

# Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien

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

1.	Substitution als Strategie zur Ressourcenschonung .....	66
2.	Das Projekt SubSKrit, seine Ziele und sein aktueller Stand .....	67
3.	Auswahl der vierzig prioritären Umwelttechnologien und Rohstoffe im Fokus des Projektes .....	68
3.1.	Auswahl der vierzig prioritären Umwelttechnologien .....	68
3.2.	Rohstoffe im Fokus des Projektes.....	70
4.	Funktionale Materialbedarfe der vierzig ausgewählten Umwelttechnologien.....	70
4.1.	Beispiel: Umwelttechnologie Elektroantriebsmotoren.....	71
4.2.	Beispiel: Szenario-Ergebnisse Dysprosium.....	72
5.	Kritikalitätsanalyse.....	72
5.1.	Ranking der relevanten Rohstoffe.....	73
5.1.1.	Ranking des Versorgungsrisikos .....	73
5.1.2.	Ranking des ökologischen Schadenspotentials.....	74
5.1.3.	Ranking der strategischen Bedeutung.....	75
5.1.4.	Gesamtranking .....	76
5.2.	Ranking der Umwelttechnologien .....	78
5.3.	Sensitivitätsanalyse .....	78
5.4.	Zusammenfassung der zwanzig prioritären Umwelttechnologien.....	79
6.	Substitutionspotentialscreening der zwanzig relevanten Umwelttechnologien .....	80
6.1.	Untersuchung von Substitutionsoptionen am Beispiel der vollelektrischen Pkw .....	80
6.2.	Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings der zwanzig relevanten Umwelttechnologien .....	82
7.	Ausblick.....	83
8.	Literatur .....	83

## 1. Substitution als Strategie zur Ressourcenschonung

Ausbau und 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. Diese werden als kritische Rohstoffe bezeichnet. Die Europäische Kommission führt regelmäßig Listen zu den kritischen Rohstoffen [5]. Eine Studie für die Kreditanstalt für Wiederaufbau untersuchte die Risiken der Versorgung Deutschlands mit mineralischen Rohstoffen [4]. Demzufolge sind die identifizierten kritischen Rohstoffe für viele Umwelttechnologien insbesondere für den nachhaltigen Umbau der Energieversorgung von herausragender Bedeutung. Es ist derzeit 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 eine Substitution seltener und strategischer Metalle durch Rohstoffe mit geringeren Umweltbelastungen ermöglichen bzw. 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].

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung von Substitutionsoptionen ist die Untersuchung der Ressourceneffizienzpotentiale, aber auch möglicher Mehrbelastungen. So benötigen beispielsweise Windenergieanlagen ohne Seltene Erden deutlich mehr

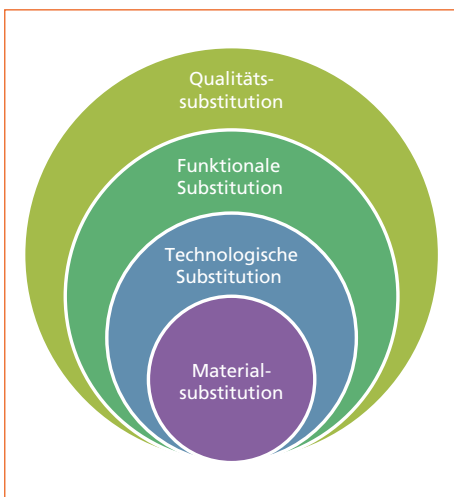


Bild 1: Schematische Klassifikation der Substitutionsformen

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 (Bild 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) wird im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplanes des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit vom Öko-Institut und dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) durchgeführt und mit Bundesmitteln finanziert. Das Forschungsvorhaben hat im August 2014 begonnen und läuft bis November 2017.

Die Zielsetzung des Vorhabens ist die Erarbeitung einer Roadmap für die Substitution kritischer Rohstoffe in Umwelttechnologien. Diese Roadmap soll aufzeigen, welche Substitutionsmaßnahmen wesentlich dazu beitragen können, dass ein zukünftiger Ausbau von Umwelttechnologien, auch vor dem Hintergrund von steigenden Versorgungsrisiken im Rohstoffbereich, möglich ist. Dabei soll den langen Vorlaufzeiten, Hemmnissen und begünstigenden Faktoren der Entwicklungen vom Forschungsstadium zur Marktreife und Marktdurchdringung Rechnung getragen werden. 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.

Das Projekt SubSKrit gliedert sich in folgende 6 Arbeitspakete (AP):

- **AP 1: Systematisierung und Screening:** Entwicklung einer Auswahlmethodik zum Screening von Umwelttechnologien
- **AP 2: Funktionaler Materialbedarf:** Abschätzung des funktionellen Materialbedarfs für vierzig 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 Stakeholdern 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 vierzig 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.

#### 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 (z.B. Li-Ionen-Batterien für Fahrzeuge),
- Energieeffizienz (z.B. Celitement),
- Rohstoff- und Materialeffizienz (z.B. Precision Farming),
- Nachhaltige Mobilität (z.B. Elektroantriebsmotoren),
- Kreislaufwirtschaft (z.B. Automatische Stofftrennverfahren),
- Nachhaltige Wasserwirtschaft (z.B. Phosphatrückgewinnung).

In den folgenden Bildern sind die Umwelttechnologien in einer Übersicht und farblich nach den Leitmärkten dargestellt.

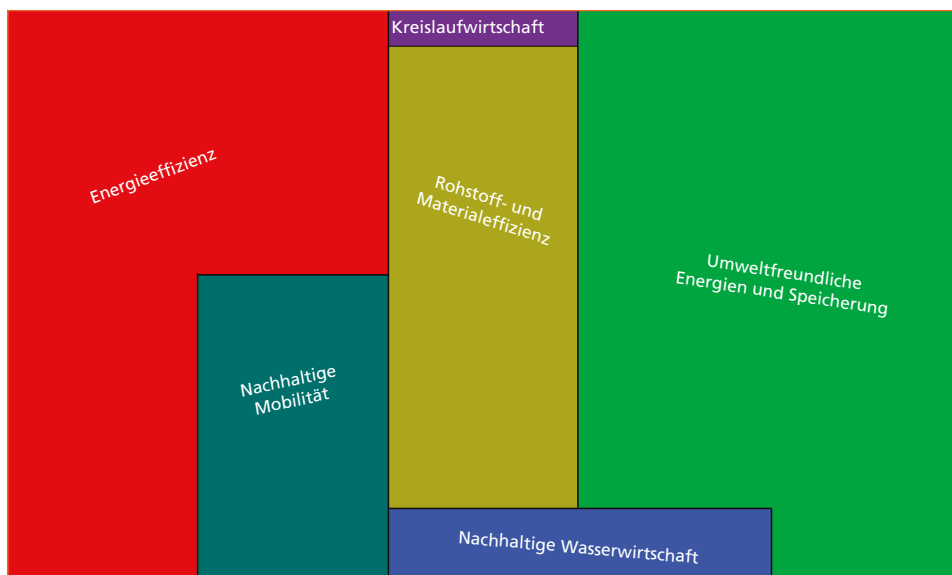


Bild 2: Übersicht der Leitmärkte

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

Bild 3: Übersicht der 115 Umwelttechnologien in den Leitmärkten

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

- Relatives Umweltlastungspotenzial
- 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 folgende 40 Umwelttechnologien für die weitere Bearbeitung im Projekt SubSKrit ausgewählt:

Tabelle 1: Die ausgewählten 40 Umwelttechnologien (Farbgebung entspricht den unterschiedlichen Leitmärkten)

Kompressoren	Weiße LED	Fahrzeug-Abgas-Katalysator	Celitement	Hybridmotoren
RFID	Pedelects	Aerogele	Precision Farming	Grüne Rechenzentren
Li-Ionen-Stromspeicher	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	Elektroantriebsmotoren	Phosphorrückgewinnung	Dünnschicht-Solarzellen	Synchron-Generator
Wassereffizienztechnologien	Organische Leuchtdioden (OLED)	Industriekatalysatoren	Tandemzellen	Asynchron-Generator
Automatische Stofftrennverfahren	Me-Schlacken- und P-Klärschlammaufbereitung	Umkehrosiose (hochpermeable Membranen)	Si-Dickschichtzellen	Dezentrale Wasseraufbereitung
Karosserie	Leichtbau (Titan und Scandium Airframe)	Hochleistungs-Permanentmagnete: Industrieanwendungen	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Membranelektrolyse Chloralkali mit Sauerstoffverzehrkathode

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.

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

## 4. Funktionale Materialbedarfe der vierzig 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 heute 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 Ladeanschluss (*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.

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
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

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.

Tabelle 4: Absoluter Materialbedarf global für die Umwelttechnologie *Elektroantriebsmotoren*

	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

## 4.2. Beispiel: Szenario-Ergebnisse Dysprosium

In Bild 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 Bild 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 bzw. deutlich übertroffen wird.

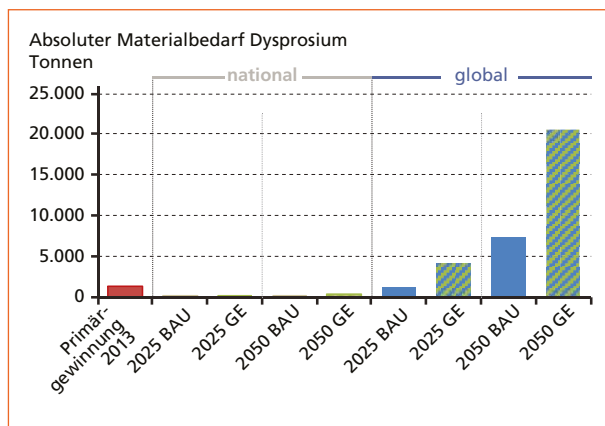


Bild 4:

Absolute Materialbedarfe Dysprosium im Vergleich zur Primärgewinnung 2013

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, 27 % 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 Dysprosiumsgehalts an den entsprechenden Neodym-Eisen-Bor-Magneten.

## 5. Kritikalitätsanalyse

Ziel der Kritikalitätsanalyse ist die Untersuchung der ausgewählten 40 Umwelttechnologien hinsichtlich der Kritikalität ihres Materialbedarfs. Als Ergebnis der Kritikalitätsanalyse wurden 20 UTs ausgewählt, welche im darauffolgenden Arbeitsschritt auf ihr Substitutionspotential hin untersucht wurden.



Folgende Schritte wurden im Rahmen 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 UTs übertragen wurde, um die Auswahl der 20 UTs zu erreichen.

## 5.1. Ranking der relevanten Rohstoffe

Das Ranking der Rohstoffe erfolgt in den Dimension 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 3 Gruppen eingeteilt sind. In Tabelle 5 sind die Indikatoren dargestellt.

Tabelle 5: Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2

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/Anbauggebiete		

Das **Rankingergebnis des Versorgungsrisikos** illustriert Bild 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.

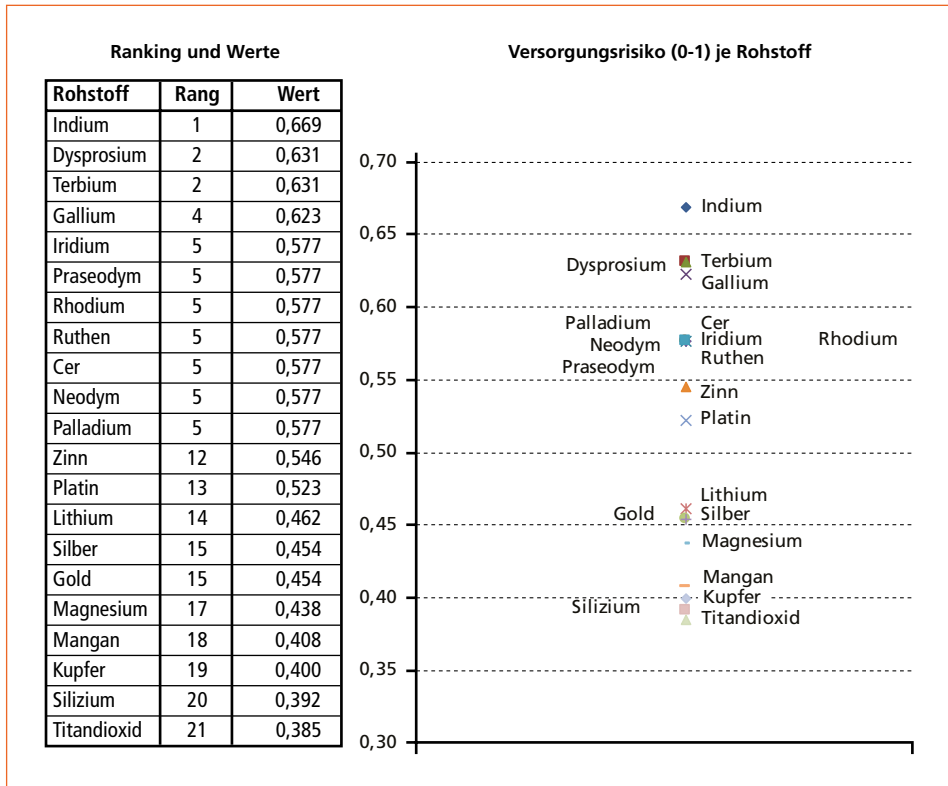


Bild 5: Rohstoffranking des Versorgungsrisikos

### 5.1.2. Ranking des ökologischen Schadenspotentials

Für die Kritikalitätsdimension ökologisches Schadenspotential 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 Schadenspotential 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 (Bild 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 Schadenspotential 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.

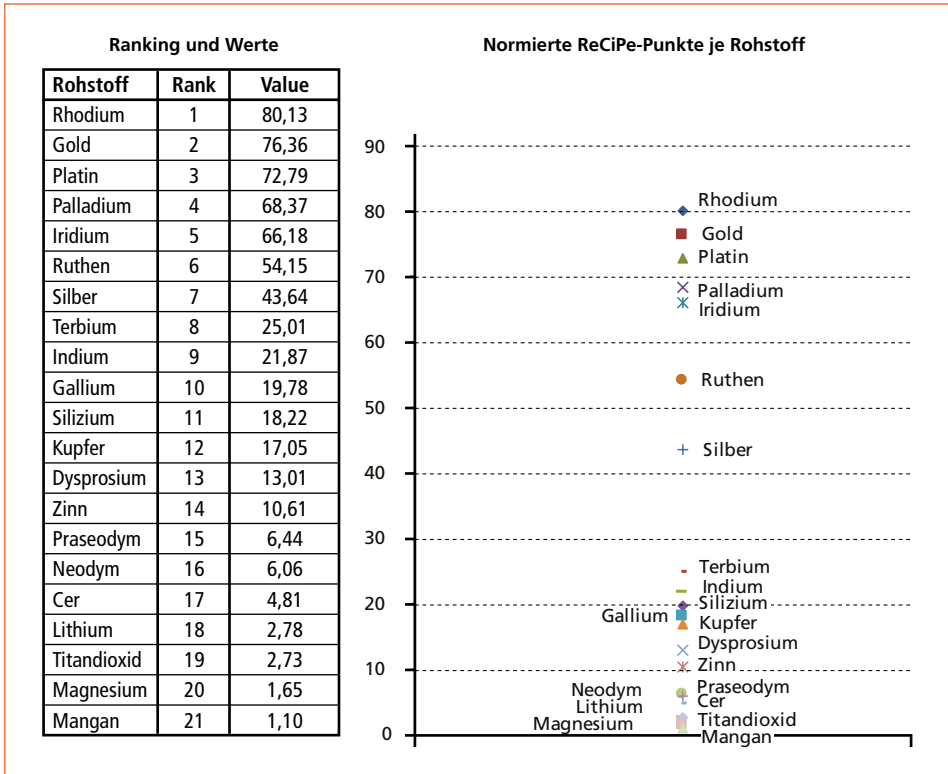


Bild 6: Rohstoffranking des ökologischen Schadenspotentials

### 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 UTs 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 Bild 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 UTs 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.

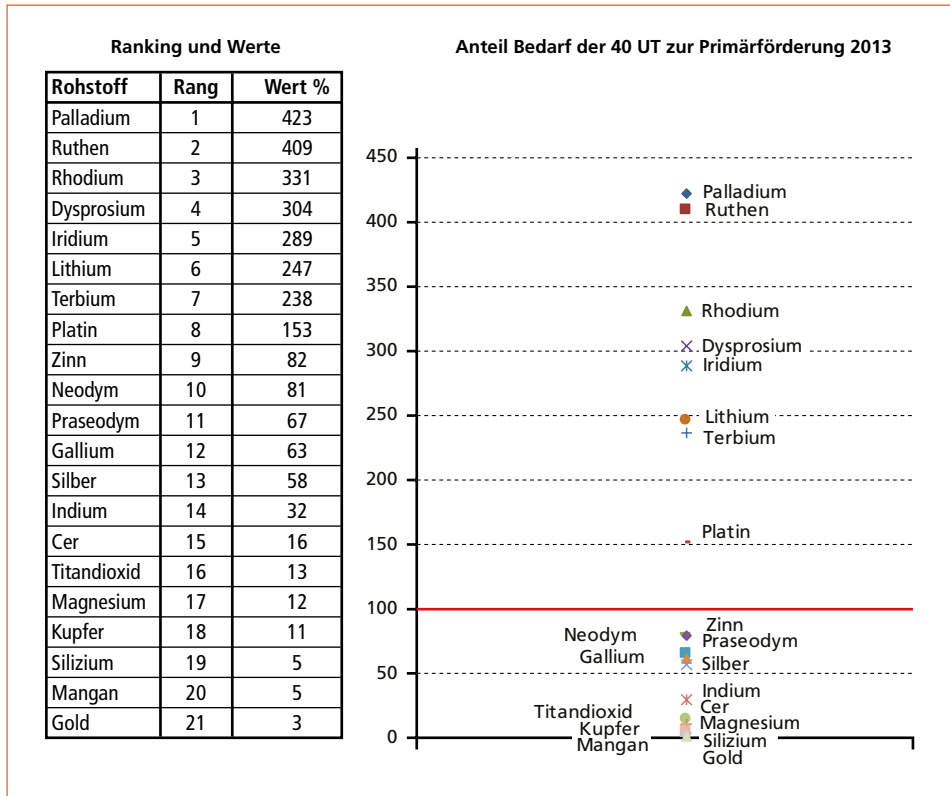


Bild 7: Rohstoffranking der strategischen Bedeutung

#### 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 UTs 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 z.B. 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 Bild 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.

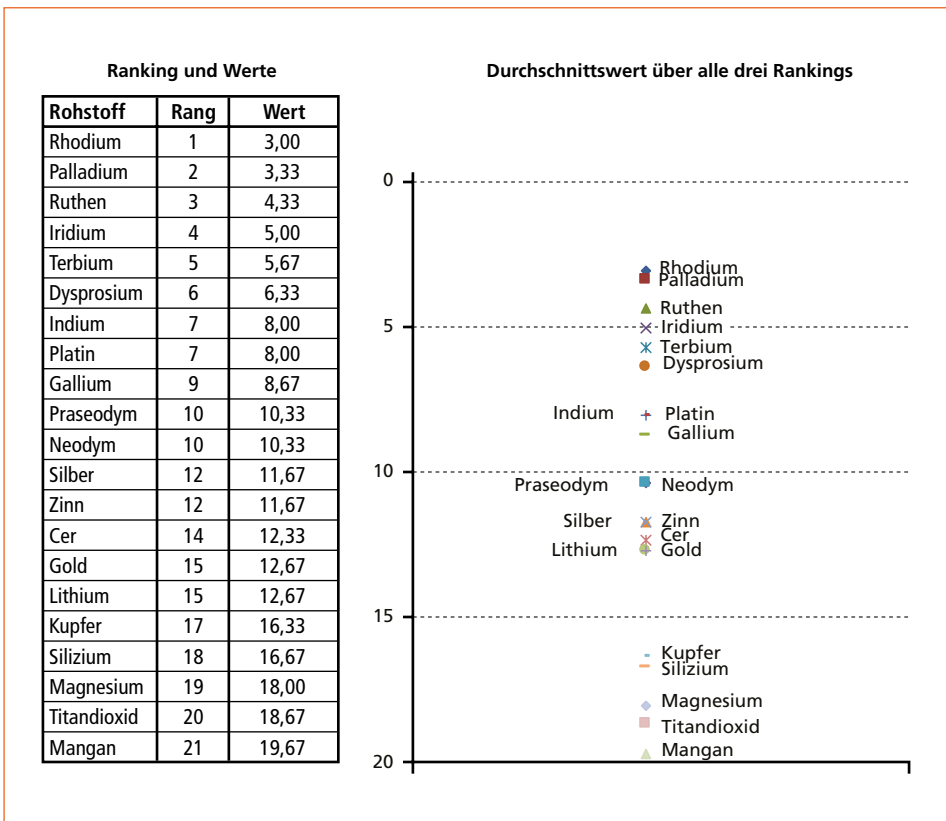


Bild 8: Gesamtranking der Rohstoffe

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

## 5.2. Ranking der Umwelttechnologien

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

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

Der kritischste Rohstoff jeder UT 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 UTs und so zum Ziel der Auswahl von 20 prioritären UTs.

Das durchgeführte Ranking führte zu einer Gruppe von 17 UTs, die eindeutig auf den ersten Plätzen gesetzt sind. Hierunter fallen Umwelttechnologien wie Katalysatoren, Permanentmagneten, 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 UTs weisen ausschließlich den gleichen kritischen Rohstoff (Kupfer) auf. Dabei weisen Speicherkraftwerke – Pumpspeicherkraftwerke mit 672 Tonnen den geringsten Bedarf im Vergleich zu den anderen drei UTs 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 – Bsp. Precision Farming. Bei anderen Umwelttechnologien konnte der Einsatz der relevanten Rohstoffe nicht in Erfahrung gebracht werden (z.B. OLED) oder beläuft sich auf so geringe Mengen, dass keine Rohstoffrelevanz gegeben ist (z.B. Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke). Zum anderen fallen in diese Gruppe Umwelttechnologien, die noch nicht auf dem Markt sind, sodass keine Substitutionspotentiale ermittelt werden können (z.B. 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

Im Rahmen der Kritikalitätsanalyse wurden aus 40 UTs 20 prioritäre Umwelttechnologien identifiziert, die im weiteren Projektverlauf auf Substitutionspotentiale untersucht werden. Anhand der Sensitivitätsanalyse wurde die Auswahl der 20 UTs auf ihre Robustheit geprüft. Auch nach den Sensitivitäten bleibt die Auswahl der 20 UTs 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, Sauerstoffverzehr Kathode, 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 bereits z.B. 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 z.B. 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 Seltener Erden im Permanentmagnet-Motor mit synchronem Reluktanzprinzip beim BMW BEV i3 bereits 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 preiswerten 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 z.B. der SEE-freie Transversal flux motor (TFM) [6].

Die Substitutionsoptionen wurden hinsichtlich ihrer 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 z.B. als Vorteil die vollständige Substitution der aufwändigen und umweltbelastenden Seltenen-Erden-Produktion. Nachteilig wirken sich dagegen z.B. Wirkungsgradverluste, ein erhöhter Einsatz anderer Rohstoffe und deren Primärrohstoffketten oder ein erhöhter Geräuschpegel aus.

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

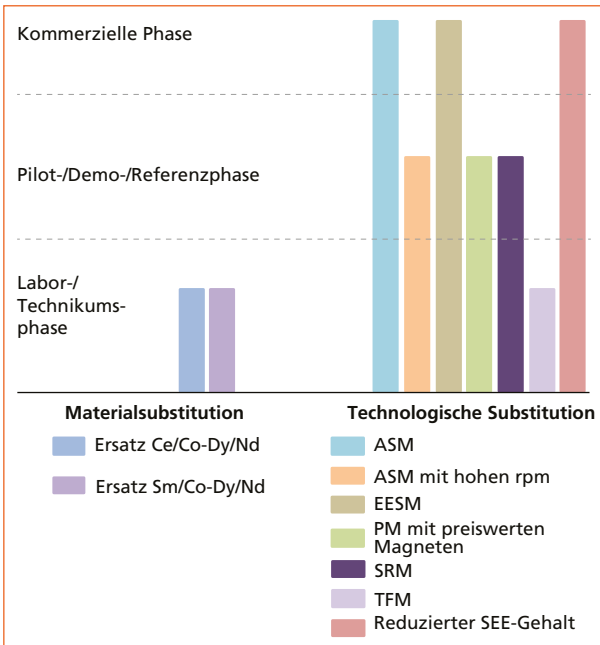


Bild 9:

Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen für den Permanentmagneten in BEV

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

## 6.2. Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings der zwanzig relevanten Umwelttechnologien

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

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

- 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 Umwelttechnologien, 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 Umwelttechnologien 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

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 die Erarbeitung einer *Straßenkarte*, 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 z.B. 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.

## 8. 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: 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 ([https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_de](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 (<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 ([https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdmobility/DULAC\\_23052013.pdf](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 ([www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe\\_characterisation.pdf](http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf)).
- [11] Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C.: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognosen. Endbericht, Juni 2014, Basel/Köln/Osnabrück; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG, GWS (Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung 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 (<http://www.oica.net/category/production-statistics/2013-statistics/>), abgerufen am 21.10.2015
- [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