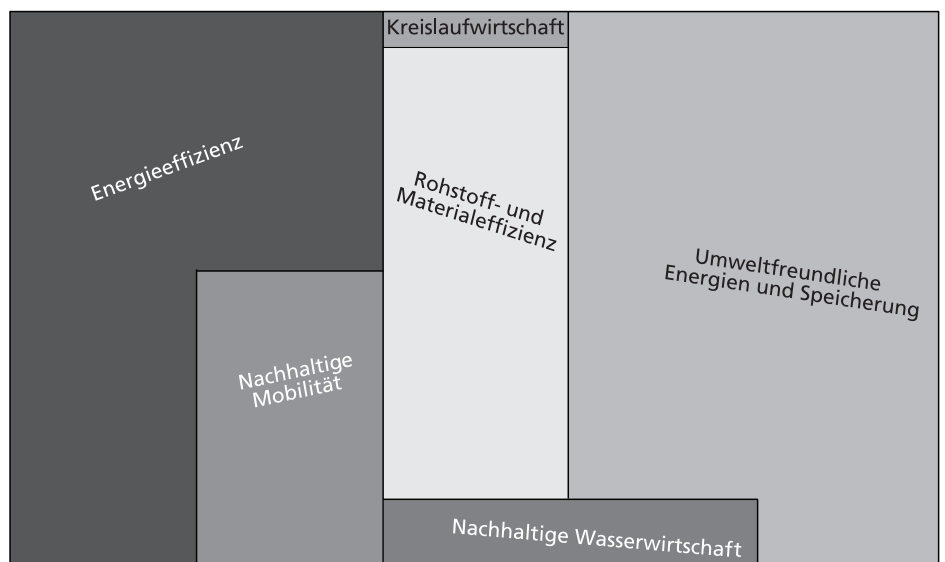


Abbildung 2: Übersicht der Leitmärkte

Kompakte Fluoreszenzlampen Kompressoren Varistoren	Ultradieps Grüne Rechenzentren Weiße LED	Automatische Stofftrennverfahren Service Roboter	Redox-Flow Batterie Zn-Luft Batterie Ni-Cd-Batterie	CSP Technologie Gas to Liquid (GtL) Coal to Liquid (CtL)
Organische Elektronik (Polymerelektronik)	Organische Leuchtdioden (OLED)	Maßgeschneiderte Katalysatoren Kunststoffherstellung aus verholzter Biomasse	Li-Ionen Batterien: portable Anwendungen	Nox-Speicherkatalysator: ohne Autoabgaskatalysator
Keramik-Metallhalogenid- Lampen	LED f. Hintergrundbeleuchtung LCD	Biokatalyse-Anlagentechnik	Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge	Thermoelektrische Energieumwandlung
Frequenzrichter	RFID	Bleifreie Lote	Na-S Batterie	PEM-Brennstoffzelle
Membranelektrolyse Chlor-Alkali	Trichromatische Fluoreszenzlampen	Nanobeschichtung von Oberflächen	Li-Ionen-Stromspeicher	SOFC-Brennstoffzelle für stationäre Anlagen
Aerogele	T5 Leuchtstoffröhren	Korrosionsfeste Superlegierung	Supercaps	Brennstoffzelle f. mob. Geräte
Metallbeschichtungen auf Gläsern	Bewegungs- und Präsenzsteuerung	Hochwärmefeste Superlegierungen	Permanentmagnet-Generatoren	Metallhydrid-Speicher
Corex/Finex-Verfahren für Stahl	Hochwirkungsgrad- Nass- und Trockenläufer	Hochleistungs-Permanent- magnete: Industrie	Urbane Abwärmequellen (Kanalisation, Verkehrssysteme)	Kraftwerke – Gas- und Dampfturbine
Neue Chipgenerationen	Pedelects	Anorganische Nanokomposite	Nano-Speichermaterialien	Carbon Capturing CC
Sensitive schaltbare Gläser	Oberleitungs-LKW	Formgedächtnis-Legierungen	Speicherkraftwerke	Schwarmkraftwerk
Industrie-Elektromotoren	Hybridmotoren	Metallschäume	Supraleitende Spulen	ORC Organic Rankine Cycle
Thin Clients	Elektroantriebsmotoren	3D Drucker	Synchron-Generatoren	Tiefengeothermie
Schwermetallfreier	Selbstfahrende Kraft- und Lastfahrzeuge	Carbon Nanotubes (CNTs) für Stromleitungen und Drähte	Asynchron-Generatoren	Mikrogasturbinen
Korrosionsschutz für Metalle	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke	Carbon Nanotubes (CNTs) für Katalysatoren	Direktantrieb	Stirlingmotor
ULCOS-BF / ULCOWIN / ULCORED / ULCOS	Adaptive systems	Hochtemperatur-Supraleiter	Reluktanz-Generatoren	Dünnschicht-Solarzellen
Celitement	Real Time Traffic Information und Online-Vernezung	Me-Schlacken- und P- Klärschlamm-aufbereitung	Monokristalline Siebdrucksolazellen	Farbstoffzellen (Grätzel-DSC-Zellen)
Sensoren für Energie-Wasser- Optimierung	Fahrzeug-Abgas-Katalysator	Mikroreaktionstechnik	Power to gas (PtG)	HTS-Generatoren
Hochwirkungsgradmotoren	Karosserie	Precision Farming	Power to liquid (PtL)	Tandemzellen
Smart Meter	Katalytischer Kraftstoffzusatz	Dezentrale Wasseraufbereitung	Ultrafiltration	Si-Dünnschicht
Mikro-KWK	BtL-Kraftstoffe	Solare Meerwasserentsalzung	Phosphorrückgewinnung	Si-Dickschichtzellen
Erdwärmepumpen	Leichtbau (Titan und Scandium airframe)	Umkehrosiose (hochpermeable Membranen)	Wassereffizienztechnologien	SCR Selektive Katalytische Reduktion: ohne Autoabgaskat.
Membranelektrolyse Chloralkali mit Sauerstoffverzehrkathode				

Abbildung 3: Übersicht der 115 Umwelttechnologien in den Leitmärkten

Kompressoren	Weiße LED	Fahrzeug-Abgas- Katalysator	Celitement	Hybridmotoren
RFID	Pedelects	Aerogele	Precision Farming	Grüne Rechenzentren
Li-Ionen-Strom- speicher	Reluktanz- Generatoren	Bleifreie Lote	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke	Speicherkraftwerke
CSP Technologie	Nanobeschichtung von Oberflächen	Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge	Kraftwerke – Gas- und Dampfturbine	Permanentmagnet- Generatoren
HTS Generatoren	Elektroantriebs- motoren	Phosphor- rückgewinnung	Dünnschicht- Solarzellen	Synchron-Generator
Wassereffizienz- technologien	Organische Leucht- dioden (OLED)	Industrie- katalysatoren	Tandemzellen	Asynchron- Generator
Automatische Stofftrenn- verfahren	Me-Schlacken- und P-Klärschlamm- aufbereitung	Umkehrosiose (hochpermeable Membranen)	Si-Dickschicht- zellen	Dezentrale Wasseraufbereitung
Karosserie	Leichtbau (Titan und Scandium Airframe)	Hochleistungs- Permanentmagnete: Industrie- anwendungen	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Membranelektrolyse Chloralkali mit Sauerstoff- verzehrkathode

Tabelle 1: Die ausgewählten 40 Umwelttechnologien (Farbgebung entspricht den unterschiedlichen Leitmärkten, hier in Grautönen dargestellt)

Antimon	Germanium	Natürlicher Graphit	Silber
Arsen	Gold	Neodym	Silizium (metallisch)
Barium	Hafnium	Nickel	Strontium
Beryllium	Holmium	Niob	Tantal
Bismut	Indium	Osmium	Tellurium
Blei	Iridium	Palladium	Terbium
Borat	Kobalt	Phosphat	Thallium
Cadmium	Kokskohle	Platin	Thulium
Cer	Kupfer	Praseodym	Titandioxid
Chrom	Lanthan	Quecksilber	Vanadium
Dysprosium	Lithium	Rhenium	Wolfram
Erbium	Lutetium	Rhodium	Ytterbium
Europium	Magnesit	Ruthen	Yttrium
Fluorspar	Magnesium	Samarium	Zink
Gadolinium	Mangan	Scandium	Zinn
Gallium	Molybdän	Selen	Zirkon

Tabelle 2: 64 Rohstoffe im Fokus des Projektes

In den folgenden Abbildungen sind die Umwelttechnologien in einer Übersicht nach den Leitmärkten dargestellt.

Im Anschluss an die Auswahl der 115 Umwelttechnologien wurden diese bewertet auf Basis von drei Kriterien:

- Relatives Umweltentlastungspotenzial
- Globale Marktdynamik
- Relevanz für die deutsche Wirtschaft

Diese Einschätzungen wurden zusätzlich gewichtet. Auf Basis dieser Analyse wurden aus den 115 Umwelttechnologien in Abstimmung mit dem UBA 40 Umwelttechnologien für die weitere Bearbeitung im Projekt SubS-Krit ausgewählt (siehe Tabelle 1).

Für die 40 ausgewählten Umwelttechnologien wurden im nächsten Schritt spezifische und absolute Materialbedarfe ermittelt sowie ein nationales und internationales Business-As-Usual- und Green-Economy-Szenario für die Jahre 2025 und 2050 hergeleitet.

3.2 Rohstoffe im Fokus des Projektes

Im Fokus des Projektes standen zu Beginn 64 Rohstoffe. Diese wurden ausgewählt zum einen aus der Liste des UNEP International Resource Panel (ohne Eisen und Aluminium) und der Liste der kritischen Rohstoffe der Europäischen Kommission [5]. In Tabelle 2 sind die 64 Rohstoffe in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

4 Funktionale Materialbedarfe der 40 ausgewählten Umwelttechnologien

In AP 2 wurden die spezifischen und absoluten Materialbedarfe der betrachteten Rohstoffe für die 40 ausgewählten Umwelttechnologien für das Jahr 2013 identifiziert und

anschließend die Materialbedarfe für 2025 und 2050 in einem nationalen und globalen BAU- und GE-Szenario errechnet.

Das Business-As-Usual-Szenario geht bei den jeweiligen Technologien von absehbaren Entwicklungen aus. Demgegenüber nimmt das Green-Economy-Szenario eine weitgehende Durchdringung der jeweiligen Umwelttechnologien an.

Die spezifischen Materialbedarfe sowie die Entwicklung in den Szenarien stammen aus Literaturrecherchen, eigenen Quellen des Projektteams oder aus Interviews mit Fachleuten.

Am Beispiel der Umwelttechnologie Elektroantriebsmotoren für Elektrofahrzeuge werden im folgenden Kapitel das Vorgehen und die Ergebnisse veranschaulicht. Anschließend werden am Beispiel von Dysprosium die Szenario-Ergebnisse erläutert.

4.1 Beispiel: Umwelttechnologie Elektroantriebsmotoren

In der Umwelttechnologie *Elektroantriebsmotoren* sind Elektroantriebsmotoren für vollelektrische Pkw (BEV), Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sowie für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) zusammengefasst. Letztere verfügen neben einem Verbrennungsmotor über einen Elektromotor, der von einer Batterie mit Ladean-

schluss (*Plug-In*) gespeist wird. Diese Umwelttechnologie fokussiert auf permanent erregte Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten als Ausgangstechnologie [1] [6].

Die spezifische Einheit der Elektroantriebsmotoren ist der Synchronmotor mit Permanentmagnet mit einer Leistung >50 kW je PHEV/BEV/FCEV. Die Materialzusammensetzung der Elektromotoren für BEV/PHEV/FCEV ist im BMUB-Projekt *Optum-Ressourcen* [1] ausführlich hergeleitet und beschrieben worden. Auf Basis dieser Angaben wurden die absoluten Materialbedarfe für diese Umwelttechnologie mit Hilfe der Neuzulassungen errechnet. Die nationalen Neuzulassungen wurden aus [11], die globalen Neuzulassungen aus [8] und [14] abgeleitet. Die absoluten Neuzulassungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Daraus wurden die absoluten Materialbedarfe in den globalen Szenarien bestimmt.

Als relevante Rohstoffe wurden einerseits die Seltenen Erden Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium andererseits aber auch Gallium und Kupfer identifiziert. In Tabelle 4 erkennt man die deutlichen Steigerungen der Materialbedarfe bei einer weitgehenden Elektrifizierung im Green-Economy-Szenario im Vergleich zum Business-As-Usual-Szenario.

4.2 Beispiel: Szenario-Ergebnisse Dysprosium

In Abbildung 4 sind die Szenario-Ergebnisse für das Seltenerdmetall Dysprosium über alle vierzig untersuchten Umwelttechnologien dargestellt. Dysprosium wird fast ausschließlich als Zusatz für Neodym-Eisen-Bor-Magnete eingesetzt, welche höheren Temperaturen ausgesetzt sind. Der Zusatz von Dysprosium ist für die funktionelle Langlebigkeit dieser Permanentmagnete unter Temperaturbeanspruchung sehr wichtig.

Der Dysprosiumbedarf für alle 40 untersuchten Umwelttechnologien wird der Primärgewinnung 2013 gegenübergestellt. Aus Abbildung 4 wird deutlich, dass nur für die untersuchten Umwelttechnologien alleine bereits für das Jahr 2025 nach dem globalen Business-As-Usual-Szenario (fast 1.300 Tonnen) und erst recht nach dem Green Economy-Szenario (mehr als 4.000 Tonnen) die Größenordnung der Primärgewinnung 2013 (knapp 1.400 Tonnen) fast erreicht beziehungsweise deutlich übertroffen wird.

Die Dynamik des globalen Dysprosiumbedarfs für 2025 wird entscheidend durch den Leitmarkt Nachhaltige Mobilität induziert (90 % im BAU bzw. 96 % im GE-Szenario).

Im globalen GE-Szenario entfallen 2025 innerhalb des Leitmarktes Nachhaltige Mobilität 73 % des Dysprosiumbedarfs auf Elektromotoren für BEV, PHEV und FCEV, 26 % auf Hybrid-Pkw, und 1 % auf Pedelecs. Die unterstellte Dynamik der Entwicklung der Elektromobilität ist demnach der entscheidende Treiber für den Dysprosiumbedarf, ungeachtet der bereits für 2025 unterstellten Reduktion des prozentualen Dysprosiumgehalts an den entsprechenden Neodym-Eisen-Bor-Magneten.

5 Kritikalitätsanalyse

Ziel der Kritikalitätsanalyse ist es, die ausgewählten 40 Umwelttechnologien in Bezug auf die Kritikalität ihres Materialbedarfs zu untersuchen. Als Ergebnis der Kritikalitätsanalyse wurden 20 Um-

	Business-As-Usual-Szenario		Green-Economy-Szenario		
	2013	2025	2025	2050	
National					
PHEV, BEV, FCEV	7.436	266.000	1.031.000	618.000	2.528.700
Global					
PHEV, BEV, FCEV	178.623	4.530.900	31.946.600	24.165.200	152.100.500

Tabelle 3: Nationale und globale Neuzulassungen von BEV, PHEV, FCEV im „Business-As-Usual“- und „Green-Economy“-Szenario in 2013, 2025 und 2050

	2013	Business-As-Usual-Szenario		Green-Economy-Szenario	
		2025	2050	2025	2050
	t/a				
Dysprosium	38	544	3.800	2.900	18.300
Gallium	0,2	4,5	32	24	152
Kupfer	2.300	57.100	402.500	304.500	1.916.000
Neodym	64	2.000	14.400	10.900	68.400
Praseodym	21	544	3.800	2.900	18.300
Terbium	4,3	109	767	580	3.700

Tabelle 4: Absoluter Materialbedarf global für die Umwelttechnologie Elektroantriebsmotoren

welttechnologien ausgewählt, welche im darauffolgenden Arbeitsschritt auf ihr Substitutionspotential hin untersucht wurden.

Folgende Schritte wurden bei der Kritikalitätsanalyse durchgeführt:

- Schritt 1: Ranking der relevanten Rohstoffe
- Schritt 2: Ranking der Umwelttechnologien
- Schritt 3: Sensitivitätsanalyse
- Schritt 4: Auswahl der 20 Umwelttechnologien für die weitere Bearbeitung hinsichtlich der Substitutionsoptionen

Das Ranking der Rohstoffe wurde durch eine Methodologie mit folgenden drei Dimensionen durchgeführt:

1. Versorgungsrisiko
2. Ökologisches Schadenspotenzial
3. Strategische Bedeutung

Für jede Dimension wurde eine eigene methodische Grundlage genutzt, um eine Charakterisierung zu ermöglichen. Anschließend wurde ein Gesamtranking je Rohstoff durchgeführt. Für jede Dimension wurde ein Ranking auf Rohstoffebene erstellt, welches im zweiten Schritt auf die Umwelttechnologien übertragen wurde, um die Auswahl der 20 Umwelttechnologien zu erreichen.

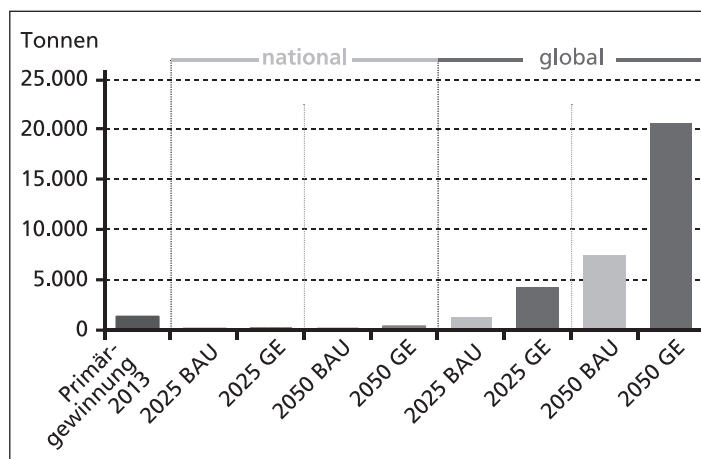


Abbildung 4: Absolute Materialbedarfe Dysprosium im Vergleich zur Primärgewinnung 2013

Geologische, technische und strukturelle Indikatoren	Geopolitische und regulatorische Indikatoren	Ökonomische Indikatoren
Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen
Grad der Koppelproduktion/ Nebenproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	Grad der Nachfragesteigerung
Verbreitungsgrad funktionaler EoL-Recyclingtechnologien	Politisches Länderrisiko	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen
Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	Regulatorisches Länderrisiko	Annualisierte Preisvolatilität
Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugelände		

Tabelle 5: Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2

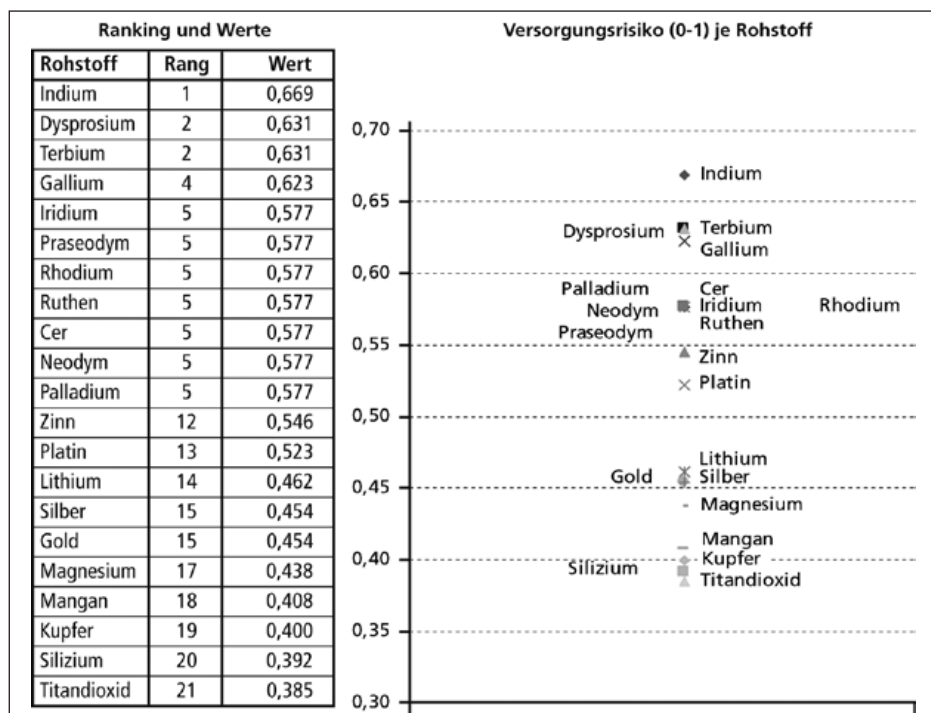


Abbildung 5: Rohstoffranking des Versorgungsrisikos

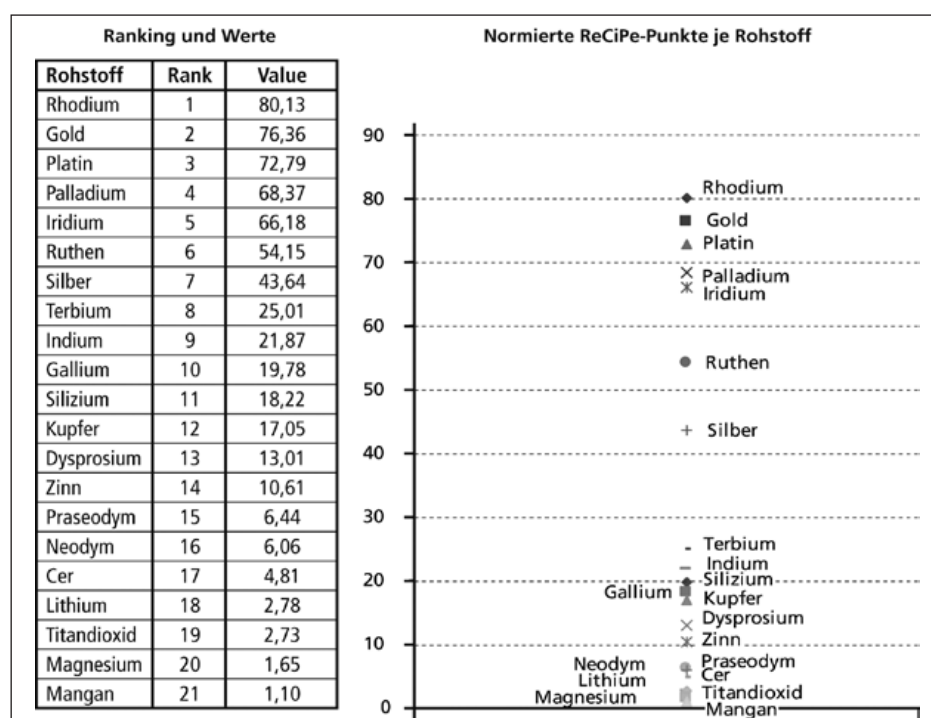


Abbildung 6: Rohstoffranking des ökologischen Schadenspotentials

5.1 Ranking der relevanten Rohstoffe
Das Ranking der Rohstoffe erfolgt in den Dimensionen Versorgungsrisiko, ökologisches Schadenspotenzial und strategische Bedeutung sowie in einem Gesamtranking.

5.1.1 Ranking des Versorgungsrisikos

Für die *Kritikalitätsdimension Versorgungsrisiko* wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands [13] genutzt. Die Richtlinie basiert auf einem System von 13 Indikatoren, die in drei Gruppen eingeteilt sind. In Tabelle 5 sind die Indikatoren dargestellt.

Das *Rankingergebnis des Versorgungsrisikos* illustriert Abbildung 5. Indium liegt auf dem höchsten Rang und ist somit im Versorgungsrisiko als der kritischste Rohstoff eingestuft. Es folgen die schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium auf dem 2. Rang und Gallium auf Rang 4. Sieben Rohstoffe – Edelmetalle und Seltene Erden – belegen gemeinsam den 5. Rang (Iridium, Rhodium, Ruthenium, Palladium, Praseodym, Neodym, Cer). Am Ende des Rankings (Rang 17–21) – also die am wenigsten kritischen Rohstoffe im Versorgungsrisiko – finden sich Magnesium, Mangan, Kupfer, metallisches Silizium und Titandioxid.

5.1.2 Ranking des ökologischen Schadenspotentials

Für die *Kritikalitätsdimension ökologisches Schadenspotenzial* wird auf die Daten und die Methodik von Graedel et al. aus der Veröffentlichung *Criticality of metals and metalloids* [7] zurückgegriffen. Graedel hat in dieser Veröffentlichung das ökologische Schadenspotenzial für die verschiedenen Elemente auf Basis der Datenbanken Ecoinvent 2.2 und 3 über die Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe [10] berechnet. Für das Ranking des ökologischen Schadenspotentials wurde auf die Endpoints Ökosysteme und menschliche Gesundheit zurückgegriffen.

Das *Rankingergebnis des ökologischen Schadenspotentials* (Abbildung 6) weist im Vergleich zum Versorgungsrisiko vor allem im oberen Teil des Rankings Verschiebungen auf. Die Edelmetalle Rhodium, Gold, Platin, Palladium, Iridium, Ruthenium und Silber besitzen das höchste Schadenspotenzial und belegen demzufolge die höchsten Ränge (Rang 1–7). Auf den unteren Rängen befinden sich – ähnlich wie beim Versorgungsrisiko – die Rohstoffe Mangan, Magnesium und Titandioxid.

5.1.3 Ranking der strategischen Bedeutung

Für die *Kritikalitätsdimension strategische Bedeutung* wird auf die Szenario-Ergebnisse

der Materialbedarfe zurückgegriffen. Hierbei wird die strategische Bedeutung festgemacht am globalen Bedarf der 40 Umwelttechnologien im Green-Economy-Szenario für das Jahr 2025 in Relation zur globalen Primärförderung 2013. Das Element mit dem höchsten Bedarf in Relation zur Primärförderung wird auf Rang 1 gesetzt.

Das Rankingergebnis der *strategischen Bedeutung* zeigt Abbildung 7. Die Platingruppenmetalle Palladium, Ruthenium und Rhodium belegen die höchsten Ränge (1–3) gefolgt vom schweren Seltenerdmetall Dysprosium. Die niedrigsten Ränge werden belegt von metallischem Silizium (Rang 19), Mangan (20) und Gold (21). Das am höchsten gerankte Palladium weist im Green-Economy-Szenario 2025 einen Bedarf von 423 % durch die untersuchten UTs im Vergleich zur Primärförderung 2013 auf. Der Bedarf der Umwelttechnologien an der Primärförderung 2013 von Gold beträgt im GE-Szenario nur 3,3 %. Diese Betrachtung beinhaltet nicht das Recycling, da im Versorgungsrisiko das Kriterium Recycling abgebildet ist.

5.1.4 Gesamtranking

Der letzte Schritt in der Rohstoffsicht ist die Zusammenfassung der Kritikalitätsdimensionen. Jedem Element ist für jede der drei Kritikalitätsdimensionen nun ein Rang zugeordnet worden, wobei Rang 1 immer das kritischste und Rang 21 immer das unkritischste Element bezeichnet. Um diese Rohstoffsicht über alle drei Dimensionen nun auf die Sicht der Umwelttechnologien zu übertragen, müssen die drei Ränge der Elemente über die Kritikalitätsdimensionen zusammengefasst werden, um ein neues Ranking zu bilden. Dies geschieht über das Addieren der einzelnen Platzierungen und der Bildung eines Mittelwertes. Rhodium beispielsweise hat die Platzierungen 5 (Versorgungsrisiko), 1 (ökologisches Schadenspotential) und 3 (strategische Bedeutung). Zusammen ergibt sich also ein Wert von 9, der einem Mittelwert von 3 entspricht.

Da dies im Ergebnis der kleinste Mittelwert ist, befindet sich Rhodium im Gesamtranking auf Platz 1, hat also die höchste Kritikalität über alle drei Dimensionen. Dies wird für alle Elemente durchgeführt und die Mittelwerte werden nach ihrer Größe sortiert, wobei das Element mit dem kleinsten Wert (also der höchsten Kritikalität) auf dem ersten Platz landet und das Element mit dem höchsten Wert (also der niedrigsten Kritikalität) auf dem letzten Platz (21) landet.

Das Gesamtranking ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Platingruppenmetalle Rhodium, Palladium, Ruthenium und Iridium belegen hohe Ränge (Rang 1–4). Es folgen auf den Rängen 5 und 6 die schweren Seltenen Erden Terbium und Dysprosium. Rang 7 belegen gleichermaßen Indium und Platin. Die leichten Seltenen Erden Praseodym und Neodym liegen gemeinsam auf Rang 10, Silber und Zinn gemeinsam auf Rang 12 und Gold mit

Lithium auf Rang 15. Die unteren Ränge werden von Kupfer (17), Silizium (18), Magnesium (19), Titandioxid (20) und Mangan (21) besetzt.

Um die 20 prioritären Umwelttechnologien für die Untersuchung der Substitutionsoptionen auszuwählen, wurde das Ranking der Rohstoffe im folgenden Schritt auf die Umwelttechnologien übertragen.

5.2 Ranking der Umwelttechnologien

Für das Ranking der Umwelttechnologien wurden folgende vier relevante Größen herangezogen.

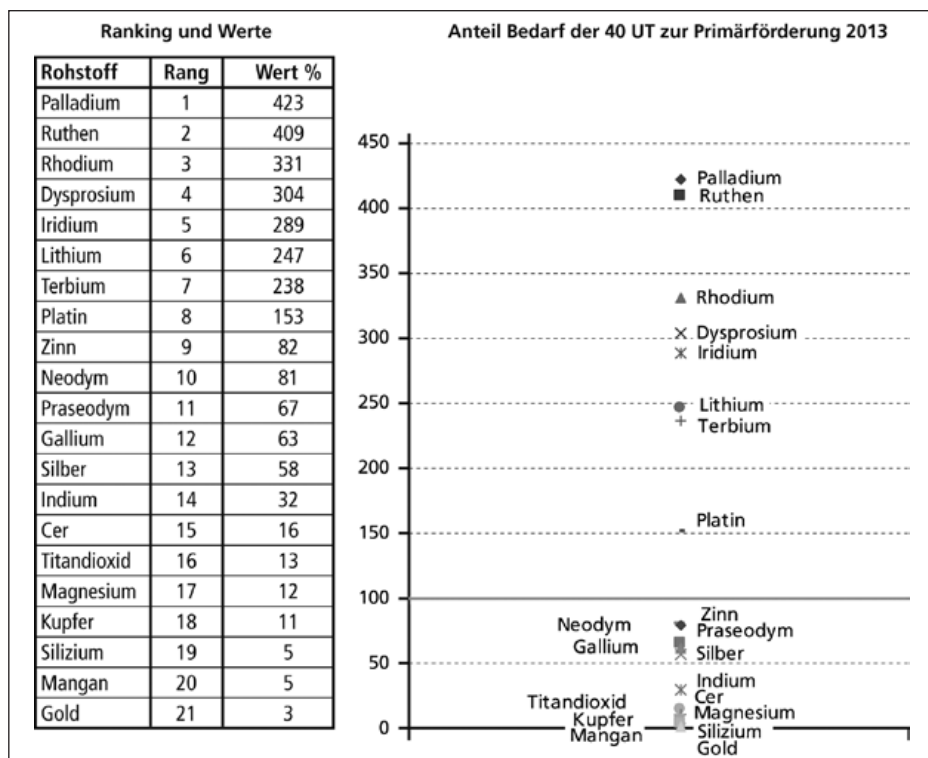


Abbildung 7: Rohstoffranking der strategischen Bedeutung

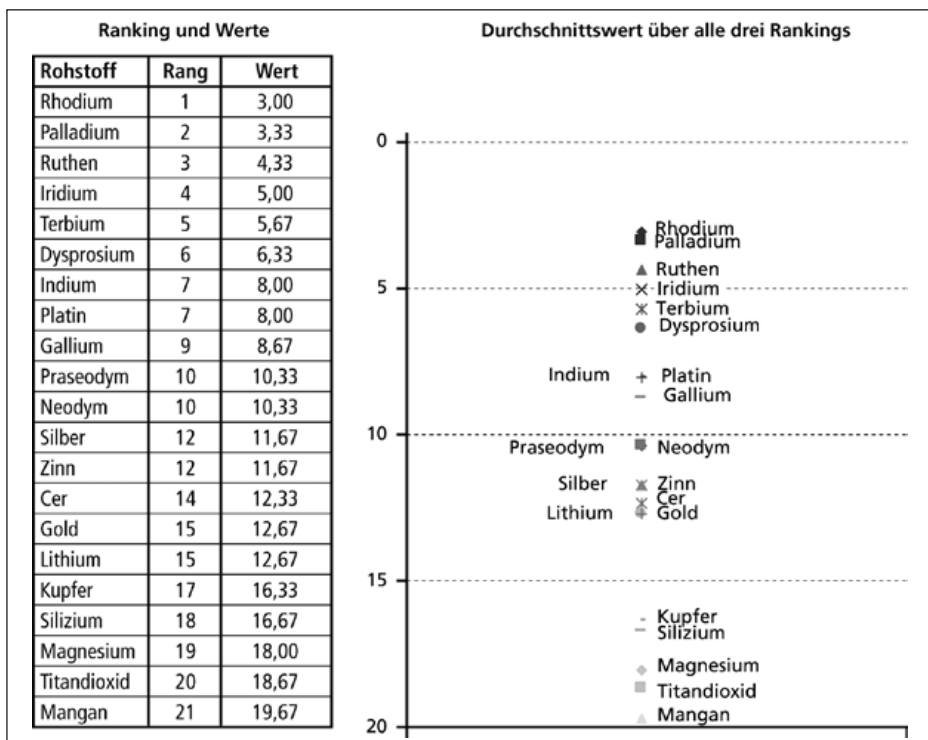


Abbildung 8: Gesamtranking der Rohstoffe

1. Höchstes einzelnes Rohstoffranking in der Umwelttechnologie
2. Mittelwert über alle Rohstoffe und Kritikalitätsbereiche der Umwelttechnologie
3. Anzahl relevanter Rohstoffe in der Umwelttechnologie
4. Für besondere Grenzfälle: Massenbedarf des entscheidenden Rohstoffes je Umwelttechnologie.

Der kritischste Rohstoff jeder Umwelttechnologie ist das erste Sortierkriterium, da dieser stets der limitierende Faktor ist. Als zweites Sortierkriterium folgt der Mittelwert über alle Rohstoffe und Kritikalitätsbereiche, da so gewährleistet wird, dass UTs die den gleichen kritischsten Rohstoff haben weiter sortiert werden. Das dritte Kriterium ist die Anzahl der relevanten Rohstoffe. Bei besonderen Grenzfällen, wenn die ersten drei Sortierkriterien noch zu keiner Differenzierung geführt haben, wird der Massenbedarf des entscheidenden Rohstoffes herangezogen.

Diese Methodik führt zu einer logisch begründeten Rangbildung der Umwelttechnologien und so zum Ziel der Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien.

Das durchgeführte Ranking führte zu einer Gruppe von 17 Umwelttechnologien, die eindeutig auf den ersten Plätzen gesetzt sind. Hierunter fallen Umwelttechnologien wie Katalysatoren, Permanentmagnete, Solarzellen, weiße LED, grüne Rechenzentren, bleifreie Lote, RFID oder die Sauerstoffverzehrkathode.

Bei vier Grenzfällen wird der Mengenbedarf je Umwelttechnologie im globalen Green-Economy-Szenario in 2025 herangezogen. Alle vier Umwelttechnologien weisen ausschließlich den gleichen kritischen Rohstoff (Kupfer) auf. Dabei weisen Speicherkraftwerke – Pumpspeicherkraftwerke mit 672 Tonnen den geringsten Bedarf im Vergleich zu den anderen drei Umwelttechnologien auf und fallen somit aus der weiteren Betrachtung heraus.

Weitere 15 Umwelttechnologien wurden ebenfalls untersucht, es konnte aber keine signifikante Rohstoffrelevanz festgestellt werden. Die Gründe sind unterschiedlicher Natur. Zum einen fallen Umwelttechnologien darunter, deren Entwicklung nicht absehbar ist und somit keine Rohstoffbedarfe abgeschätzt werden konnten – etwa Precision Farming. Bei anderen Umwelttechnologien konnte der Einsatz der relevanten Rohstoffe nicht in Erfahrung gebracht werden (beispielsweise OLED) oder beläuft sich auf so geringe Mengen, dass keine Rohstoffrelevanz gegeben ist (etwa Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke). Zum anderen fallen in diese Gruppe Umwelttechnologien, die noch nicht auf dem Markt sind, sodass keine Substitutionspotentiale ermittelt werden können (zum Beispiel HTS-Generatoren).

5.3 Sensitivitätsanalyse

Zur Absicherung der Ergebnisse wurde eine Sensitivitätsanalyse des Rohstoffrankings und der Auswahl der Umwelttechnologien durchgeführt. Mit dieser Sensitivitätsanalyse soll festgestellt werden, wie robust die gewonnenen Ergebnisse der Kritikalitätsanalyse sind.

Untersucht wurde einerseits der Einfluss der Berechnungsmethodik auf die Kritikalität des Versorgungsrisikos, andererseits wurde der Einfluss einer veränderten Gewichtung und Bewertung der Kriterien auf die Kritikalitätseinstufung analysiert. Dazu dienten plausible Szenarien, die mögliche Entwicklungsdynamiken widerspiegeln, die vom Green Economy Szenario, das hier als Basis für die Kritikalitätseinstufung zugrunde gelegt wurde, abweichen können.

Für die Sensitivitätsbetrachtung wurden vier Szenarien angenommen: *Restriktive Handelspolitiken*, *Globale Marktwachstumssteigerung*, *Höhere Recyclingraten* und *Geopolitische Risiken*. Diese

Szenarien bilden mögliche zukünftige Entwicklungen ab. Während die ersten drei Szenarien sich jeweils auf ein Kriterium des Kataloges der VDI 4800 (Blatt 2) auswirken, ist das vierte Szenario *Geopolitische Risiken* mit fünf Kriterien tiefgreifender.

Als Ergebnis ist festzustellen: In beiden Sensitivitäten – der veränderten Gewichtung der Kriterien und der veränderten Bewertung der Kriterien – ändern sich zwar die Reihenfolgen der Kritikalitätseinschätzungen der Rohstoffe in den Szenarien, aber die grundsätzliche Kritikalitätseinschätzung der Umwelttechnologien bleibt bestehen.

Somit führt die Sensitivitätsanalyse zu keiner relevanten Änderung des Rankings der Umwelttechnologien und untermauert die Auswahl der 20 prioritären Umwelttechnologien.

5.4 Zusammenfassung der zwanzig prioritären Umwelttechnologien

Bei der Kritikalitätsanalyse wurden aus 40 Umwelttechnologien 20 prioritäre Umwelttechnologien identifiziert, die im weiteren Projektverlauf auf Substitutionspotentiale untersucht werden. Anhand der Sensitivitätsanalyse wurde die Auswahl der 20 Umwelttechnologien auf ihre Robustheit geprüft. Auch nach den Sensitivitäten bleibt die Auswahl der 20 Umwelttechnologien stabil. Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien lassen sich in folgende Technologiegruppen clustern:

- Katalysatoren: Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren, Industriekatalysatoren
- Permanentmagnete: Pedelects, Hybridmotoren, Elektroantriebsmotoren, Hochleistungs-Permanentmagnete übrige Anwendungen, Permanentmagnet-Generator Windkraft
- Solartechnologie: Dünnschicht-Solarzellen, Tandemzellen, CSP-Technologie
- Speichertechnologien: Lithium-Ionen-Batterien PHEV, Lithium-Ionen-Stromspeicher
- Generatoren ohne Permanentmagnete: Synchron-Generator, Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen
- Elektronik: Grüne Rechenzentren, bleifreie Lote
- Sonstige Technologien: RFID, Sauerstoffverzehrkathode, weiße LED, Kraftwerke GuD/Gas.

6 Substitutionspotentialscreening der zwanzig relevanten Umwelttechnologien

Die 20 ausgewählten prioritären Umwelttechnologien wurden auf mögliche Substitutionsoptionen untersucht. Es wurde nach Substitutionen gesucht, welche spezifische Materialien austauschen (materielle Substitution), welche einen Austausch der Technologie bedeuten (technologische Substitution) und welche die Funktion substituieren (funktionale Substitution). Potentielle Substitutionen wurden anschließend auf mögliche Effizienzverluste, Restriktionen, ökologische Vor- und Nachteile sowie Entwicklungsstadien hin geprüft. Am Beispiel Elektroantriebsmotoren für BEV werden die Ergebnisse im folgenden Kapitel veranschaulicht.

6.1 Untersuchung von Substitutionsoptionen am Beispiel der vollelektrischen Pkw

Bei der Umwelttechnologie des Elektromotors für BEV sind Dysprosium, Neodym, Praseodym, Terbium, Gallium und Kupfer als relevante Rohstoffe identifiziert worden.

Materielle Substitutionen sind nicht auf dem Markt vorhanden. Allerdings sind folgende technologische Substitutionen zum Permanentmagnet-Motor bereits in Serienproduktion auf dem Markt verfügbar:

- Der Asynchronmotor (ASM) ist frei von Seltenen Erden und wird zum Beispiel im Tesla S eingesetzt. Er weist eine hohe Robustheit und hohe Zuverlässigkeit bei niedrigen Produktionskosten auf. Allerdings ist die Leistungsdichte niedriger als beim permanent erregten Synchronmotor und es bedarf eines größeren Bauraums sowie höheren Gewichts [6].
- Der elektrisch erregte Synchronmotor (Electrically excited synchronous motor; EESM) ist ebenfalls frei von Seltenen Erden und wird beispielsweise im Renault Zoe eingesetzt. Er besitzt eine hohe Effizienz. Der größere Bauraumbedarf ist im Vergleich zum PHEV von nicht so großer Bedeutung [6].
- Ebenso wird der hybride Ansatz von reduziertem Einsatz Seltenen Erden im Permanentmagnet-Motor mit synchronem Reluktanzprinzip beim BMW BEV i3 eingesetzt [6].

Folgende technologische Substitutionsoptionen befinden sich im Prototyp-Stadium:

- Der Asynchronmotor mit hoher Drehzahl (ASM mit hohen revolutions per minute; ASM mit hohen rpm) ist bereits in Planung für eine Serienproduktion. Er ist ebenfalls frei von Seltenen Erden und besitzt Potenzial für hohe Energie- und Materialeffizienz sowie niedrige Produktionskosten [6].
- Der Permanentmagnetmotor mit mit sonstigen Magneten (AlNiCo- und Ferrit-Magnete) ist ebenso frei von Seltenen Erden und besitzt Potenzial für eine allgemeine gute Leistung [6].
- Der Reluktanzmotor (SRM = switched reluctance motor) ist ebenso frei von Seltenen Erden. Der Vorteil liegt in einer robusten Bauart und dem Potenzial für eine kostengünstige Motorenproduktion. Der hohe Geräuschpegel ist im Pkw-Bereich ein großer Nachteil. Der SRM benötigt außerdem einen speziellen Inverter, der nicht kompatibel mit anderen Produktionslinien der Leistungselektronik für Motoren und daher kostenaufwändig ist [6].

Im F&E-Stadium befinden sich Technologien wie beispielsweise der SEE-freie Transversal flux motor (TFM) [6].

Die Substitutionsoptionen wurden im Hinblick auf ihre möglichen Restriktionen untersucht. Im Allgemeinen können Restriktionen durch die Konkurrenz zu anderen Produkten entstehen sowie durch einen beschränkten Zugang zu den Primärrohstoffen. Als Beispiel sind hier die Ausfuhrbeschränkungen der Seltenen Erden aus China zu nennen, die bis 2015 anhielten. Des Weiteren sind Platzmangel und Gewicht bei E-Fahrzeugen von besonderer Bedeutung.

Restriktionen der Substitutionsoptionen können auch dadurch entstehen, dass das Substitut andere kritische Rohstoffe wie z. B. Kobalt enthält.

Ebenfalls wurden die ökologischen Vor- und Nachteile der Substitutionsalternativen gegenüber der derzeitigen Technologie betrachtet. In diese Betrachtung fällt beispielsweise als Vorteil die vollständige Substitution der aufwendigen und umweltbelastenden Seltenen-Erden-Produktion. Nachteilig wirken sich dagegen beispielsweise Wirkungsgradverluste, ein erhöhter Einsatz anderer Rohstoffe und deren Primärrohstoffketten oder ein erhöhter Geräuschpegel aus.

Schließlich wurden die Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen dargestellt (Abbildung 9).

Im Allgemeinen dauert die Entwicklung eines neuen Motors etwa drei Jahre, bis zur Serienproduktion sind es etwa fünf Jahre. Technologiesprünge sind vor allem in der technologischen Substitution von ASM mit hohen rpm und dem Permanentmagneten mit mit sonstigen Magneten (AlNiCo, Ferrit) zu erwarten.

6.2 Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings der zwanzig relevanten Umweltechnologien

Nach dem Substitutionspotentialscreening und einer intensiven Diskussion mit Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft im Rahmen eines Fachgesprächs können die 20 untersuchten Umweltechnologien in vier Gruppen geclustert werden.

Die Gruppe A) umfasst Umweltechnologien, für die bereits heute Substitutionsalternativen auf den Markt vorhanden sind und kritische Metalle substituiert werden können. Hierzu zählen folgende Umweltechnologien:

- Bleifreie Lote
- Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren
- Permanentmagnete in vollelektrischen Pkw
- Hochleistungs-Permanentmagnete: Übrige Anwendungen
- Dünnschicht-Solarzellen
- Tandemzellen
- CSP-Technologie
- RFID
- Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkathode

Eng an dieser Gruppe angelehnt ist das Cluster B). In diese Gruppe fallen Umweltechnologien, die marktreife Alternativen besitzen mit der Möglichkeit einer deutlichen Reduzierung des Einsatzes der als kritisch identifizierten Metalle.

- Pedelec-Batterien
- HEV
- PHEV
- Lithium-Ionen Stromspeicher
- Lithium-Ionen Batterien für Fahrzeuge

In Gruppe C) werden Umweltechnologien eingestuft, die Substitutionsoptionen besitzen, diese noch nicht im Markt etabliert sind, aber großes Potenzial für eine absehbare Marktreife besitzen. Diese Technologien sind ökonomisch noch nicht wettbewerbsfähig oder die Entwicklung ist noch nicht vollständig ausgereift.

- Permanentmagnet-Generatoren für WKA: HTS benötigt noch technologischen Fortschritt
- Weiße LED: OLEDs preislich noch nicht wettbewerbsfähig

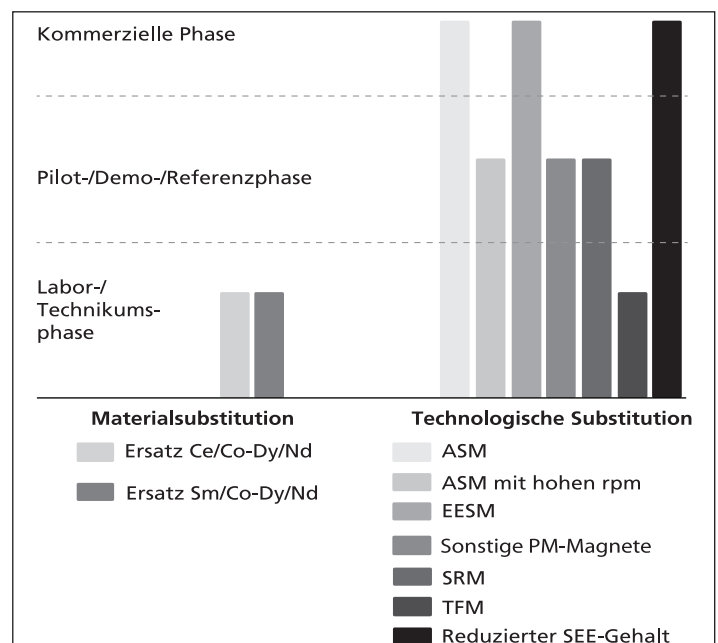


Abbildung 9: Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen für den Permanentmagneten in BEV

Gruppe D) besteht aus Umwelttechnologien, für die keine Substitutionsmöglichkeiten im Rahmen des Projektes identifiziert werden konnten.

- Grüne Rechenzentren
- Industriekatalysatoren
- Pedelec-Motoren
- Synchron-Generatoren in WKA
- Asynchron-Generatoren in WKA
- Kraftwerke GuD/Gas

7 Ausblick

Nach der Untersuchung der Substitutionsoptionen für die 20 prioritären Umwelttechnologien wird derzeit das Portfolio der möglichen Substitutionsmöglichkeiten abgestimmt. Die Veränderungen der Materialbedarfe werden anschließend in einem Green-Economy-Szenario mit Substitutionsoptionen hergeleitet und die Szenarien mit ihren Materialbedarfen neu analysiert.

Abschließend wird mit den Ergebnissen eine Roadmap entwickelt, die mögliche Maßnahmen und Aktivitäten zur Resilienz des deutschen Umwelttechnologiesektors gegenüber rohstoffwirtschaftlichen und ökologischen Versorgungsrisiken aufzeigt.

Auf Basis der Analysen werden Zielsetzungen, Meilensteine und Maßnahmen erarbeitet, mit denen mögliche Substitutionspotenziale erfolgreich erschlossen werden können. Das Roadmapping ermöglicht es, eine *Straßenkarte* zu erarbeiten, die viele Einzelthemen bündelt, Handlungsoptionen identifiziert und Prioritäten benennt. Die Erschließung von Substitutionspotenzialen und den damit verbundenen Herausforderungen basiert auf der Analyse von Trends und der Identifikation der treibenden Kräfte. In der Roadmap werden die Handlungsfelder wie Technologieentwicklung, Standards, Leuchtturmprojekte und politische Rahmenbedingungen zur Schaffung von Anreizen diskutiert. Für verschiedene Handlungsfelder, die mit dem Umweltbundesamt abgestimmt werden, wird abschließend ein Katalog von Einzelmaßnahmen ausgearbeitet und auf einem Workshop mit relevanten Innovationsakteuren aus Wirtschaft, Politik, Forschung und Verbänden diskutiert.

Literatur

- [1] Buchert, M. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität – Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen (Anhang zum Schlussbericht). Öko-Institut e.V., Daimler AG, Tu Clausthal, Umicore, Förderung durch BMU, Darmstadt 2011
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Green-Tech made in Germany 4.0. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin 2014
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRess II) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin 2016, S. 49
- [4] Erdmann, L.; Behrendt, S.; Feil, M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland, KfW, Berlin 2011
- [5] Europäische Kommission: Report on Critical Raw Materials for the EU. 2014. Im Internet: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_de
- [6] European Union: C.C. Pavel, A. Marmier, P. Alves Dias, D. Blagoeva, E. Tzimas, D. Schüler, T. Schleicher, W. Jenseit, S. Degreif, M. Buchert; Substitution of Critical Raw Materials in Low-Carbon Technologies: Lighting, Wind Turbines and Electric Vehicles, 2016
- [7] Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N.T. u.a.: Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 112, Issue 14, 2015, S. 4257-4262. Im Internet: <http://www.pnas.org/content/112/14/4257.full.pdf?with-ds=yes>
- [8] International Energy Agency (IEA): Global Transport Outlook to 2050. Targets and Scenarios for a Low-Carbon Transport Sector; John Dulac; 2013. Im Internet: https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdmobility/DULAC_23052013.pdf

- [9] Kreibich, R.; Hofmann, D.; Handke, V.; Scharp, M.: Ressourcenschonung durch ausgewählte grüne Zukunftstechnologien. Auftraggeber Naturschutzbund Deutschland NABU, Bearbeitung IZT, 2013
- [10] ReCiPe 2013: Goedkoop M.J., Heijungs, R.; Huijbregts, M. u.a.: ReCiPe 2008 – First Edition. Report I: Characterisation – May 2013. Amersfoort/Leiden/Nijmegen/Bilthoven 2013. Im Internet: www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf
- [11] Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C.: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognosen. Enderbericht, Juni 2014, Basel/Köln/Osnabrück; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG, GWS (Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH), EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln)
- [12] Tilton, J.: Material Substitution: Lessons from Tin-Using Industries. Resources for the Future, Washington, DC, USA 1983
- [13] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands. Gründruck. Berlin 2016
- [14] Weltautomobilverband (OICA): Production Statistics 2013. Im Internet: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2013-statistics/> (abgerufen am 21. Oktober 2015)
- [15] Ziemann, S.; Schebek, L.: Substitution of Scarce Metals – A Way Out of Resource Scarcities? Chemie-Ingenieur-Technik Volume 82, Issue 11, 2010, S. 1965-1975

Anmerkung

- 1 Als Stakeholder wird eine Person, Gruppe oder Institution bezeichnet, die ein berechtigtes Interesse am Verlauf oder Ergebnis eines Projektes, einer Thematik oder eines Unternehmens hat.

Hinweis:

Bei dem vorliegenden Beitrag handelt es sich um die redaktionell überarbeitete Fassung der Erstveröffentlichung: Degreif, Stefanie; Buchert, Matthias; Bulach, Winfried; Behrendt, Siegfried; Müller, Felix: Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien. In: Recycling und Rohstoffe. Band 10. Herausgegeben von Karl J. Thomé-Kozmiensky (†) und Daniel Goldmann. TK-Verlag, Neuruppin 2017, S. 53-64, ISBN: 978-3-944310-34-3

Kontakt:

Dipl.-Geogr. Stefanie Degreif

Öko-Institut e.V.
Rheinstraße 95 · 64285 Darmstadt
Tel.: 0 61 51 - 81 91 – 125 · Fax: 0 61 51 - 81 91 - 133
eMail: s.degreif@oeko.de
Internet: <https://www.oeko.de/das-institut/team/stefanie-degreif/>

Dr.-Ing. Matthias Buchert

Öko-Institut e.V.
Rheinstraße 95 · 64295 Darmstadt
Tel.: 0 61 51 - 81 91 – 147 · Fax: 0 61 51 - 81 91 - 133
eMail: m.buchert@oeko.de
Internet: <https://www.oeko.de/das-institut/team/matthias-buchert/>

Dr.-Ing. Winfried Bulach

Öko-Institut e.V.
Rheinstr. 95 · 64295 Darmstadt
Tel.: 06151 – 8191 – 144 · Fax: 06151 – 8191 – 133
eMail: w.bulach@oeko.de
Internet: <https://www.oeko.de/das-institut/team/winfried-bulach/>

Dr. Dipl.-Pol., Dipl.-Biol. Siegfried Behrendt

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH
Schopenhauerstraße 26 · 14129 Berlin
Tel.: 030 - 80 30 88 10 · Fax: 030 - 80 30 88 88
eMail: s.behrendt@izt.de
Internet: <https://www.izt.de/>

Dipl.-Wirtsch.-Chem. Felix Müller

Umweltbundesamt, FG III 2.2 – Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie
Wörlitzer Platz 1 · 06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 03 40 - 21 03 - 38 54 · Fax: 03 40 - 21 04 - 38 54
eMail: felix.mueller@uba.de
Internet: <https://www.umweltbundesamt.de/>