

Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien

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

1.	Das Projekt <i>SubSKrit</i> und seine Ziele.....	96
2.	Auswahl der vierzig prioritären Umwelttechnologien und Rohstoffe im Fokus des Projektes	97
3.	Funktionale Materialbedarfe der vierzig ausgewählten Umwelttechnologien.....	98
4.	Kritikalitätsanalyse.....	99
5.	Substitutionspotentialscreening der zwanzig relevanten Umwelttechnologien	100
6.	Kritikalitätsauswirkungen.....	102
6.1.	Kritikalitätsauswirkungen am Beispiel Elektroantriebsmotor	102
6.1.1.	Substitutionsszenario der Elektroantriebsmotoren	103
6.1.2.	Rohstoffbedarfe Elektroantriebsmotoren	104
6.2.	Entwicklung des Rohstoffbedarfs in den betrachteten Umwelttechnologien am Beispiel Dysprosium	104
6.3.	Kritikalitätsentwicklung.....	105
7.	Roadmap	107
7.1.	Was soll die Roadmap leisten?.....	107
7.2.	Struktur und Schritte zur Erstellung der Roadmap.....	107
7.3.	Roadmapentwurf für Elektroantriebsmotoren	108
7.4.	Gesamtüberblick nach Priorität der Substitutionsalternativen.....	111
8.	Literatur	113

Bereits im letzten Jahr wurde der aktuelle Stand des Projekts *Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien* (SubSKrit) vorgestellt. Die Dokumentation hierzu findet sich in *Recycling und Rohstoffe*, Band 10 [3].

Aus diesem Grunde wird in diesem Beitrag nur kurz auf die Arbeitspakete 1 bis 4 eingegangen. Der Fokus des Beitrags liegt auf den letzten beiden Arbeitspaketen 5 und 6, in denen ein Kritikalitätsszenario entwickelt wurde, welches über eine Roadmap implementiert werden soll.

1. Das Projekt *SubSKrit* und seine Ziele

Ausbau und Einsatz innovativer Umwelttechnologien zählen zu den wichtigsten Zukunftsfaktoren für eine Steigerung der Ressourceneffizienz und für eine Transformation zur Green Economy. Viele Umwelttechnologien sind essentiell auf den funktionalen Einsatz von speziellen Rohstoffen angewiesen, für die sich schon heute vielfältige Versorgungsrisiken abzeichnen. Diese werden als kritische Rohstoffe bezeichnet. 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 verstärken. 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 Kupfer, was mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden ist. Eine vergleichende Bewertung von Technologien ist daher ausgesprochen wichtig.

Das Projekt *Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien* (SubSKrit) 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 lief bis Februar 2018.

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 -durchdringung 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 Fachleute 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 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

Die Ergebnisse des Projektes wurden in Brüssel und Berlin in Workshops vorgestellt und diskutiert. Hieraus resultierende Beiträge wurden im Rahmen der Dokumentation eingearbeitet.

2. 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 UTs wurde eine Auswahlmethodik entwickelt, um vierzig UTs für die weitere Bearbeitung zu selektieren.

Die Technologien wurden verschiedenen Quellen wie z.B. dem *GreenTech Made in Germany 4.0 – Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland* [1, 8] oder *Ressourcenschonung durch ausgewählte grüne Zukunftstechnologien* [10] entnommen und mit UBA und BMUB abgestimmt. Hierbei wurde das Konzept der Leitmärkte aus [1, 8] genutzt um die Technologien zu gruppieren. Im Anschluss an die Auswahl der 115 UTs wurden diese auf Basis der drei Kriterien:

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

bewertet.

Folgende 40 Technologien wurden hierbei für die weiteren Arbeitsschritte ausgewählt:

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

Kompressoren	Weiß LED	Fahrzeug-Abgas-Katalysator	Celitement	Hybridmotoren
RFID	Pedelecs	Aerocele	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
Wassereffizienz-technologien	Organische Leuchtdioden (OLED)	Industriekatalysatoren	Tandemzellen	Asynchron-Generator
Automatische Stofftrennverfahren	Me-Schlacken- und P-Klärschlamm-aufbereitung	Umkehrosmose (hoch-permeable Membranen)	Si-Dickschichtzellen	Dezentrale Wasseraufbereitung
Karosserie	Leichtbau (Titan und Scandium Airframe)	Hochleistungs-Permanentmagnete: Industrieanwendungen	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Membranelektrolyse Chloralkali mit Sauerstoffverzehrkathode

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 (2014). In der folgenden Tabelle 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

3. Funktionale Materialbedarfe der vierzig ausgewählten Umwelttechnologien

In AP 2 wurden die spezifischen und absoluten Materialbedarfe der betrachteten Rohstoffe für die vierzig ausgewählten Umwelttechnologien für das Jahr 2013 identifiziert und anschließend die Materialbedarfe für 2025 und 2050 in einem nationalen und globalen Business-As-Usual- und Green Economy-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 Umwelttechnologie an. Die spezifischen Materialbedarfe sowie die Entwicklung in den Szenarien stammen aus Literaturrecherchen, eigenen Quellen des Projektteams oder aus Interviews mit Fachleuten. Diese wurden hochgerechnet auf den Gesamtbedarf der jeweiligen Technologie. Diese Bedarfe wurden aggregiert. Für alle betrachteten Materialien wurden somit Gesamtbedarfe für beide Szenarien, die drei Zeitpunkte und die nationale sowie die globale Sicht erhalten. Diese wurden zusätzlich mit der Primärproduktion 2013 ins Verhältnis gesetzt. In Bild 1 sind die Ergebnisse beispielhaft für den Dysprosiumbedarf über alle vierzig untersuchten UTs dargestellt.

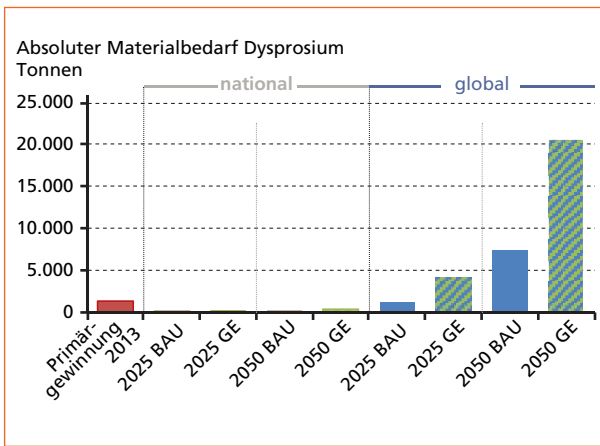


Bild 1:

Absolute Materialbedarfe Dysprosium im Vergleich zur Primär-gewinnung 2013

Im Rahmen dieser Gesamtbedarfe wurde die Anzahl der betrachteten Rohstoffe über den Anteil an der Primärproduktion 2013 eingengt. Für den weiteren Projektverlauf wurde sich auf die folgenden wesentlichen 21 Rohstoffe fokussiert:

Cer	Kupfer	Palladium	Silber
Dysprosium	Lithium	Platin	Silizium (metallisch)
Gallium	Magnesium	Praseodym	Terbium
Gold	Mangan	Rhodium	Titandioxid
Indium	Neodym	Ruthenium	Zinn
Iridium			

Tabelle 3:

21 relevante Rohstoffe für die weitere Betrachtung

4. Kritikalitätsanalyse

Ziel der Kritikalitätsanalyse ist die Untersuchung der ausgewählten vierzig Umwelttechnologien hinsichtlich der Kritikalität ihres Materialbedarfs. Als Ergebnis der Kritikalitätsanalyse wurden zwanzig 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 zwanzig Umwelttechnologien für die weitere Bearbeitung hinsichtlich der Substitutionsoptionen

Das Ranking der Rohstoffe wurde durch eine Methodologie mit folgenden drei Dimensionen (Grundlage in Klammern) durchgeführt:

1. Versorgungsrisiko (Methode nach VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2; keine degressive Addition, sondern Gleichgewichtung [14])
2. Ökologisches Schadenspotential (Methode Graedel aus *Criticality of metals and metalloids* [7])
3. Strategische Bedeutung (Bedarf globales Green Economy-Szenario 2025 gegenüber Primärproduktion 2013)

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 zwanzig UTs zu erreichen. Hierfür wurden die UTs zuerst nach dem höchsten benötigten Rohstoff, dann nach dem durchschnittlichen Rang über alle benötigten Rohstoffe und dann nach der Anzahl der benötigten Rohstoffe sortiert. In Grenzfällen wurde über die Masse des entscheidenden Rohstoffs sortiert. Die hierdurch ausgewählten zwanzig UTs sind in Tabelle 4 dargestellt. Abschließend wurde die Robustheit der Ergebnisse über eine Sensitivitätsanalyse überprüft und bestätigt.

Tabelle 4: Zwanzig ausgewählte Umwelttechnologien für die weitere Betrachtung

Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren	Elektroantriebsmotoren	Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge	Asynchron-Generatoren in WKA
Permanentmagnet-Generatoren (synchron) - high-speed (Windkraft)	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen	Dünnschicht-Solarzellen	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkathode
Industriekatalysatoren	Bleifreie Lote	Tandemzellen	Weißes LED
Grüne Rechenzentren	Pedelecs	CSP-Technologie	RFID
Hybridmotoren	Lithium-Ionen Stromspeicher	Synchron-Generatoren	Kraftwerke – GuD/Gas

5. Substitutionspotentialscreening der zwanzig relevanten Umwelttechnologien

Die zwanzig 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.

Nach dem Substitutionspotentialscreening und einer intensiven Diskussion mit Expert*innen aus Wirtschaft und Wissenschaft im Rahmen eines Fachgesprächs konnten die zwanzig untersuchten Umwelttechnologien in vier Gruppen geclustert werden.

Zum einen in die Gruppe A) der 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 und
- Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode.

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 und
- Lithium-Ionen Batterien für Fahrzeuge.

In Gruppe C) werden Umwelttechnologien eingestuft, die Substitutionsoptionen besitzen, diese noch nicht im Markt etabliert sind, aber großes Potential 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.

6. Kritikalitätsauswirkungen

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

Ziel des Arbeitspakets *Kritikalitätsauswirkungen* ist es, die Auswirkungen eines veränderten Substitutionsszenarios auf die Kritikalität der Rohstoffe im Vergleich zum Green Economy-Szenario zu ermitteln. Hierfür wurde zunächst ein Substitutionsszenario abgestimmt, in dem die zwanzig im vorigen AP ausgewählten Umwelttechnologien hinsichtlich ihrer Substitutionsmöglichkeiten analysiert wurden. Anschließend wurden die Rohstoffbedarfe für das Substitutionsszenario mit denen des Green Economy-Szenarios verglichen und die Auswirkungen auf die Kritikalität der Rohstoffe betrachtet. Dieses Vorgehen wird im folgenden Unterkapitel am Beispiel der Elektroantriebsmotoren vorgestellt.

Als weiteres Ergebnis wird ein übergeordneter Score bezüglich der Kritikalität der Rohstoffe im Substitutionsszenario dargestellt und mit dem Green Economy-Szenario verglichen.

6.1. Kritikalitätsauswirkungen am Beispiel Elektroantriebsmotor

In die Umwelttechnologie der Elektroantriebsmotoren fallen sowohl Elektroantriebsmotoren für vollelektrische Pkw (BEV) als auch Plug-In-Hybride (PHEV).

Für die Elektroantriebsmotoren in BEV und PHEV sind als ursprüngliche Technologie NdFeB-Permanentmagnete in die Szenarienberechnung eingegangen. Als relevante Rohstoffe wurden die Seltenen Erden (Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym), Gallium und Kupfer identifiziert. Substitutionsmöglichkeiten bestehen in folgenden Technologien:

- Asynchronmotor (ASM),
- Asynchronmotor mit hoher Drehzahl (ASM mit hohen rpm),

- Elektrisch erregter Synchronmotor (Electrically excited synchronous Motor (EESM)),
- Reluktanzmotor (Switched reluctance motor (SRM)),
- Reduzierter Seltene Erden-Gehalt,
- Sonstige Permanentmagnete (z.B. Ferritmagnete).

6.1.1. Substitutionsszenario der Elektroantriebsmotoren

Im folgenden Schritt wurde abgeschätzt, welche Substitutionsalternativen die Ursprungstechnologie substituieren können. Das Substitutionsszenario für die Elektroantriebsmotoren in vollelektrischen Pkw (BEV) und Plug-In-Hybriden (PHEV) unterscheidet sich, da in den PHEV die kompakte Bauform von größerer Bedeutung ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass in einem PHEV sowohl ein konventioneller Verbrennungsmotor als auch ein Elektroantriebsmotor verbaut sind. Da hier nur auf die Methodik des Substitutionsszenarios eingegangen werden soll, werden in der nächsten Tabelle nur die BEV gezeigt. In der Zusammenfassung des Rohstoffbedarfs (Kapitel 6.1.2.) wird aber die gesamte Technologie der Elektroantriebsmotoren, also BEV und PHEV, betrachtet.

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
	%	
Asynchronmotor	10	15
Asynchronmotor mit hoher Drehzahl	0	5
Elektrisch erregter Synchronmotor (EESM)	10	20
Sonstige Permanentmagnete (z.B. Ferritmagnete)	0	5
Reluktanzmotor	0	5
Reduzierter SEE-Gehalt	50	35
Gesamt	70	85

Tabelle 5:

Substitutionsszenario für den Elektroantriebsmotor in BEV

Die Einschätzungen zu den BEV basieren auf folgenden Annahmen:

- Der Asynchronmotor (ASM) ist bereits heute im Markt verbreitet (Tesla S). Daher wird der Einsatz der Technologie in 2025 mit zehn Prozent und 2050 mit fünfzehn Prozent angenommen.
- Der EESM (Electrically excited synchronous Motor; Elektrisch erregter Synchronmotor) ist ebenso schon heute im Markt vertreten (Renault Zoe). Daher wird angenommen, dass in 2025 etwa zehn Prozent der Ursprungstechnologie und 2050 etwa zwanzig Prozent durch den EESM substituiert werden können.
- Es zeichnet sich bereits heute ab, dass es wahrscheinlich einen Mix an verschiedenen Motorentypen in 2050 geben wird. Die Motorentypen Asynchronmotor mit hoher Drehzahl, Reluktanzmotor und sonstige Permanentmagnete befinden sich heute noch nicht im Markt und sind daher mit einem Markteintritt in 2050 mit fünf Prozent eingegangen.

- Ein reduzierter Seltene Erden-Gehalt in vollelektrischen Pkw-Motoren ist bereits heute verbaut (BMW i3). Daher ist der Anteil in 2025 von 50 Prozent und 2050 von 35 Prozent angenommen. Im vollelektrischen Pkw ist kein weiterer konventioneller Motor verbaut, was mehr Bauraum für den Motor zulässt. Daher wird der Marktanteil für die SEE-freie Motoren größer angenommen als bei den hybriden Motoren.

6.1.2. Rohstoffbedarfe Elektroantriebsmotoren

Um die Kritikalität der relevanten Rohstoffe darzustellen, werden die globalen Rohstoffbedarfe der Substitute je spezifischer Einheit abgeschätzt. Es wurde ein Gesamtbedarf der relevanten Rohstoffe dieser Umwelttechnologie im Substitutionsszenario ermittelt, der in folgender Tabelle mit dem ursprünglichen Rohstoffbedarf im Green Economy-Szenario verglichen wird.

	Substitutionsszenario		Green Economy	
	2025	2050	2025	2050
	Tonnen			
Dysprosium	2.157	6.566	2.900	18.252
Gallium	22	87	24	152
Kupfer	348.251	2.820.218	304.482	1.916.466
Neodym	8.088	24.622	10.874	68.445
Praseodym	2.157	6.566	2.900	18.252
Terbium	431	1.313	580	3.650

Tabelle 6:

Globaler Rohstoffbedarf in Elektromotoren (BEV und PHEV), Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green Economy

Es wird deutlich, dass mit Ausnahme von Kupfer die Bedarfe an relevanten Rohstoffen im Substitutionsszenario im Vergleich zum Green Economy-Szenario in 2025 und 2050 sinken. Die Seltenen Erden Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium weisen in 2050 mit über sechzig Prozent einen deutlich niedrigeren Bedarf im Substitutionsszenario auf. Auch der Galliumbedarf sinkt um fast die Hälfte. Dieser verminderte Bedarf geht zum einen auf Substitutionstechnologien zurück, die keine Permanentmagnete mit Seltenen Erden einsetzen, wie der Asynchronmotor, Elektrisch erregter Synchronmotor oder die sonstigen Permanentmagnete. Die Permanentmagnete mit reduziertem Seltenen Erden-Gehalt dämpfen ebenfalls deutlich den Bedarf an Seltenen Erden (bis zu fünfzig Prozent in 2050).

Der Kupferbedarf steigt in 2050 um etwa fünfzig Prozent. Dies ist auf die Substitutionstechnologien ohne Seltene Erden zurückzuführen, die aufgrund der niedrigeren Effizienz und Leistungsdichte einen erhöhten Bauraumbedarf und somit erhöhten Kupferbedarf aufweisen.

6.2. Entwicklung des Rohstoffbedarfs in den betrachteten Umwelttechnologien am Beispiel Dysprosium

Der Bedarf von Dysprosium kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 deutlich reduziert werden.

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 33 Prozent bzw. knapp 1.300 Tonnen. Die größten Einsparungen können mit 742 Tonnen bei Elektromotoren und mit fünfzig Tonnen bei Hybridmotoren erzielt werden.

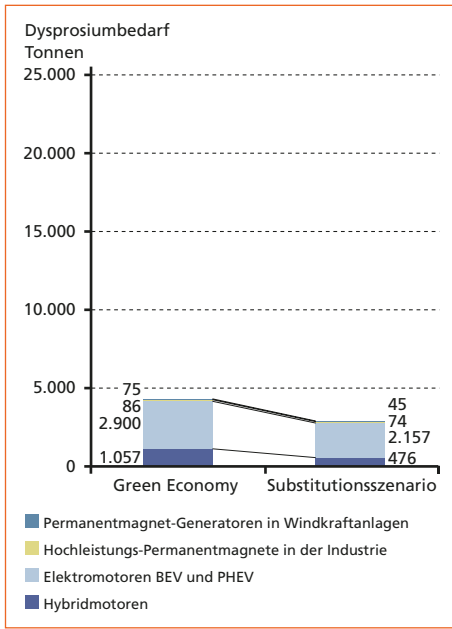


Bild 2: Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy- und Substitutionsszenario in 2025

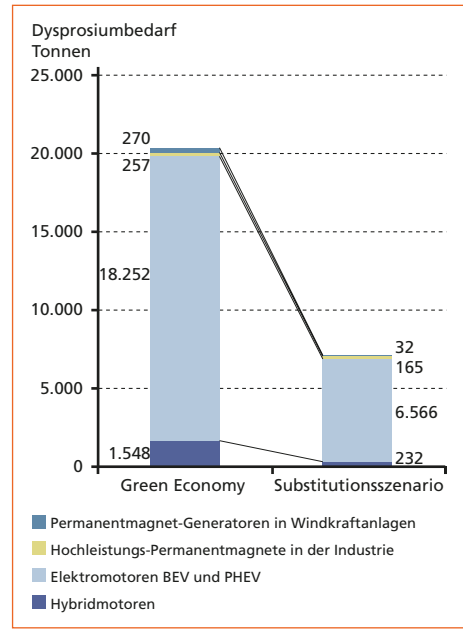


Bild 3: Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy- und Substitutionsszenario in 2025

In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 66 Prozent bzw. 13.300 Tonnen. Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei den Elektromotoren (voll-elektrischer Pkw und Plug-In-Hybride) mit 11.700 Tonnen und bei den Hybridmotoren mit 1.300 Tonnen.

6.3. Kritikalitätsentwicklung

Im Arbeitspaket 5 (Kritikalitätsauswirkungen) wurden die Auswirkungen eines Substitutionsszenarios für die vierzig Umwelttechnologien im Fokus auf die Bedarfe der relevanten Rohstoffe betrachtet. Zum einen wurden die Rohstoffbedarfe in einem Substitutionsszenario der vierzehn ausgewählten Umwelttechnologien abgeschätzt. Diese vierzehn UTs zeichnen sich durch einen relevanten Rohstoffbedarf kritischer Materialien und durch diverse realisierbare Substitutionsalternativen aus. Zum anderen wurde ein übergeordneter Kritikalitätsscore (Versorgungsrisiko, ökologisches Schadenspotential und strategische Bedeutung) je relevantem Rohstoff und des Gesamtszenarios von vierzig Umwelttechnologien ermittelt.

Diese übergeordnete Kritikalitätsentwicklung wird mit Hilfe des sogenannten Gesamtscores dargestellt. Der Gesamtscore gibt eine Gesamtaussage über die Kritikalität

der relevanten Rohstoffe in den vierzig Umwelttechnologien, welche in AP 3 bewertet wurden. In die Betrachtung gingen die Substitutionsszenarien der vierzehn relevanten Umwelttechnologien ein. Für die übrigen 26 UTs wurden keine Änderungen im Substitutionsszenario gegenüber dem Green Economy-Szenario angenommen. Dabei werden alle Rohstoffe einbezogen, die entweder im globalen Green Economy-Szenario oder im globalen Substitutionsszenario einen Bedarf in 2025 von mehr als drei Prozent der globalen Primärförderung 2013 aufweisen. Im Substitutionsszenario sind im Vergleich zum Green Economy-Szenario zwei zusätzliche Rohstoffe als relevant eingestuft: Kobalt und Vanadium. Daher liegen in dieser Analyse 23 Rohstoffe im Fokus.

In den Gesamtscore gehen sowohl das Versorgungsrisiko als auch das ökologische Schadenspotential und die strategische Bedeutung ein. Da das Versorgungsrisiko und das ökologische Schadenspotential im Green Economy- und im Substitutionsszenario unverändert bleiben, visualisiert der Gesamtscore v.a. die Veränderung der strategischen Bedeutung der relevanten Rohstoffe, was einer Veränderung der Rohstoffbedarfe entspricht.

In diesen Gesamtscores der beiden Szenarien wird ersichtlich, dass eine leichte Reduktion der Kritikalität durch das Substitutionsszenario möglich ist - in 2025 um drei Prozent und in 2050 um elf Prozent.

Bei Betrachtung der einzelnen Umwelttechnologien ist zu erkennen, dass Substitutionsalternativen bei einigen Umwelttechnologien deutliche Einsparungen relevanter Rohstoffe im Vergleich zum Green Economy-Szenario ermöglichen.

Bei folgenden Umwelttechnologien ist eine deutliche Bedarfsreduzierung absehbar (Die Prozentangabe in Klammern gibt das Reduktionspotential des jeweiligen Rohstoffs in einer Umwelttechnologie an, die im Substitutionsszenario im Vergleich zum Green Economy-Szenario erreicht werden kann):

- RFID: Deutliche Reduktion von Kupfer und Silber in 2025 (-96 Prozent) und 2050 (-100 Prozent),
- Weiße LED: Deutliche Reduktion von Cer in 2025 (-60 Prozent),
- Hybridmotoren: Deutliche Reduktion von Dysprosium und Terbium in 2025 (-55 Prozent),
- Elektromotoren in vollelektrischen Pkw und Plug-In-Hybriden: Deutliche Reduktion von Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium in 2050 (-64 Prozent),
- Permanentmagnete in Windkraftanlagen: Deutliche Reduktion von Dysprosium in 2025 (-40 Prozent).

Allerdings werden bei den Substitutionen nicht alle relevanten Rohstoffe in den Umwelttechnologien ersetzt. Darüber hinaus kann es auch zu einem Mehrbedarf an anderen relevanten Rohstoffen durch den Einsatz von Alternativen kommen. Hierunter fällt z.B. die Dünnschicht-Photovoltaik, bei der eine leichte Reduktion von Gallium, Indium und Silber in 2025 (-5 Prozent) aber auch ein Mehrbedarf an Zink und Zinn im Substitutionsszenario zur Folge hat.

7. Roadmap

Eine Roadmap ist ein Instrument der Zukunftsforschung. Sie stellt Wege im Zeitverlauf dar und bildet dabei übersichtlich Entwicklungslinien und Ereignisse in ihrer zeitlichen Struktur ab. Im Gegensatz zu Szenarien liegt dabei der Fokus nicht auf dem möglichen Endzustand, sondern auf den Entwicklungsetappen, um dorthin zu gelangen [6].

Ziel des Projekts ist eine technologische Substitutions-Roadmap für kritische Rohstoffe in Umwelttechnologien. Diese ist, ausgehend von der gegenwärtigen Situation, prospektiv angelegt und lehnt sich an das Technologieroadmapping an, welches innerhalb des betrieblichen Technologiemanagements etabliert ist, aber auch zur übergreifenden, staatlichen Forschungsplanung eingesetzt wird [9, 13].

7.1. Was soll die Roadmap leisten?

Die Roadmap soll sichtbar machen, welcher Handlungsbedarf besteht, um die identifizierten Substitutionspotentiale erschließen zu können.

Dazu sollen Maßnahmen aufgezeigt werden, für deren Realisierung gezielte Anstrengungen der Akteure im Innovationssystem sowohl auf Seiten der Politik (z.B. im Rahmen der Forschungs-, Innovations- und Diffusionsförderung) und der Forschungseinrichtungen (z.B. Fraunhofer-Gesellschaft, Industrielle Gemeinschaftsforschung AiF, Hochschulen, Großforschungseinrichtungen usw.) als auch auf Seiten der Wirtschaft und Verbände erforderlich sind. Mithilfe der Roadmap soll die Resilienz des Umwelttechnologiesektors gegenüber rohstoffwirtschaftlichen und ökologischen Versorgungsrisiken gefördert werden.

Es sind die Grundbedingungen des deutschen Innovationssystems zu berücksichtigen, aber auch europäische und internationale Elemente, welche für die betrachteten Technologielinien von vorrangiger Bedeutung sind. So sollen bei der Ausarbeitung der Roadmap nationale, europäische und internationale Aktivitäten und Handlungsansätze von Politik und Wirtschaft berücksichtigt werden. Hierzu zählen insbesondere die Rohstoffstrategie der Bundesregierung, das Ressourceneffizienzprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und die Forschungsaktivitäten zu wirtschaftsstrategischen Rohstoffen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Hervorzuheben ist auf europäischer Ebene u.a. die European Innovation Partnership (EIP) zu Rohstoffen [12], das *Critical Raw Materials Innovation Network* (CRM_InnoNet) [2], welches in SCRREEN (Solutions for Critical Raw Materials) [11] aufgegangen ist, das EIT Raw Materials (European Institute of Innovation and Technology) [4] sowie das Europäische Kompetenznetz *Seltene Erden* (ERECON) [5], welches auf Antrag des Europäischen Parlaments Empfehlungen zur Substitution Seltener Erden gibt.

7.2. Struktur und Schritte zur Erstellung der Roadmap

Für verschiedene Handlungsfelder wurde ein Katalog an Einzelmaßnahmen (technologisch spezifisch als auch übergreifend) ausgearbeitet, für deren Umsetzung Zeitpunkte bzw. -räume (kurz-, mittel und langfristig) sowie Akteure (im Innovationssystem)

spezifiziert wurden. Zentrale Handlungsfelder für die Erschließung der identifizierten Substitutionspotentiale sind die Technologieentwicklung, die Marktdiffusion und die Schaffung von geeigneten Formaten für Qualifizierung, Austausch und Monitoring von Substitutionsmöglichkeiten. Neben Forschungs-, Innovations- und Diffusionsförderung sind politisch-regulative Anreize (besonders im Bereich der funktionalen Substitution) relevant und deshalb zu prüfen. Ebenso werden Substitutionspotentiale aufgezeigt, bei denen keine Maßnahmen erkennbar sind.

In folgenden Einzelschritten wurden die Roadmaps (eine Roadmap je Umwelttechnologie) erstellt:

- Schritt 1:
Ermittlung des Handlungsbedarfs zur Erschließung der in AP 5 aufgezeigten Substitutionspotentiale (für jede Umwelttechnologie und Substitutionsoption)
- Schritt 2:
Identifikation von möglichen Maßnahmen für jede Substitutionsoption (sofern Handlungsbedarf besteht)
- Schritt 3:
Priorisierung von Maßnahmen nach Größe des Substitutionspotentials. Priorisierung der Substitutionsoptionen mittels Annahmen zum Marktanteil in 2025 (AP 5):
1. Priorität: ≥ 15 Prozent; 2. Priorität: 5-15 Prozent; 3. Priorität: ≤ 5 Prozent)
- Schritt 4:
Konkretisierung der Angaben zu den Substitutionsoptionen für Handlungsbedarf (Ziel), Maßnahmen, Akteure und Zeithorizont
- Schritt 5:
Bündelung und Visualisierung der Maßnahmen in Form eines *Fahrplans* zur Erschließung der Substitutionspotentiale.

Anhand des Beispiels Elektroantriebsmotoren werden diese Schritte bzw. deren Ergebnis im folgenden Unterkapitel dargestellt.

7.3. Roadmapentwurf für Elektroantriebsmotoren

Die Umwelttechnologie der Elektroantriebsmotoren in BEV- und PHEV-Fahrzeugen kann bereits heute auf erste Substitutionen im Markt zurückgreifen. Für eine passgenaue Betrachtung der Maßnahmen werden die Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV separat voneinander betrachtet. Hier wird, zur Illustration der Methodik, wieder nur auf die BEV eingegangen, in der Zusammenfassung wird zu Übersichtszwecken die gesamte Technologie der Elektroantriebsmotoren, also BEV und PHEV, dargestellt.

Elektroantriebsmotor im BEV

Bis 2025 wird angenommen, dass zehn Prozent der Elektroantriebsmotoren in BEV durch Asynchronmotoren (ASM) – die schon heute auf dem Markt verbreitet sind – ersetzt werden. Weitere zehn Prozent der SEE-Permanentmagnet-Motoren werden im Substitutionsszenario in 2025 vom EESM substituiert, der heute ebenfalls auf dem Markt vertreten ist. Weitere fünfzig Prozent werden in 2025 durch Motoren mit reduziertem SEE-Gehalt (heute bereits verbaut) ersetzt.

In 2050 wird ein noch breiterer Mix an Motorentypen auf dem Markt erwartet. Neben dem ASM (fünfzehn Prozent), dem EESM (zwanzig Prozent) und dem Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt (35 Prozent) wird ebenso angenommen, dass auch die Motortypen ASM mit hohem rpm (fünf Prozent), SRM (fünf Prozent) und sonstigen Permanentmagneten (fünf Prozent) im Markt vertreten sind.

Die Unsicherheiten nehmen bis 2050 weiter zu. Daher wird sich in der Ausarbeitung auf den Zeithorizont bis 2025 konzentriert. In grauer Markierung sind Maßnahmen für die Erreichung der Substitutionen 2050 dargestellt.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Elektroantriebsmotoren im BEV aufgelistet.

Tabelle 7: Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der BEV-Elektroantriebsmotoren

Subst. Nr.	Substitutionsoption	Priorität	Ziel der Maßnahmen	Maßnahmen	Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt)	Zeithorizont
38BEV-1	ASM	2	Marktdurchdringung	Informationsangebot	Motorenhersteller, VDMA, VDA, ZVEI, VDI-ZRE, Bundesregierung (BMUB, BMWi) EU: JRC, Horizon, EIT	2017-2025
38BEV-2	EESM	2	Marktdurchdringung	Informationsangebot	Motorenhersteller, VDMA, VDA, ZVEI, VDI-ZRE, Bundesregierung (BMUB, BMWi) EU: JRC, Horizon, EIT	2017-2025
38BEV-3	Reduzierter SEE-Gehalt	1	Marktdurchdringung	Informationsangebot	Motoren-, Magnethersteller, VDMA, VDA, VDI-ZRE, Bundesregierung (BMUB, BMWi) EU: JRC, Horizon, EIT	2017-2025
38BEV-4	ASM mit hohem rpm, SRM, Sonstige PM-Magnete	3 (kein Marktanteil in 2025)	Technologieentwicklung und Marktdurchdringung	F&E und Informationsangebote		Ab 2017

Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zur UT BEV

Substitutionsnummer 38BEV-1, 38BEV-2, 38BEV-3: Die Technologieoptionen des ASM, des EESM und des Synchronmotors mit reduziertem SEE-Gehalt sind bereits heute in einzelnen BEV-Modellen auf dem Markt vertreten. Für eine globale Marktdurchdringung (Annahme Marktanteil in 2025 ASM und EESM zehn Prozent, red. SEE-Gehalt fünfzig Prozent/in 2050 ASM fünfzehn Prozent, EESM zwanzig Prozent, red. SEE-Gehalt 35 Prozent) müssen Informationsangebote und bewussteinbildende Maßnahmen zu den Substitutionsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden. Die höchste Priorität (1) liegt dabei in der Substitution durch Motoren mit reduziertem SEE-Gehalt, da hier ein Marktanteil von fünfzig Prozent in 2025 angenommen wird. EESM und ASM besitzen mit einem Marktanteil von jeweils zehn Prozent in 2025 eine Einstufung der Priorität von 2. Die Durchführung der Maßnahmen sollte sofort in die Wege geleitet werden und durch die Motoren- bzw. Magnethersteller und zugehörige Verbände selbst, aber auch von der Bundesregierung (BMUB, BMWi) unterstützt werden. Die Sensibilisierung der Fahrzeughersteller bezüglich der Kritikalität der Rohstoffe und möglichen Substitutionen kann dabei durch Programme der Bundesregierung (BMW i, BMUB Elektromobilität) aber auch in Europa durch die Europäische Kommission (EIT Raw Materials, JRC, Horizon-Programm) angetrieben werden.

Substitutionsnummer 38BEV-4: Bis 2050 wird davon ausgegangen, dass ein Mix an Motorentypen in vollelektrischen Pkw auf dem Markt vertreten ist. Für die Marktreife sind weitere Anstrengungen in F&E (bis 2030) sowie der Marktdurchdringung (ab 2030) erforderlich.

Im folgenden Bild sind die Maßnahmen hin zum Erreichen der Substitutionsoptionen für BEV und PHEV gemeinsam dargestellt.

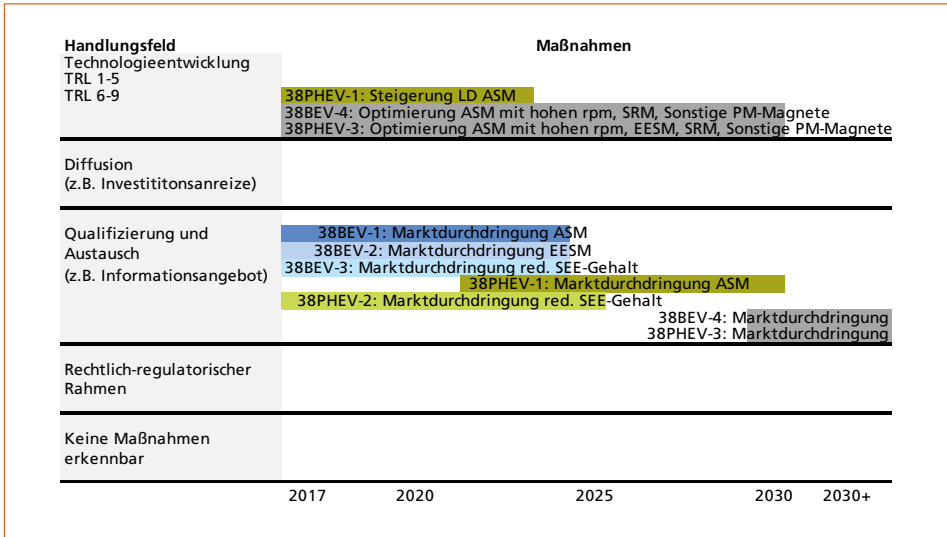


Bild 4: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Elektroantriebsmotoren (BEV und PHEV) mit Unterscheidung der Handlungsfelder

Fazit BEV und PHEV

Für die Implementierung von Substitutionsoptionen des Elektroantriebsmotors in vollelektrischen Fahrzeugen (BEV) bis 2025 bestehen Handlungsbedarfe in der Marktdurchdringung. Die Substitute ASM, EESM und reduzierter SEE-Gehalt sind bereits heute im Markt vertreten. Hier bedarf es einer umfassenden Informationsoffensive, die Vertrauen schafft und das Bewusstsein sensibilisiert.

Für den PHEV sind die Substitutionsmöglichkeiten differenziert zu betrachten. Der ASM ist noch nicht im Markt vertreten. Hier bedarf es noch weiterer F&E-Anstrengungen bis 2023, um wettbewerbsfähig zu sein. Anschließend ist eine Marktdurchdringung zu unterstützen. Der Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt ist bereits heute im Markt vertreten. Daher ist eine sofortige Informationsoffensive die entscheidende Maßnahme. Diese Maßnahme sollte bis 2025 forciert werden.

Die grau markierten Maßnahmen beziehen sich auf Maßnahmen, die erst nach 2025 wirken. Da Entwicklungen in diesem Zeithorizont unsicher sind, wird hier nicht näher auf die Substitutionsmöglichkeiten und ihrer Maßnahmen eingegangen.

7.4. Gesamtüberblick nach Priorität der Substitutionsalternativen

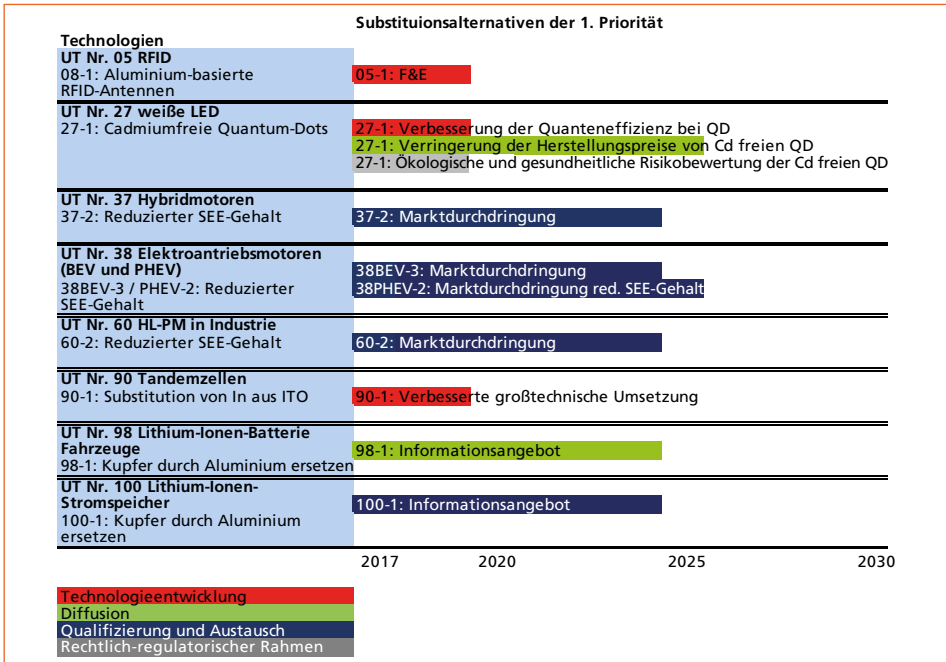


Bild 5: Übersicht der Substitutionsoptionen der ersten Priorität

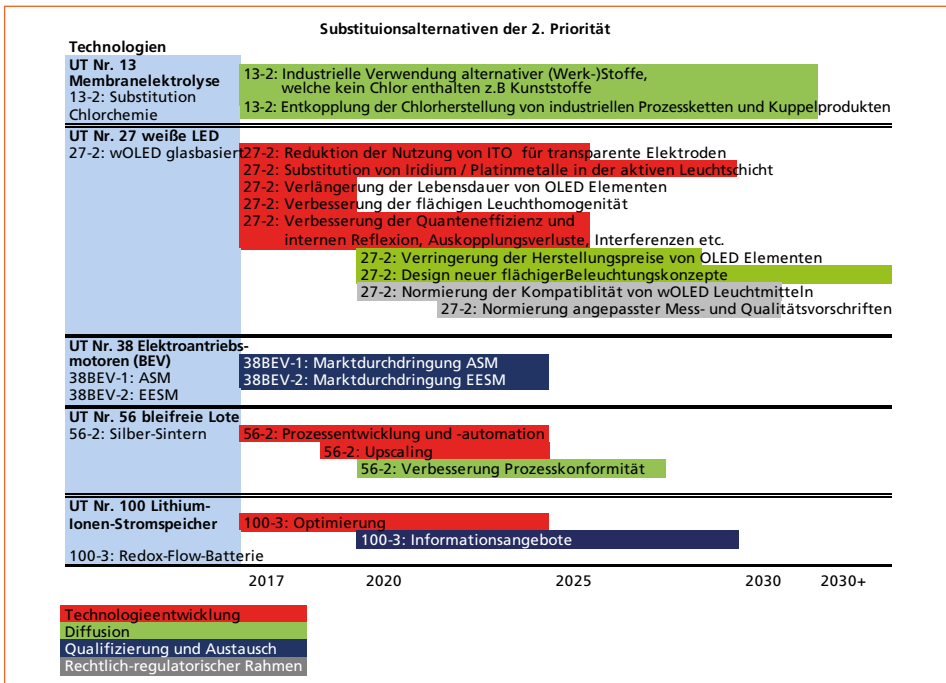


Bild 6: Übersicht der Substitutionsoptionen der zweiten Priorität

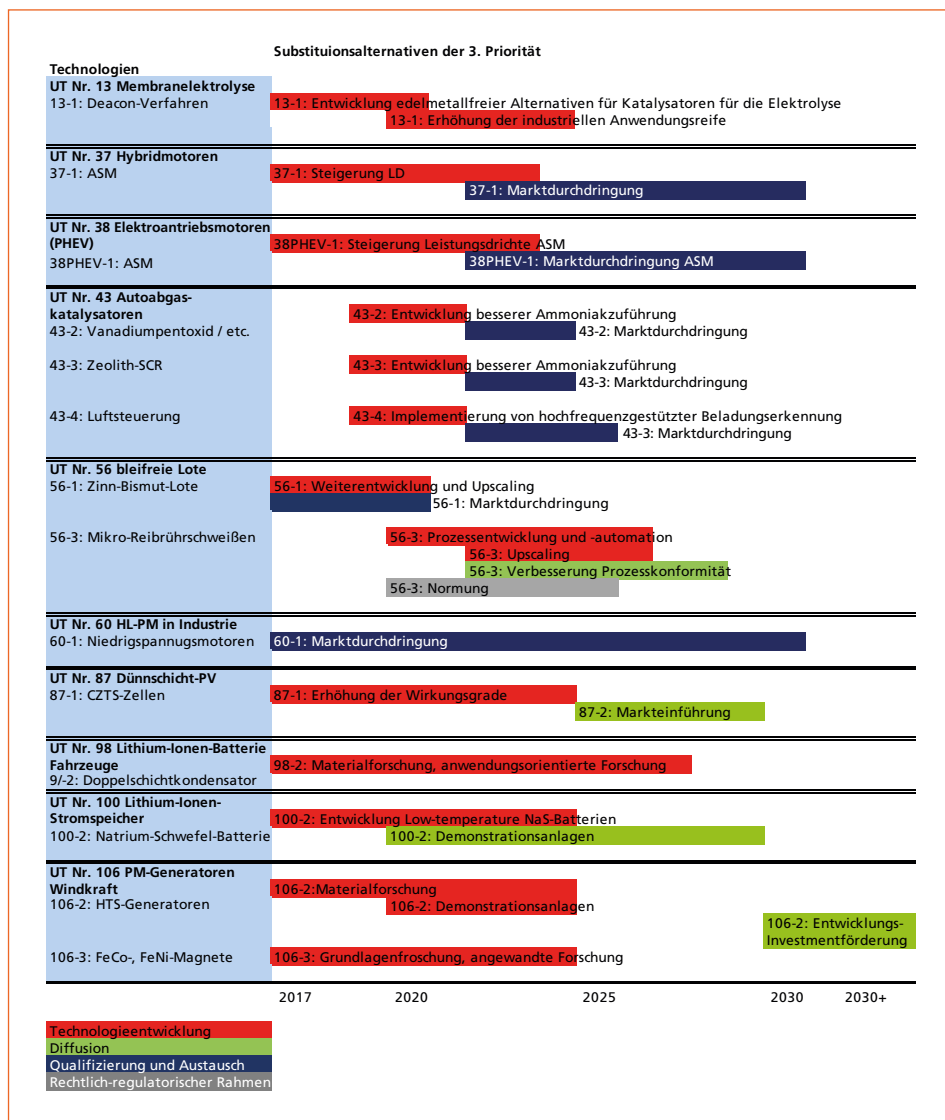


Bild 7: Übersicht der Substitutionsoptionen der dritten Priorität

Werden die Substitutionstechnologien mit den jeweiligen Maßnahmen¹ für alle UTs gemeinsam dargestellt, so ergibt sich folgende Einschätzung.

Für die Substitutionsoptionen der 1. Priorität (Marktanteil in 2025 \geq fünfzehn Prozent) sind weniger die F&E-Maßnahmen entscheidend, als vielmehr die Erhöhung der Marktdurchdringung durch Informationsmaterial und Bewusstseinsbildung. Diese Substitutionsoptionen sind in der Entwicklung schon sehr weit fortgeschritten bzw.

¹ Mit Redaktionsschluss der Tagungsbeiträge lag die endgültige Roadmap noch nicht vor.

bereits in Nischen auf dem Markt vertreten. Dies gilt z.B. für Substitutionen von weißen LEDs oder Hybrid- bzw. Elektroantriebsmotoren. Sie nehmen im Substitutionsportfolio für 2025 einen relevanten Marktanteil der untersuchten Umwelttechnologie mit mehr als fünfzehn Prozent ein.

Bei den Substitutionsoptionen der zweiten Priorität ist die Technologieentwicklung deutlich wichtiger. Diese Substitutionsoptionen sollen die untersuchte Umwelttechnologie in 2025 mit einem Anteil von fünf bis fünfzehn Prozent substituieren. Neben der Marktdurchdringung sind auch Maßnahmen im rechtlich-regulatorischen Rahmen (z.B. bei weißen OLED) formuliert.

Die größte Anzahl an Substitutionsalternativen fällt in den Bereich der dritten Priorität (Marktanteil in 2025 \leq fünf Prozent). Hier liegt der Fokus deutlich auf F&E-Maßnahmen mit nachfolgender Unterstützung in der Markteinführung. Diese Substitutionsalternativen sind unsicherer in ihrem Substitutionspotential (z.B. HTS-Generatoren) oder sind als Technologie bereits ausgereift, aber nur in kleinen Nischenmärkten einsetzbar (z.B. Niedrigspannungsmotor bei den Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie)

8. Literatur

- [1] BMUB 2012. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Green-Tech made in Germany 3.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin
- [2] Critical Raw Materials Innovation Network (CRM_InnoNet): CRM_InnoNet Homepage: <http://www.criticalrawmaterials.eu/>
- [3] Degreif, S.; Buchert, M.; Bulach, W.; Behrendt, S.; Müller, F.: Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2017, S. 65-84
- [4] European Institute of Innovation and Technology: EIT Raw Materials Homepage: <https://eit.europa.eu/eit-community/eit-raw-materials>
- [5] European Rare Earths Competency Network (ERECON): ERECON Homepage: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_de
- [6] Geschka, H; Schaufele, J; Zimmer, C.: Explorative Technologie-Roadmaps – Eine Methodik zur Erkundung technologischer Entwicklungslinien und Potenziale. In: Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Springer: Berlin, Heidelberg, 2017, S. 83-102
- [7] Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T. et al.: Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 112, Issue 14, S. 4257 - 4262. <http://www.pnas.org/content/112/14/4257.full.pdf?with-ds=yes>
- [8] GreenTech made in Germany 4.0 - Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Berlin, 2014, 222 S.
- [9] Möhrle, M. G.; Isenmann, R.: Grundlagen des Technologie-Roadmapping. In: Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Springer: Berlin, Heidelberg, 2017, S. 1-16
- [10] NABU 2013: Kreibich, R.; Hofmann, D.; Handke, V.; Scharp, M.: Ressourcenschonung durch ausgewählte grüne Zukunftstechnologien. Auftraggeber Naturschutzbund Deutschland NABU, Bearbeitung IZT, 2013

- [11] Solutions for Critical Raw Materials (SCREEN): SCREEN Homepage: <http://screen.eu/>
- [12] The European Innovation Partnership on Raw Materials (EIP): EIP on Raw Materials Homepage: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/content/european-innovation-partnership-eip-raw-materials>
- [13] Thoben, K.-D.; Eschenbächer, J.: Technologie-Roadmapping in der staatlich geförderten Forschungsplanung: Erkenntnisse aus der Anwendung in europäischen Verbundforschungsprojekten. In: Möhrle, M.G.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Springer: Berlin, Heidelberg, 2017, S. 277-290
- [14] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands. Gründruck. Berlin 2016