

TEXTE

03/2019

Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen

Abschlussbericht

TEXTE 03/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 93 316 0
UBA-FB 002705

Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen

Abschlussbericht

von

Dr. Matthias Buchert, Stefanie Degreif, Dr. Winfried Bulach, Dr. Doris Schüler,
Siddharth Prakash, Martin Möller, Dr. Andreas Köhler
Öko-Institut e.V., Darmstadt/Freiburg

Dr. Siegfried Behrendt, Dr. Roland Nolte, Adrian Röben
IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige
GmbH, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e. V.
Rheinstr. 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

Juni 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und
Metallindustrie
Felix Müller

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Das Projekt „Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien“ wurde 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 von August 2014 bis Februar 2018 durchgeführt. Im Zuge des Vorhabens wurde eine Roadmap für die Substitution kritischer Rohstoffe in Umwelttechnologien erarbeitet. 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.

Es wurden 115 Umwelttechnologien aus aktuellen Studien und politischen Leitdokumenten identifiziert und einem mehrstufigen Auswahlprozess unterzogen. Als Ergebnis der Auswertung wurden 40 Umwelttechnologien identifiziert, die als bedeutsam einzustufen sind und deshalb näher analysiert wurden. Mit Hilfe eines Szenario-Ansatzes wurde der Rohstoffbedarf für ein Business-As-Usual und ein Green-Economy-Szenario für die Jahre 2025 und 2050 ermittelt. Von insgesamt 64 Rohstoffen, die bezüglich der 40 ausgewählten Umwelttechnologien untersucht wurden, werden 38 Rohstoffe für die Bedarfsbefriedigung nachgefragt. Die Kritikalität der Rohstoffe, die in Umwelttechnologien eingesetzt werden, wurde durch eine Methodologie mit folgenden drei Dimensionen bestimmt: Versorgungsrisiko, Ökologisches Schadenspotential, Strategische Bedeutung.

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

Für eine Reihe bedeutsamer Umwelttechnologien konnten Substitutionsalternativen identifiziert werden. Relevante Substitutionsalternativen liegen vor allem in den Technologiefeldern Elektromotoren, Solarenergie, Beleuchtung und Speichertechnologien. Das breite Spektrum an Maßnahmen sowie die Ressourcen, die zu ihrer Umsetzung notwendig sind, machen deutlich, dass die Realisierung der Roadmap nur in einer konzertierten Aktion von Herstellern, Anwendern, Politik und Wissenschaft gelingen kann.

Abstract

The research project, entitled Substitution as a Strategy for Reducing the Criticality of Raw Materials for Environmental Technologies, was conducted by the Oeko-Institut and the Institute for Futures Studies and Technology Assessment on behalf of the German Federal Environment Agency (UBA) within the scope of the Environmental Research Programme of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB). It started in August 2014 and ran until February 2018. The project involved the development of a roadmap for critical raw materials substitution in environmental technologies. The roadmap aims to make an important contribution to the implementation and further development of Germany's national raw materials strategy and resource efficiency programme as well as to provide input for the national and international policy debate.

115 environmental technologies were identified from recent studies and key policy documents and were subjected to a multi-stage selection process. As a result of this assessment, 40 environmental technologies were identified as significant and were therefore analysed in more detail. A scenario approach was used to determine the raw material requirements for a business-as-usual and a green economy scenario for the years 2025 and 2050. Out of a total of 64 raw materials investigated across the 40 selected environmental technologies, 38 will play a part in satisfying raw materials requirements. The criticality of the raw materials used in environmental technologies was ranked using a

methodology comprising the following three dimensions: supply risk, environmental implications, and strategic significance.

In order to select the 20 priority environmental technologies for screening of substitution options, the raw materials ranking was applied to the environmental technologies.

Substitution options were identified for a number of key environmental technologies. Relevant substitution options are mainly available for the following technologies: electric motors, solar energy, lighting and storage technologies. The broad spectrum of measures, but also the resources required for their implementation, show that the roadmap can only be implemented through concerted action by manufacturers, users, policy-makers and the scientific community.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	15
Summary.....	33
1 Hintergrund und Ziele des Projektes SubSKrit.....	49
2 Methodik	51
2.1 Methodik: Systematisierung und Screening von Umwelttechnologien (AP 1)	51
2.2 Methodik: Abschätzung des funktionalen Materialbedarfs (AP 2)	55
2.3 Methodik: Kritikalitätsanalyse (AP 3)	55
2.4 Methodik: Screening des Substitutionspotentials (AP 4)	57
2.5 Methodik: Kritikalitätsauswirkungen (AP 5)	58
2.6 Methodik: Substitutions-Roadmap (AP 6)	59
3 Umwelttechnologien im Fokus	60
3.1 Vorauswahl von Umwelttechnologien	60
3.2 Szenarien zur Marktentwicklung von Umwelttechnologien	62
3.3 Materialbedarf der ausgewählten Umwelttechnologien	63
3.3.1 Rohstoffe im Fokus.....	63
3.3.2 Spezifischer Materialbedarf	64
3.3.3 Absoluter Materialbedarf in den Szenarien.....	64
3.3.4 Identifizierung der besonders relevanten Rohstoffe	68
4 Kritikalitätsanalyse zur Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien.....	70
4.1 Rankingergebnisse der Rohstoffe	70
4.2 Rankingergebnisse der Umwelttechnologien.....	73
4.3 Sensitivitätsanalyse der Rankingergebnisse	78
5 Substitutionsoptionen der 20 prioritären Umwelttechnologien.....	81
5.1 Solartechnologien	81
5.1.1 Dünnschicht-PV	81
5.1.2 Tandemzellen	82
5.1.3 Concentrated Solar Power (CSP)	84
5.2 Speichertechnologien	85
5.2.1 Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge	85
5.2.2 Lithium-Ionen Speicher (stationär)	87
5.2.3 Batteriespeicher für Pedelecs	88
5.3 Motoren / Generatoren.....	89

5.3.1	Hybridmotoren.....	89
5.3.2	Elektroantriebsmotoren BEV und PHEV.....	91
5.3.3	Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie	92
5.3.4	Permanentmagnetgeneratoren in WKA	94
5.4	Beleuchtung.....	96
5.4.1	Weißer LED	96
5.5	Weitere Technologien	98
5.5.1	RFID für Wertstofftrennung	98
5.5.2	Bleifreie Lote	100
5.5.3	Membranelektrolyse.....	101
5.5.4	Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren	103
5.6	Technologien ohne Substitutionsanalyse.....	105
5.6.1	Grüne Rechenzentren	105
5.6.2	Industriekatalysatoren	107
5.6.3	Pedelec-Motoren	107
5.6.4	Synchron-/Asynchron-Generatoren WKA.....	108
5.6.5	Kraftwerke GuD/Gas	108
5.7	Fazit des Substitutionspotentialscreenings	109
6	Auswirkungen eines Substitutionsszenarios auf die Rohstoffkritikalität im Bereich Umwelttechnologien	110
6.1	Erklärung des Substitutionsszenarios am Beispiel von Elektroantriebsmotoren in PKW.....	110
6.2	Wesentliche Änderungen des Rohstoffbedarfs auf Technologieebene am Beispiel von Elektroantriebsmotoren in PKW	112
6.3	Wesentliche Änderungen des Rohstoffbedarfs aus Rohstoffperspektive.....	112
6.3.1	Silber.....	112
6.3.2	Gold	113
6.3.3	Palladium.....	114
6.3.4	Platin	114
6.3.5	Seltenerdelemente: Dysprosium Terbium, Neodym, Praseodym	115
6.3.6	Lithium	118
6.3.7	Zinn.....	118
6.3.8	Gallium	119
6.3.9	Titandioxid.....	119
6.3.10	Mangan	120
6.3.11	Sonstige Rohstoffe	121

6.4	Auswirkungen auf die Kritikalität.....	122
6.5	Datenüberblick der Ergebnisse.....	123
7	Roadmap für die Substitution bei Umwelttechnologien.....	128
7.1	Technologieentwicklung.....	128
7.2	Markteinführung.....	135
7.3	Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch.....	136
7.4	Rechtlich-regulatorischer Rahmen.....	138
7.5	Prioritäten der Substitutionsoptionen nach erwartetem Marktanteil in 2025.....	138
8	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	143
9	Literatur / Quellen.....	145
10	Anhang.....	150

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Absoluter Dysprosiumbedarf [in Tonnen] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	21
Abbildung 2:	Gesamtranking der Rohstoffe.....	23
Abbildung 3:	Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	28
Abbildung 4:	Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	29
Abbildung 5:	Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit einem möglichen Marktanteil > 15 % in 2025	31
Figure 6:	Absolute material requirements for dysprosium [in tonnes] compared with primary production 2013.....	37
Figure 7:	Final ranking of the raw materials	39
Figure 8:	Dysprosium requirement for the environmental technologies studied in the green economy scenario and substitution scenario in 2025 (left) and 2050 (right)	44
Figure 9:	Platinum requirement for the environmental technologies studied in the green economy scenario and substitution scenario in 2025 (left) and 2050 (right)	44
Figure 10:	Environmental technologies and their substitution options with a possible market share > 15% in 2025	47
Abbildung 11:	Überblick über die Hauptprojektphasen	51
Abbildung 12:	Segmentierung der Umwelttechnologien nach Leitmärkten	61
Abbildung 13:	Absoluter Dysprosiumbedarf [in Tonnen] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	66
Abbildung 15:	Spannbreite des Ranking in den Szenarien bei veränderter Gewichtung (Dimension Versorgungsrisiko)	79
Abbildung 16:	Spannbreite des Rankings in den Szenarien bei veränderter Bewertung (Dimension Versorgungsrisiko)	80
Abbildung 17:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Dünnschicht-Solarzellen.....	81
Abbildung 18:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für CSP-Anlagen.....	83
Abbildung 19:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Tandemzellen in der hochkonzentrierenden PV	84
Abbildung 20:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen	86
Abbildung 21:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für stationäre Li-Ionen-Stromspeicher.....	87

Abbildung 22:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Pedelec-Batteriespeicher	89
Abbildung 23:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Hybridmotoren	90
Abbildung 24:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für PHEV und BEV	91
Abbildung 25:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie	93
Abbildung 26:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen	94
Abbildung 27:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für weiße Leuchtdioden	96
Abbildung 28:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für RFID	98
Abbildung 29:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für die bleifreien Lote	100
Abbildung 30:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für die Chlor-Alkali Membranelektrolyse	102
Abbildung 31:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator	104
Abbildung 32:	Silberbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	113
Abbildung 33:	Goldbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	113
Abbildung 34:	Palladiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	114
Abbildung 35:	Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	115
Abbildung 36:	Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	115
Abbildung 37:	Neodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	116
Abbildung 38:	Praseodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	117
Abbildung 39:	Terbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	117
Abbildung 40:	Lithiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	118

Abbildung 41:	Zinnbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	119
Abbildung 42:	Galliumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	119
Abbildung 43:	Titandioxidbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	120
Abbildung 44:	Manganbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts).....	121
Abbildung 44:	Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen in der Technologieentwicklung.....	134
Abbildung 45:	Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen in der Markteinführung.....	136
Abbildung 46:	Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen zur Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch.....	137
Abbildung 47:	Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen zum rechtlich-regulatorischen Rahmen.....	138
Abbildung 48:	Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit einem möglichen Marktanteil > 15 % in 2025	139
Abbildung 49:	Fokussierung der Umwelttechnologien und Rohstoffe.....	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die ausgewählten 40 Umwelttechnologien nach Leitmärkten	18
Tabelle 2:	Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2.....	22
Tabelle 3:	Substitutionsoptionen	24
Table 4:	The 40 selected environmental technologies, classed by lead market.....	35
Table 5:	Indicators according to VDI Guideline Series 4800 No. 2	38
Table 6:	Substitution options	40
Tabelle 7:	Beispiele für Gesamtergebnisse aus dem Screening.....	54
Tabelle 8:	Die ausgewählten 40 Umwelttechnologien nach Leitmärkten	54
Tabelle 9:	Faktoren der Szenarien Business-As-Usual und Green Economy.....	63
Tabelle 10:	64 Rohstoffe im Fokus des Projektes.....	63
Tabelle 11:	Spezifischer Materialbedarf der Elektroantriebsmotoren (in Gramm je BEV bzw. PHEV).....	64
Tabelle 12:	Absoluter Materialbedarf national (in t): Elektroantriebsmotoren	65
Tabelle 13:	Absoluter Materialbedarf global (in t): Elektroantriebsmotoren.....	65
Tabelle 14:	Globaler Rohstoffbedarf (in alphabetischer Reihenfolge).....	66
Tabelle 15:	Rohstoffe ohne identifizierten Materialbedarf in den 40 untersuchten Umwelttechnologien	68
Tabelle 16:	Rohstoffbedarf aller Umwelttechnologien im Green Economy 2025 in Relation zur Gesamtproduktion 2013	68
Tabelle 17:	Rohstoffranking Versorgungsrisiko.....	70
Tabelle 18:	Rohstoffranking Ökologisches Schadenspotential	71
Tabelle 19:	Rohstoffranking Strategische Bedeutung.....	72
Tabelle 20:	Gesamtranking Rohstoffe	73
Tabelle 21:	Übertragung der Rohstoffsicht auf die Umwelttechnologien am Beispiel der UT „Grüne Rechenzentren“	74
Tabelle 22:	Ranking der Umwelttechnologien: Die Top 11 Umwelttechnologien.....	74
Tabelle 23:	Ranking der Umwelttechnologien: Weitere 6 Umwelttechnologien in der Betrachtung.....	75
Tabelle 24:	Ranking der Umwelttechnologien: 4 Grenzfälle bei der Auswahl der 20 Umwelttechnologien	76
Tabelle 25:	Ranking der Umwelttechnologien: 5 Umwelttechnologien fallen aus der Betrachtung heraus.....	76
Tabelle 26:	15 Umwelttechnologien ohne identifizierte Rohstoffrelevanz	77
Tabelle 27:	Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien	77
Tabelle 28:	Szenarien der Dimension Versorgungsrisiko	78
Tabelle 29:	Substitutionsszenario des Elektroantriebsmotors für BEV.....	110

Tabelle 30:	Substitutionsszenario des Elektroantriebsmotors für PHEV	111
Tabelle 31:	Globale Rohstoffbedarf UT Nr. 38 (Elektromotoren: BEV und PHEV) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green Economy (in Tonnen)	112
Tabelle 32:	Absolute und prozentuale Veränderung der Kritikalität der einzelnen Rohstoffe im Substitutionsszenario versus Green-Economy-Szenario	122
Tabelle 33:	Rohstoffbedarf im Substitutionsszenario und Green Economy- Szenario	123

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ASM	Asynchronmotor
ATO	Aluminium-dotiertes Zinnoxid
BAU	Business As Usual
BEV	Vollelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Selen
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
CSP	Concentrated Solar Power
EESM	Extern erregter Synchronmotor
EIP	European Innovation Partnership
EIT	European Institute of Innovation and Technology
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeuge (fuel cell electric vehicle)
FTO	Fluor-dotiertes Zinnoxid
HEV	Hybridfahrzeug
HTS	Hochtemperatursupraleiter
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
ITO	Indiumzinnoxid (indium tin oxide)
kW	Kilowatt
LED	Light emitting diode – Leuchtdiode
MOF	metallorganischen Gerüstverbindung (metal-organic framework)
OLED	Organic light emitting diode – organische Leuchtdiode
PHEV	Plug-in-Hybrid-Pkw
PMG	Permanentmagnet
PTFE	Polytetrafluorethylen
RFID	Radio Frequency Identification
SEE	Seltenerdelement
SRM	Geschalteter Reluktanzmotor
SVK	Sauerstoffverzehrkatode
TCO	Transparentes leitfähiges Oxid (transparent conducting oxide)
TFM	Transversalflussmotor
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme)
UT	Umwelttechnologie
WKA	Windkraftanlagen

YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
------------	--------------------------

Zusammenfassung

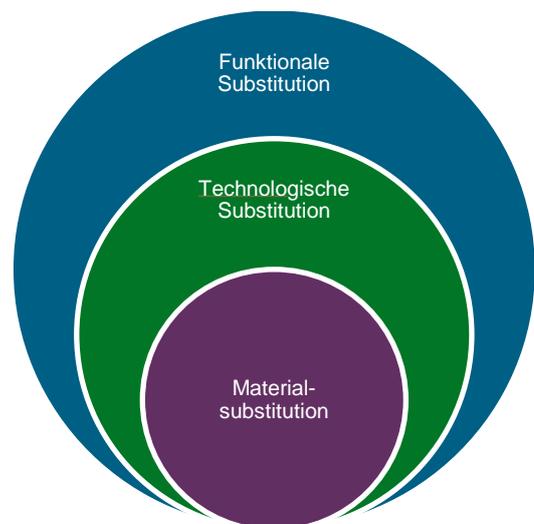
Substitution als Strategie zur Ressourcenschonung

Ausbau und Einsatz innovativer Umwelttechnologien zählen zu den wichtigsten Zukunftsfaktoren für eine Steigerung der Ressourceneffizienz, für die Schonung von Ressourcen 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. Die Europäische Kommission führt regelmäßig Listen zu den kritischen Rohstoffen¹. Eine Studie für die Kreditanstalt für Wiederaufbau untersuchte die Risiken der Versorgung Deutschlands mit mineralischen Rohstoffen². Demzufolge sind die identifizierten kritischen Rohstoffe für viele Umwelttechnologien insbesondere für den nachhaltigen Umbau der Energieversorgung und der Mobilitätswende 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 (ProgReSS) 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 umsetzen³. 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. 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 Funktionsweisen⁴.

Alle Ausprägungen der Substitutionen stellen auch Qualitätssubstitutionen dar, die in unterschiedlichem Maße die wirtschaftliche, ökologische oder technische Leistung beeinflussen (siehe obige Abbildung).

Substitutionsformen



¹ Europäische Kommission 2017: List of critical raw materials for the EU, <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20170913---2017-list-of-critical-raw-materials-for-the-eu.pdf>

² Erdmann, L; Behrendt, S.; Feil, M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland, KfW, Berlin 2011

³ BMUB 2016: <https://www.bmu.de/publikation/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-ii-programm-zur-nachhaltigen-nutzung-und-zum-schutz-der-natue/>

⁴ Ziemann, S. et al. 2010: Substitution knapper Metalle–ein Ausweg aus der Rohstoffknappheit?, in Chemie Ingenieur Technik 2010, 82, No. 11.

Das Projekt SubSKrit

Das Projekt „Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien“ (SubSKrit, FKZ: 3714 93 316 0) wurde 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) von August 2014 bis Februar 2018 durchgeführt. Im Zuge des Vorhabens wurde eine Roadmap für die Substitution kritischer Rohstoffe in Umwelttechnologien erarbeitet. 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 wurden nicht nur Maßnahmen identifiziert, sondern auch die verantwortlichen Akteure und Instrumente benannt sowie externe Fachleute in das Projekt einbezogen.

Welche Umwelttechnologien standen im Fokus?

Unter Umwelttechnologien werden Technologien, Güter und Dienstleistungen verstanden, die „der Vermeidung, Verminderung und Beseitigung von Umweltbeeinträchtigungen sowie der Wiederherstellung bereits geschädigter Umweltfunktionen dienen und somit einen Beitrag zu einem nachhaltigen Umgang mit den natürlichen Ressourcen leisten“⁵. Die Umwelttechnologien wurden analog dem Umwelttechnologieatlas des BMUB (2014)⁶ in sechs Leitmärkte unterteilt (s. Tabelle unten). Auf Basis der Systematik wurden 115 Umwelttechnologien aus aktuellen Studien und politischen Leitdokumenten identifiziert und einem mehrstufigen Auswahlprozess unterzogen. Als Ergebnis der Auswertung wurden 40 Umwelttechnologien identifiziert, die als bedeutsam einzustufen sind und deshalb näher analysiert wurden. Da die Technologieauswahl auf der Grundlage einer breiten Literaturanalyse, die wesentliche Referenzdokumente umfasst, erfolgte, ist davon auszugehen, dass das Spektrum an Umwelttechnologien im Wesentlichen gut erfasst wurde.

Tabelle 1: Die ausgewählten 40 Umwelttechnologien nach Leitmärkten

Energieerzeugung	Energieeffizienz	Rohstoffeffizienz	Mobilität	Kreislaufwirtschaft	Wasserwirtschaft
Lithium-Ionen-Stromspeicher Concentrating Solar Power High temperature superconducting (HTS)-Generatoren Reluktanz-	Kompressoren RFID Weiße Leuchtdioden (LED) Organische Leuchtdioden (OLED) Hochleistungs-Permanenmagnete in Industrieanwendun-	Aerogele Nanobeschichtung von Oberflächen Bleifreie Lote Industriekatalysatoren Celitement Precision Farming	Pedelecs Elektroantriebsmotoren Karosserie Leichtbau (Titan und Scandium airframe) Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren	Automatische Stofftrennverfahren Schlacken- und Klärschlamm-aufbereitung Phosphorrückgewinnung	Wassereffizienztechnologien Umkehrosmose (hochpermeable Membranen) Dezentrale Wasseraufbereitung

⁵ Schippl, J. et al. 2009: Roadmap Umwelttechnologien 2020, ITAS Karlsruhe.

⁶ BMUB 2014: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Büchele R. et al., Roland Berger Strategy Consultants, Berlin, Juli 2014

Energie- erzeugung	Energieeffizienz	Rohstoff- effizienz	Mobilität	Kreislauf- wirtschaft	Wasserwirtschaft
Generatoren Gas-und- Dampf- Kraftwerke Dünnschicht- Solarzellen Tandemzellen Kristalline Silizium- Solarzellen Speicher- kraftwerke Permanent- magnet- Generatoren in Windkraft- anlagen Fremderregte Synchronge- neratoren Windkraftan- lagen Fremderregte Asynchronge- neratoren in Windkraftan- lagen	gen Grüne Rechen- zentren Membranelekt- rolyse Chloral- kali mit Sauer- stoffverzehrka- thode		Lithium-Ionen- Batterien für Fahrzeuge Hocheffiziente Flugzeug- triebwerke Hybridmoto- ren		

Wie entwickelt sich der Materialbedarf der Umwelttechnologien?

Die Dynamik auf den Märkten für Umwelttechnologien spielt für die Analyse der Kritikalität von Rohstoffen eine wichtige Rolle. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die global steigende Nachfrage nach Umwelttechnologien deren Marktvolumen weiterhin expandieren lässt. Die Geschwindigkeit des Wachstums kann aber unterschiedlich ausfallen, je nachdem wie sich die Rahmen- und Umfeldbedingungen in Zukunft verändern werden. Der Analyse der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien wurden deshalb zwei Szenarien zugrundegelegt: Zum einen ein Business as usual – Szenario (BAU), das bestehende Trends extrapoliert. Zum anderen ein Szenario, in dem sich die Marktdynamik für Umwelttechnologien deutlich stärker entwickelt. Dies wäre der Fall, wenn „Green Economy“, das heute schon in Deutschland aber auch von vielen internationalen Organisationen und Ländern als Leitbild für das 21. Jahrhundert verstanden wird, sich durchsetzt. Das Trendszenario wäre dann ein Szenario mit höherer Eintrittswahrscheinlichkeit, dass Green Economy-Szenario eher ein optimistisches Szenario, das eine Analyse ermöglicht, die aufzeigt, wie sich der Rohstoffbedarf im Fall einer grundlegenden Transformation in Richtung einer „grünen“ Wirtschaft entwickelt.

In prospektiver Sicht zeigt sich, dass von insgesamt 64 Rohstoffen, die bezüglich der 40 ausgewählten Umwelttechnologien untersucht wurden, 38 Rohstoffe für die Bedarfsbefriedigung nachgefragt werden (vgl. Tabelle). Bei 21 Rohstoffen wurde global mindestens für eines der Szenarien, BAU-Szenario bzw. Green Economy-Szenario, eine Nachfrage ermittelt, die 3% der gesamten globalen Primärgewinnung (Jahr 2013) übersteigt und damit strategisch relevant für die Marktentwicklung und Verbreitung der betroffenen Umwelttechnologien werden kann.

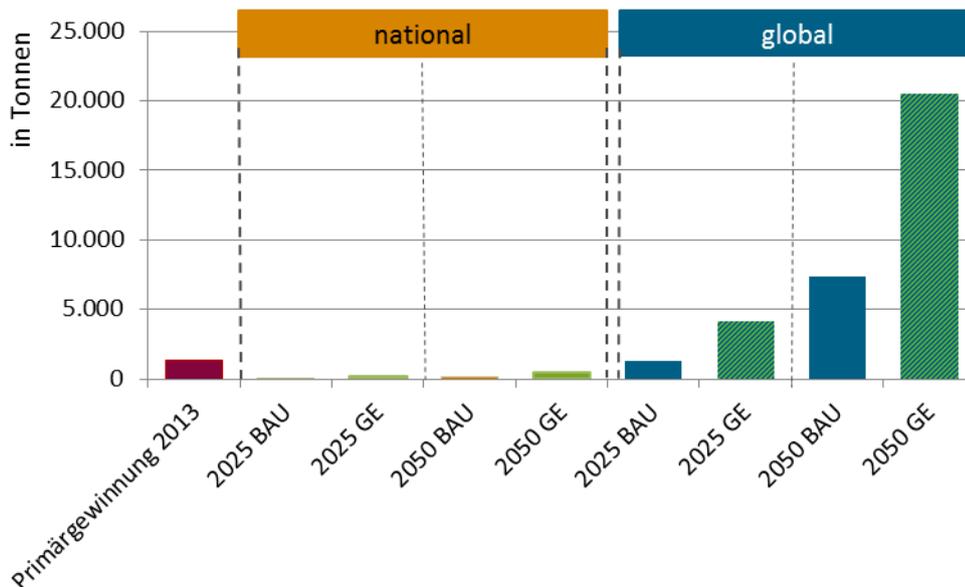
Für das Seltenerdmetall Dysprosium sind exemplarisch über alle 40 untersuchten Umwelttechnologien die Szenarioergebnisse in der folgenden Abbildung dargestellt. Dysprosium wird fast ausschließlich als Zusatz für Neodym-Eisen-Bor-Magnete eingesetzt, welche höheren Temperaturen ausgesetzt sind. Der Zusatz von Dysprosium ist für die funktionelle Langlebigkeit dieser Permanentmagnete unter Tempera-

Rohstoffbedarf aller Umwelttechnologien im Green Economy 2025 in Relation zur Gesamtproduktion 2013

Rohstoff	Anteil
Palladium	423%
Ruthenium	409%
Rhodium	331%
Dysprosium	304%
Iridium	289%
Lithium	247%
Terbium	238%
Platin	153%
Zinn	82%
Neodym	81%
Praseodym	67%
Gallium	63%
Silber	58%
Indium	32%
Cer	15,5%
Titan als TiO ₂	12,5%
Magnesium	11,7%
Kupfer	11,2%
Silizium (Metall)	5,0%
Mangan	4,8%
Gold	3,3%
Titan (Metall)	2,6%
Yttrium	2,6%
Selen	1,3%
Europium	1,0%
Gadolinium	0,4%
Kobalt	0,4%
Zirkon	0,3%
Molybdän	0,3%
Nickel	0,3%
Germanium	0,2%
Chrom	0,3%
Natürlicher Graphit	0,2%
Zink	0,03%
Tantal	0,03%
Vanadium	0,01%
Blei	0,01%
Phosphat	0,001%

turbeanspruchung sehr wichtig. Der Dysprosiumbedarf für alle 40 untersuchten Umwelttechnologien wird der Primärgewinnung 2013 gegenübergestellt. Aus der Abbildung 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.

Abbildung 1: Absoluter Dysprosiumbedarf [in Tonnen] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Quelle: Eigene Abbildung

BAU = Business-As-Usual-Szenario; GE = Green Economy-Szenario

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 vollelektrische Pkw (BEV), Plug-in-Hybride (PHEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (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 Dysprosiumsgehalts in den entsprechenden Neodym-Eisen-Bor-Magneten.

Kritikalität der Umwelttechnologien

Die Kritikalität der Rohstoffe, die in Umwelttechnologien eingesetzt werden, wurde durch eine Methodologie mit folgenden drei Dimensionen bestimmt:

1. Versorgungsrisiko
2. Ökologisches Schadenspotential
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 auf die Umwelttechnologien übertragen wurde.

Für die Kritikalitätsdimension **Versorgungsrisiko** wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands⁷ genutzt. Die Richtlinie basiert auf einem System von 13 Indikatoren, die in drei Gruppen eingeteilt sind. In folgender Tabelle sind die Indikatoren dargestellt.

Tabelle 2: 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		

Quelle: VDI 2016: Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Gründruck. Berlin 2016.

Für die Kritikalitätsdimension **ökologisches Schadenspotential** wird auf die Daten und die Methodik von Graedel et al. aus der Veröffentlichung „Criticality of metals and metalloids“⁸ 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 ReCiPe⁹ berechnet. Die Bestimmung des ökologischen Schadenspotentials basierte auf den Endpoints Ökosysteme und menschliche Gesundheit.

Die Bestimmung der Kritikalitätsdimension **strategische Bedeutung** fundiert auf den in den Szenarien ermittelten **Materialbedarfen** für die Umwelttechnologien. Hierbei wird die strategische Bedeutung festgemacht am globalen Bedarf der 40 betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy-Szenario für das Jahr 2025 in Relation zur globalen Primärförderung 2013.

Jedem der drei Kritikalitätsdimensionen ist 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, wurden die drei Ränge der Elemente über die Kritikalitätsdimensionen zusammengefasst, um ein **übergreifendes Gesamtranking**

⁷ VDI 2016: Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Gründruck. Berlin 2016.

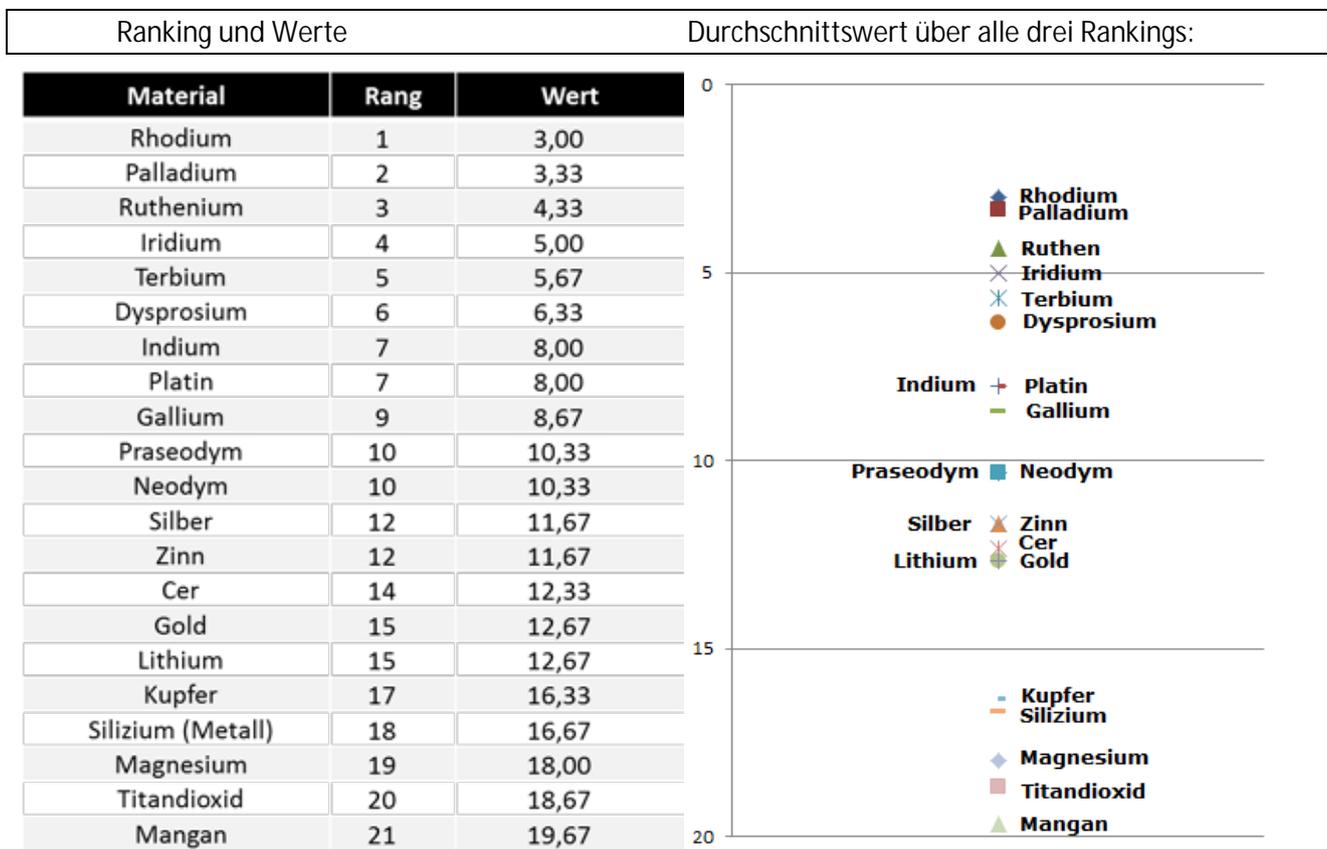
⁸ Graedel et al. 2015: Graedel, T. E.;Harper, E. M.; Nassar, N.T. u.a.: Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 112, Issue 14, 2015, S. 4257 - 4262. (<http://www.pnas.org/content/112/14/4257.full.pdf?with-ds=yes>).

⁹ 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).

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 Gesamt-ranking 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).

Dieses Gesamt-ranking ist in der folgenden Abbildung 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.

Abbildung 2: Gesamt-ranking der Rohstoffe



Quelle: Eigene Darstellung

Um 20 prioritäre Umwelttechnologien für die Untersuchung der Substitutionsoptionen auszuwählen, wurde das Ranking der Rohstoffe im folgenden Schritt auf die Umwelttechnologien übertragen. Dabei wurden folgende vier relevante Größen herangezogen.

1. Höchstes einzelnes Rohstoffranking in der Umwelttechnologien
2. Mittelwert über alle Rohstoffe und Kritikalitätsbereiche der Umwelttechnologien
3. Anzahl relevanter Rohstoffe in der Umwelttechnologien

4. Für besondere Grenzfälle: Massenbedarf des entscheidenden Rohstoffs 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 Umwelttechnologien, 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 LEDs, grüne Rechenzentren, bleifreie Lote, RFID oder die Sauerstoffverzehrkathode. Die Ergebnisse sind robust, wie eine Sensitivitätsanalyse zeigt. Verändert man die Gewichtung der Kriterien und der Bewertung der Kriterien ändern sich zwar die Reihenfolgen der Kritikalitätseinschätzungen der Rohstoffe, aber die grundsätzliche Kritikalitätseinschätzung der Umwelttechnologien bleibt bestehen.

Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien mit vergleichsweise hoher Kritikalität lassen sich folgenden Technologiegruppen zuordnen:

- ▶ Elektronik: Bleifreie Lote, grüne Rechenzentren
- ▶ Katalysatoren: Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren, Industriekatalysatoren
- ▶ Permanentmagnete: Pedelecs, Hybridmotoren, Elektroantriebsmotoren, Hochleistungs-Permanentmagnete übrige Anwendungen, Permanentmagnet-Generator für Windkraftanlagen
- ▶ Solartechnologie: Dünnschicht-Solarzellen, Tandemzellen, Concentrated Solar Power (CSP)-Technologie
- ▶ Speichertechnologien: Lithium-Ionen-Batterien Plug-in-Hybrid Elektrofahrzeug (PHEV), Lithium-Ionen-Stromspeicher
- ▶ Generatoren ohne Permanentmagnete: Synchron-Generator, Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen
- ▶ Sonstige Technologien: RFID, Sauerstoffverzehrkathode, weiße Leuchtdioden (LED), Kraftwerke GuD (Gas und Dampf)/Gas.

Substitutionsoptionen

Für die betrachteten Umwelttechnologien konnten folgende denkbaren Optionen zur Substitution kritischer Rohstoffe identifiziert werden.

Tabelle 3: Substitutionsoptionen

Umwelttechnologie	Materialebene	Substitutionsoptionen Technologieebene	Funktionale Ebene
Elektronik			
Bleifreie Lote	Zinn-Bismut-Legierungen	Silber-Sintern Mikro-Reibrührschweißen	Molekulare Elektronik
Grüne Rechenzentren			-

Umwelttechnologie	Materialebene	Substitutionsoptionen Technologieebene	Funktionale Ebene
Katalysatoren			
Fahrzeug-Abgas-Katalysator	Ersatz von Platin durch Palladium Ersatz Platin durch Multikatalysatoren in Dieselfahrzeugen Partieller Ersatz Platin durch Gold Ersatz Platin durch Silber in Dieselpartikelfiltern Ersatz von Palladium durch Platin	Rhodium durch Platin in einer HC-SCR Rhodium durch $V_2O_5/TiO_2/W$ in einer SCR Rhodium durch Zeolithe (mit Kupfer oder Eisen) in einer SCR Cer durch andere Luftsteuerung	Elektromobilität mit BEV Elektromobilität mit FCEV
Industriekatalysatoren			
Permanentmagnete			
Pedelecs - Motoren	SEE-freie Motoren	Reluktanzmotor	
Hybridmotoren	Samarium-Kobalt-Magnete Cer und Kobalt für Neodym und Dysprosium	Asynchronmotor (ASM) Asynchronmotor mit hoher Drehzahl (ASM mit hohen rpm) Extern erregte Synchronmotor (EESM) Sonstige Permanentmagnete Geschalteter Reluktanzmotor (SRM) Transversalflussmotor (TFM) NdFeB-Magnet ohne schwere Seltene Erden	
Elektroantriebsmotoren BEV und PHEV	Samarium-Kobalt-Magnete Cer und Kobalt für Neodym und Dysprosium	NdFeB-Magnete mit reduziertem Gehalt an Seltenen Erden ASM ASM hohe rpm EESM Sonstige Permanentmagnete SRM TFM	
Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen	Samarium-Kobalt-Magnete	Drehstrom-Asynchronmotor Niedrigspannungsmotor (Synchronreluktanzmotor)	

Umwelttechnologie	Materialebene	Substitutionsoptionen Technologieebene	Funktionale Ebene
Permanentmagnet-Generatoren in WKA	Dysprosium durch Terbium FeCo- oder FeNi-basierte Materialien	Nanokomposite Nanostrukturen Fremderregte Generatoren HTS-Generatoren	
Generatoren ohne Permanentmagnete			
Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen		Reluktanzmotor	
Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen		Reluktanzmotor	
Speichertechnologien			
Pedelects – Batterien	Kupfer durch Aluminium		Brennstoffzelle
Lithium-Ionen-Batterie in Fahrzeugen		Nickel-Metallhydrid-Batterie	Brennstoffzelle Doppelschichtkondensator
Stationäre Lithium-Ionen-Stromspeicher		Natrium-Schwefel-Batterie Redox-Flow-Batterie	Power-to-Gas (Wasserstoff)
Solartechnologien			
Dünnschichtsolarzellen	Indium durch Gallium, Gallium durch Indium Indium-freie TCOs	CZTS-Zellen	
Concentrating Solar Power	Aluminium-Spiegel		
Tandemzellen in konzentrierender PV	Indium-freie TCOs Aluminium-Spiegel		
Sonstige Technologien			
Gas-und-Dampf-Kraftwerke	Kupfer durch Aluminium	Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (Aluminiumoxid) C-C-Komposite	
RFID	Kupfer durch Aluminium Kupfer durch Silber	Händische Sortierung Mechanische Verfahrenstechnik optische Sensoren, Software	Abfallvermeidung Pfandsysteme
Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode	Substitution Ag durch Ag(I)- oder Ag(II)-Oxide	Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren	Substitution der Produkte der Chlorchemie

Umwelttechnologie	Materialebene	Substitutionsoptionen Technologieebene	Funktionale Ebene
Weißer Leuchtdioden	MOF Quantum Dots Cadmium-freie Quantum Dots	Weißer OLEDs Folienbasierte flexible wOLEDs	

Ag: Silber; AlNiCo: Aluminium-Nickel-Kobalt; ASM: Asynchronmotor; Au: Gold; BEV: Battery Electric Vehicle (voll-elektrischer Antrieb); C-C-Komposite: Carbon-Carbon Composites; CZTS-Zellen: Kupfer-Zink-Zinnsulfid-Solarzellen; EESM: Electrically / Externally Excited Synchronous Motor; FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug); GuD: Gas und Dampf; HTS: High Temperature Superconductor; LED: Light Emitting Diode (Leuchtdiode); MOF: *Metal-Organic Frameworks*; OLED: Organic Light Emitting Diode; PHEV: Plug-in-Hybrid Elektrofahrzeug; Q-Dots: Quantum Dots (Quantenpunkte); RFID: Radio Frequency Identification; rpm: Revolutions per Minute (Drehzahl); SCR: Selective Catalytic Reduction; SRM: Switched Reluctance Motor (Reluktanzmotor); TCO: Transparent Conducting Oxides; TiO₂: Titandioxid; TFM: Transversal Flux Motor; V₂O₅: Vanadiumpentoxid; W: Wolfram

Die genannten Substitutionsoptionen befinden sich in unterschiedlichen Reifegraden. So sind zum Beispiel Substitutionsalternativen für den Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten in Elektromotoren von vollelektrischen Pkw mit dem Asynchronmotor, dem extern erregten Synchronmotor und Motoren mit reduziertem Seltenen-Erden-Gehalt schon heute auf dem Markt vertreten. Auch für bleifreie Lote ist das Silber-Sintern bereits in der kommerziellen Phase. Ebenso ist in Nischenanwendungen der Synchronreluktanzmotor als Substitut für den Hochleistungspermanentmagneten in der Industrie einsetzbar.

Andere Substitutionsalternativen sind preislich noch nicht wettbewerbsfähig wie zum Beispiel der Einsatz von organischen Leuchtdioden (OLED) für weiße LED.

Für sechs betrachtete Umwelttechnologien konnten keine absehbaren Substitutionsalternativen identifiziert werden. Diese sind grüne Rechenzentren, Industriekatalysatoren, Pedelec-Motoren, Synchron-/Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen, GuD-Kraftwerke. Diese Technologien gingen nicht in die weitere Betrachtung ein.

Für die einzelnen Umwelttechnologien zeigt sich, dass Substitutionsalternativen bei einigen Umwelttechnologien deutliche Rohstoffeinsparungen von relevanten Rohstoffen ermöglichen. Dabei werden bei den Substitutionen nicht alle relevanten Rohstoffe in den Umwelttechnologien ersetzt. Bei folgenden Umwelttechnologien ist eine deutliche Bedarfsreduzierung an relevanten Rohstoffen durch Substitutionen im Vergleich zum Green-Economy-Szenario möglich. Die Prozentangabe in Klammer gibt das Reduktionspotential des jeweiligen Rohstoffs in einer Umwelttechnologie an, die im Substitutions-szenario im Vergleich zum Green-Economy-Szenario erreicht werden kann.

- ▶ RFID (Radio Frequency Identification): Deutliche Reduktion von Kupfer und Silber in 2025 (-96 %) und 2050 (-100%)
- ▶ Weiße Leuchtdioden (LED): Deutliche Reduktion von Cer in 2025 (-60 %)
- ▶ Hybridmotoren: Deutliche Reduktion von Dysprosium und Terbium in 2025 (-55 %)
- ▶ Elektromotoren in Elektrofahrzeugen (BEV, vollelektrischer Antrieb) und Plug-in-Hybridfahrzeugen (PHEV): Deutliche Reduktion von Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium in 2050 (-64%)
- ▶ Permanentmagnete in Windkraftanlagen: Deutliche Reduktion von Dysprosium in 2025 (-40 %)

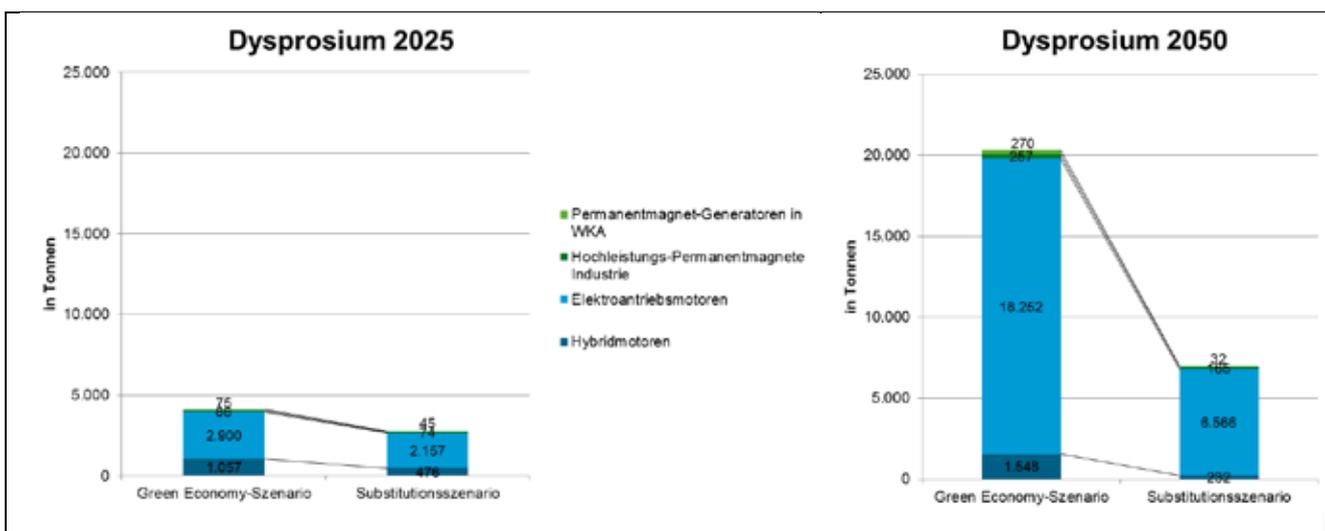
Bei anderen Umwelttechnologien sind die Potentiale der Rohstoffeinsparung durch die Substitutionsalternativen nur begrenzt zu erkennen. Auch kann es zu einem Mehrbedarf an anderen relevanten

Rohstoffen durch den Einsatz von Alternativen kommen. Hierunter fällt z.B. die Umwelttechnologie **Dünnschicht-Photovoltaik**, bei der eine leichte Reduktion von Gallium, Indium und Silber in 2025 (-5 %) aber auch ein Mehrbedarf an Zink und Zinn im Substitutionsszenario zu erkennen ist.

In der Rohstoffperspektive über alle 40 untersuchten Umwelttechnologien zeigt sich, dass sich wesentliche Änderungen des Rohstoffbedarfs der untersuchten Umwelttechnologien im Substitutionsszenario gegenüber dem Green Economy-Szenario ergeben. Deutliche Änderungen sind bei Silber, Gold, Palladium, Seltenen Erden, Lithium, Zinn, Gallium, Titandioxid, Mangan und Platin identifiziert. Dabei ist v.a. eine Reduktion des Rohstoffbedarfs im Substitutionsszenario zu verzeichnen. Nur bei Platin kommt es zu einer Zunahme des Rohstoffbedarfs. Anhand von Dysprosium und Platin werden die Auswirkungen im Folgenden illustriert.

Das Einsparpotential für Dysprosium liegt in 2025 bei 33 % bzw. knapp 1.300 Tonnen (siehe Abbildung unten links). Dabei können die größten Einsparungen bei den Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV mit 742 Tonnen und bei den Hybridmotoren mit 50 Tonnen erzielt werden. In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 66 % bzw. 13.300 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Die größten Einsparpotentiale liegen auch in 2050 bei den Elektroantriebsmotoren mit 11.700 Tonnen und bei den Hybridmotoren mit 1.300 Tonnen.

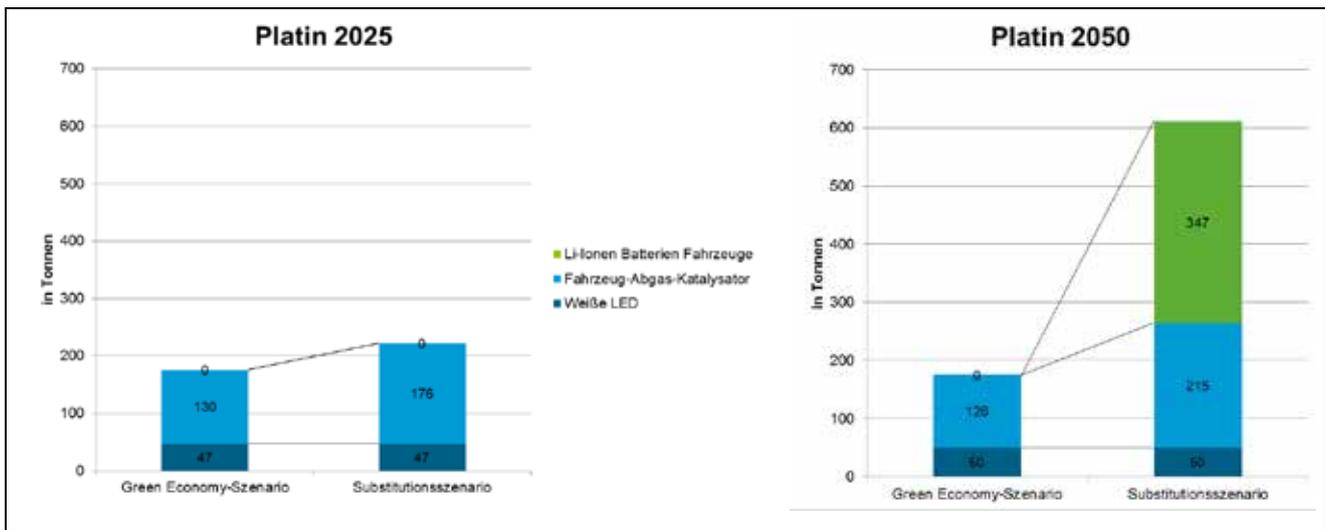
Abbildung 3: Dysprosbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



Quelle: Eigene Abbildung

Bei Platin zeigt sich ein anderes Bild. Der Bedarf von Platin steigt im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 im Vergleich zum Green Economy-Szenario. In 2025 liegt der Mehrbedarf im Substitutionsszenario bei 26 % bzw. 46 Tonnen (siehe Abbildung unten links). Dieser zusätzliche Bedarf generiert sich aus den Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren, wo Palladium teilweise durch Platin ersetzt wird. 2050 liegt der Mehrbedarf an Platin im Substitutionsszenario bei knapp 250 % bzw. 436 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Der zusätzliche Bedarf beruht ebenso auf den Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren mit 89 Tonnen (Palladium wird teilweise durch Platin ersetzt). Der größte Mehrbedarf in 2050 stammt aber von den Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge aufgrund der Substitution von Lithium-Ionen-Batterien mit Brennstoffzellen (knapp 350 Tonnen).

Abbildung 4: Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



Quelle: Eigene Abbildung

Roadmap: Erschließung der Substitutionspotentiale

Die Roadmap macht sichtbar, wo welcher Handlungsbedarf besteht, um die identifizierten Substitutionspotentiale erschließen zu können. Dazu wurde der Handlungsbedarf in konkrete Maßnahmen übersetzt. Die Maßnahmen sind dabei in vier Handlungsfelder untergliedert: Technologieentwicklung, Markteinführung, Marktdurchdringung durch Qualifizierung & Austausch und rechtlich-regulatorische Rahmenbedingungen.

Technologieentwicklung

Forschung und Entwicklung sind vor allem bei den Substitutionsoptionen notwendig, die bis 2025 noch einen relativ niedrigen Marktanteil erwarten lassen. Die Erschließung der Substitutionspotentiale erfordert die Überwindung einer Reihe von Nachteilen und Hemmnissen. Für eine Substitution müssen vielfach die noch heute bestehenden technischen Nachteile (niedrigere Leistungsdichte, höhere Kosten) behoben werden, um wettbewerbsfähig zu sein. So sind CZTS (Kupfer-Zink-Zinnsulfid)-Solarzellen bis dato nicht wettbewerbsfähig. Die erreichten Wirkungsgrade sind vergleichsweise niedrig. Weitere Forschungsanstrengungen sind nötig, um den Wirkungsgrad zu verbessern. Zudem müssen die erreichten Laborwirkungsgrade in kommerziellen Anlagen umgesetzt werden. Bei indiumfreien TCOs (transparent conducting oxides) geht es darum, Probleme bei der großtechnischen Fertigung zu verringern. Bei weißen Organischen Leuchtdioden (woLED) geht es kurz- bis mittelfristig um die Verbesserung der physikalischen und technischen Eigenschaften. Diese haben eine für den Praxiseinsatz noch zu geringe Lebensdauer und stehen auch in puncto Energieeffizienz noch hinter den weißen Leuchtdioden (wLEDs) zurück. Weitere Forschung und Entwicklung ist erforderlich, um anwendungsreife und kostengünstige weiße Organischen Leuchtdioden (woLED) für die Anwendung in Produkten für den Konsumentenmarkt zu etablieren.

Großen Forschungsbedarf gibt es auch bei Generatoren für Windkraftanlagen auf Basis von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS). Es handelt sich um eine vergleichsweise junge Technologielinie, die es potentiell erlaubt, für hohe Leistungsbereiche sehr hohe Wirkungsgrade bei geringem Gondelgewicht zu realisieren. Zwar gibt es einige Demonstrationsprojekte, jedoch ist noch nicht abzusehen, wann HTS (Hochtemperatur-Supraleiter)-Generatoren in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen könnten. Wichtig wäre zunächst eine Verbesserung der Wirkungsgrade sowie der Zuverlässigkeit der Anlagen insgesamt. Vielversprechende Ansätze liegen bei Generatoren für Windkraftanlagen in der Entwick-

lung von FeCo- oder FeNi-basierte Materialien sowie Nanokompositen und –strukturen. Diese befinden sich noch im Labormaßstab, auch mittelfristig scheinen die Energiedichten von marktüblichen Permanentmagneten nicht erreicht zu werden. Dementsprechend ist die Forschung momentan auf die Suche nach aussichtsreichen Materialkombinationen und der Verbesserungen ihrer magnetischen Eigenschaften auszurichten. Hier liegt der Fokus deutlich auf F&E-Maßnahmen mit nachfolgender Unterstützung in der Markteinführung.

Markteinführung

Viele Substitutionsoptionen sind schon sehr weit fortgeschritten in der Entwicklung, aber in Nischenmärkten auf dem Markt vertreten. Dies gilt z.B. für Substitutionen von weißen LEDs, Niederspannungsmotoren bei Hochleistungspermanentmagneten in industriellen Anwendungen oder Hybrid bzw. Elektroantriebsmotoren. Hier geht es im Wesentlichen um die Beschleunigung der Markteinführung und -verbreitung. Bei weißen LEDs wird eine Umstellung der Beleuchtungstechnik relativ tiefreichende Auswirkungen auf die Wertschöpfungsketten haben. Außerdem wird die Nutzung von flächigen (anstelle punktförmiger) Lichtquellen zu Problemen mit der Kompatibilität zu Beleuchtungskonzepten im Gebäudebestand führen. Für die Markteinführung bedarf es der Entwicklung völlig neuer Beleuchtungskonzepte für den Indoor- als auch Outdoor-Einsatz. Zur Marktverbreitung müssen außerdem bei einigen Substitutionsoptionen die Produktionskosten gesenkt werden. Hier bedarf es der Unterstützung u.a. bei der Skalierung von Demonstrations- und Pilotanlagen (z.B. OLED, Natrium-Schwefel-Batterien, Tandemzellen) in den industriellen Fertigungsmaßstab und der Kostensenkung. Eine Förderung der Prozessentwicklung könnte die Entwicklung von Prozessen, das Sammeln von Erfahrung und den Aufbau großtechnischer (und damit günstigerer) Fertigung unterstützen.

Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch

Die Erschließung von Substitutionspotentialen kann bei vielen Optionen durch Qualifizierung und Austausch unterstützt werden. So sind bei Elektroantriebsmotoren verschiedene Technologieoptionen wie Asynchronmotor und Synchronmotor mit reduziertem Gehalt an Seltenerdelementen bereits heute in einzelnen Modellen mit vollelektrischem Antrieb auf dem Markt. Eine weitere Marktdurchdringung sollte durch bewusstseinsbildende und vertrauensschaffende Maßnahmen unterstützt werden. Bei Asynchronmotoren besitzen v.a. die Motorenhersteller selbst ein Interesse ihr Produkt auf dem Markt zu etablieren. Nichtsdestotrotz sollten auch Anstrengungen der Bundesregierung und Bundesministerien (z.B. BMUB, BMWi), von Netzwerken und Verbänden (z.B. VDMA, VDA, ZVEI, VDI ZRE) und der EU (z.B. Joint Research Centre, EU Forschungsrahmenprogramm Horizon 2020) zur Schaffung von Informationsangeboten zur Substitution des Synchronmotors durch den Asynchronmotor auf den Weg gebracht werden. Auch bei Permanentmagneten bedarf es einer weiteren Marktdurchdringung mit Hilfe von umfassenden Informationsangeboten. Mit dieser Informationsoffensive sollte direkt begonnen werden.

Der NdFeB-Permanentmagnet mit reduziertem Gehalt an Seltenerdelementen ist ebenso bereits heute auf dem Markt vertreten. Eine starke Implementierung in den Markt wird bis 2025 (60 %) und 2050 (83 %) angenommen. Eine weitere Marktdurchdringung sollte durch strukturpolitische Netzwerke unterstützt werden, die das für die Entwicklung und Durchsetzung innovativer Substitutionslösungen erforderliche Wissen über Technologien, Bedarfe und Nutzungsbedingungen zusammenführen. Auch bei anderen Umwelttechnologien sind Informationsangebote notwendig. Dies ist beispielsweise bei SCR (selective catalytic reduction)-Technologien (Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR bzw. Zeolith) der Fall. Hier gibt es bereits praxisrelevante Entwicklungen, aber eine Optimierung der Entwicklungen und eine Informationskampagne zur Marktdurchdringung sind für das Erreichen der jeweils für möglich gehaltenen Marktanteile (5%) der SCR (selective catalytic reduction)-Technologien notwendig. Bei der Reduktion von Cer im Katalysatorsystem muss die eingesetzte Sensorik verbessert bzw. ausgetauscht werden. Es gibt bereits vielversprechende Ergebnisse zur hochfrequenzgestützten

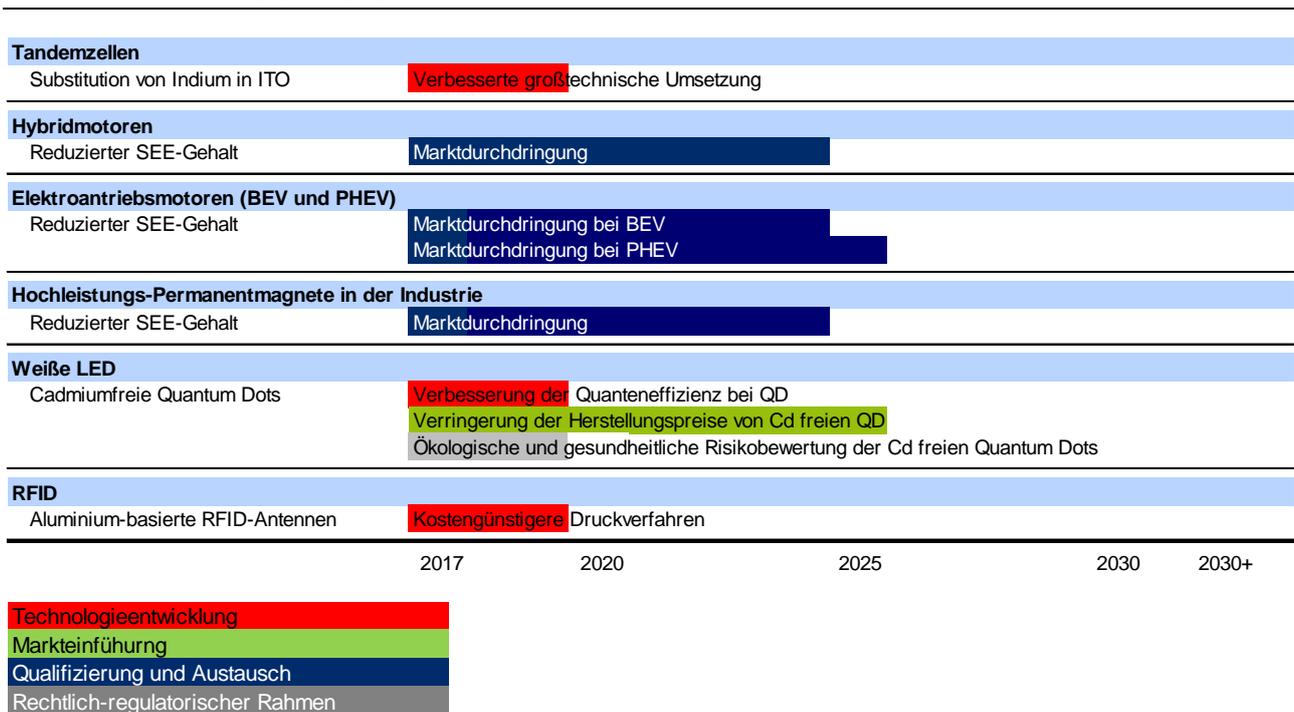
Beladungserkennung in Katalysatorsystemen. Diese sind im Labor bereits ausgereift und müssten in Pilotprojekten nun in Fahrzeugen eingebaut und getestet werden. Eine entsprechende Informationskampagne zur Kommerzialisierung müsste folgen, um die potentielle Marktdurchdringung zu erreichen.

Rechtlich-regulatorischer Rahmen

Neben der Technologieentwicklung, der Markteinführung und der Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch sind auch Maßnahmen im rechtlich-regulatorischen Rahmen von Bedeutung (z.B. bei den weißen OLED). Die Innovation sollte durch begleitende Erforschung der Umweltaspekte und gesundheitlicher Auswirkungen von Cadmium-freien Quantum Dots flankiert werden, insbesondere in Hinblick auf die Herstellungsphase der Quantum Dots und die sichere Entsorgung / das Recycling der Leuchtmittel. Darüber hinaus könnte auf Normungsebene die Erschließung von Substitutionspotentialen unterstützt werden, so durch Normung der Kompatibilität von weißen OLED Leuchtmitteln einschließlich angepasster Mess- und Qualitätsvorschriften.

In der folgenden Abbildung sind die Umwelttechnologien und Substitutionsoptionen dargestellt, deren potentieller Marktanteil in 2025 mit über 15 % abgeschätzt wird.¹⁰

Abbildung 5: Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit einem möglichen Marktanteil > 15 % in 2025



Quelle: Eigene Darstellung

¹⁰ Eine umfassende Analyse und Darstellung der Maßnahmen der einzelnen Umwelttechnologien mit ihren wesentlichen Akteuren sind in Arbeitsbericht 6 zusammengefasst.

Fazit und Ausblick

Die im Projekt entwickelte und erstmals angewendete Methodik des systematischen Screenings, Monitorings und der Prioritätensetzung von Umwelttechnologien und Substitutionsalternativen hat sich bewährt und ein entsprechendes positives Feedback von externen Akteuren im Rahmen von Fachworkshops erhalten. Für eine Reihe bedeutsamer Umwelttechnologien konnten Substitutionsalternativen identifiziert werden. Relevante Substitutionsalternativen liegen vor allem in den Technologiefeldern Elektromotoren, Solarenergie, Beleuchtung und Speichertechnologien. Das breite Spektrum an Maßnahmen sowie die Ressourcen, die zu ihrer Umsetzung notwendig sind, machen deutlich, dass die Realisierung der Roadmap nur in einer konzertierten Aktion von Herstellern, Anwendern, Politik und Wissenschaft gelingen kann. Die Roadmap macht deutlich, dass für die Erschließung der aufgezeigten Substitutionspotentiale 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 etc.) als auch auf Seiten der Wirtschaft und Verbände erforderlich sind. Neben den Ansätzen zur Implementierung der aufgezeigten Roadmap sind weiterführende **Handlungsempfehlungen** zu verfolgen:

1. Einen vorausschauenden Ansatz in der Praxis verankern. Dies kann erreicht werden durch ein regelmäßiges Monitoring - alle vier Jahre sollten die Umwelttechnologien und Rohstoffe auf Kritikalität und Substitutionsoptionen überprüft werden.
2. Entsprechende Vertiefungen in Richtung Effizienz und Substitution sollten nicht erst angestoßen werden, wenn Rohstoffe bereits knapp und kritisch eingestuft sind. Daher ist ein systematisches Screening und frühzeitiges Betrachten von Kritikalitätsaspekten von Rohstoffen notwendig.
3. Die Substitutionsalternativen mit hohem Marktpotential sollten vertieft analysiert werden bezüglich der Erschließung der Substitutionspotentiale.
4. Eine Unterstützung der Substitutionsforschung könnte erfolgen durch
 - ▶ Öffnung des Rohstoffeffizienzpreises der Bundesregierung Richtung Substitution
 - ▶ Starten eines eigenen BMBF-Forschungsprogramms „Substitution“ zu den Bereichen Beleuchtung, Solar- und Speichertechnologien im Rahmen der Förderprogramme zur Ressourceneffizienz

Das Thema Substitution von kritischen Rohstoffen sollte zukünftig vorausschauender angegangen werden, um die Auswirkung von Knappheiten auf die Volkswirtschaft zu minimieren. Da die Märkte für Rohstoffe sehr volatil sind und die Förderung einiger Rohstoffe auf wenige Länder beschränkt, kann es in Zukunft öfter vorkommen, dass Preisschocks kurzfristig drastische Auswirkungen haben können. Eine Verstetigung des Monitorings von Umwelttechnologien mit potentiell kritischen Rohstoffen und der Überprüfung von Substitutionsoptionen für diese Umwelttechnologien sollte somit unbedingt etabliert werden.

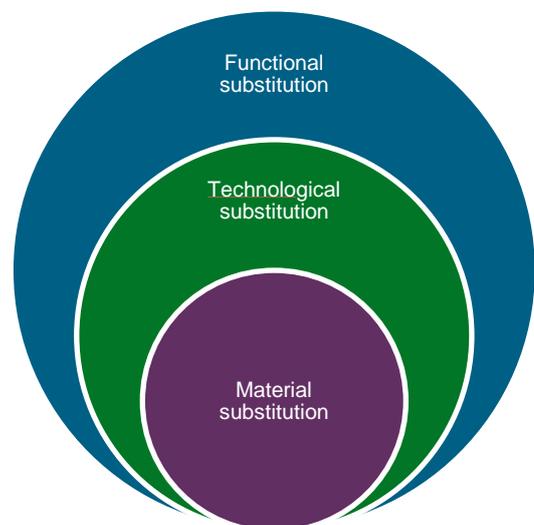
Summary

Substitution: A resource conservation strategy

The expansion and use of innovative environmental technologies are among the most important factors for improved resource efficiency, resource conservation and the transition to a green economy. Many environmental technologies rely on the use of specific raw materials for which there are already various supply risks. These materials are referred to as critical raw materials. The European Commission regularly compiles lists of these materials¹¹. A study conducted on behalf of the KfW Group investigated risks to the supply of critical raw materials to German industry¹². It identifies various critical raw materials of key significance for many environmental technologies, particularly for the transition to a sustainable energy system and sustainable mobility. It is currently foreseeable that efficiency and recycling strategies will not be sufficient in themselves to markedly decrease the criticality of these materials, nor to ensure a far-reaching expansion of significant environmental technologies, not only in industrialised countries like Germany but also globally. A forward-looking focus on substitution strategies is also necessary.

There is a substantial need for further research in this area within the German Government's Resource Efficiency Programme (ProgResS). Measures that support and facilitate substitution, i.e. the replacement of rare and strategic metals with raw materials that have lower environmental impacts, is the key in this respect. In order to meet Germany's particular interests as a consumer, producer, exporter and technology leader, the Federal Government will systematically invest in research on substitution and will develop and implement a strategy on substitutes for critical raw materials in environmental and other technologies¹³. In any analysis of substitution options, it is important to examine resource efficiency potential and possible additional negative impacts on the environment. For example, wind turbines built without rare earths require significantly more copper, which is associated with substantial environmental impacts. A comparative assessment of technologies is therefore extremely important. Here, the type of substitution is significant. It may simply involve the replacement of a single factor input at a material level, but it may also result from changes in the mix of factor inputs or the introduction of new technology and functions¹⁴. No matter what form it takes, substitution also has an impact on quality, affecting economic, environmental or technical performance to a greater or lesser extent (see Figure above).

Types of substitution



¹¹ European Commission 2017: List of Critical Raw Materials for the EU, <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20170913---2017-list-of-critical-raw-materials-for-the-eu.pdf>

¹² Erdmann, L; Behrendt, S.; Feil, M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland, KfW, Berlin 2011

¹³ BMUB 2016: <https://www.bmu.de/publikation/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-ii-programm-zur-nachhaltigen-nutzung-und-zum-schutz-der-natue/>

¹⁴ Ziemann, S. et al. 2010: Substitution knapper Metalle – ein Ausweg aus der Rohstoffknappheit? / Substitution of Scarce Metals – A Way out of Resource Scarcities?, in Chemie Ingenieur Technik 2010, 82, No. 11.

The SubSKrit project

The research project, entitled *Substitution as a Strategy for Reducing the Criticality of Raw Materials for Environmental Technologies* (SubSKrit, project code (FKZ): 3714 93 316 0), was conducted by the Oeko-Institut and the Institute for Futures Studies and Technology Assessment (IZT) on behalf of the German Federal Environment Agency (UBA) within the scope of the Environmental Research Programme of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB). It started in August 2014 and ran until February 2018. The project involved the development of a roadmap for critical raw materials substitution in environmental technologies. This roadmap aims to show which substitution measures can substantially contribute to enabling a future expansion of environmental technologies – also against the background of rising supply risks for raw materials, taking into account the long lead times, barriers and favourable factors influencing development from the research stage to market maturity and diffusion. The roadmap aims to make an important contribution to the implementation and further development of Germany's national raw materials strategy and resource efficiency programme as well as to provide input for the national and international policy debate. To that end, key stakeholders and instruments – as well as relevant measures – were identified and external experts were involved in the project.

Which environmental technologies was the focus of the project?

The term “environmental technologies” refers to technologies, goods and services which “can avoid, mitigate or overcome environmental problems and aid the recovery of already damaged environmental functions, thus contributing to more sustainable management of natural resources”¹⁵. In line with the BMUB's *Environmental Technology Atlas for Germany (2014)*¹⁶, the environmental technologies were subdivided into the following six lead markets (see Table below). In accordance with the methodology, 115 environmental technologies were identified from recent studies and key policy documents and were subjected to a multi-stage selection process. As a result of this assessment, 40 environmental technologies were identified as significant and were therefore analysed in more detail. As the selection of these technologies was based on a broad literature survey which included key reference documents, it may be assumed that good coverage of the range of environmental technologies was achieved overall.

¹⁵ Schippl, J. et al. 2009: *Roadmap Umwelttechnologien 2020*, ITAS Karlsruhe.

¹⁶ BMUB 2014: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, *GreenTech made in Germany 4.0 – Environmental Technology Atlas for Germany*, Büchele R. et al., Roland Berger Strategy Consultants, Berlin, July 2014

Table 4: The 40 selected environmental technologies, classed by lead market

Power generation	Energy efficiency	Resource efficiency	Mobility	Waste management/ recycling	Water management
Lithium-ion energy storage Concentrating solar power (CSP) High temperature superconducting (HTS) generators Reluctance generators Combined cycle power plants Thin-film solar cells Tandem cells Crystalline silicon solar cells Storage power plants Permanent magnet generators for wind turbines Externally excited synchronous generators for wind turbines Externally excited asynchronous generators for wind turbines	Compressors RFID White light emitting diodes (LEDs) Organic light emitting diodes (OLEDs) High-performance permanent magnets for industrial applications Green data centres Chlor-alkali electrolysis with oxygen depolarised cathodes	Aerogels Nanocoating Lead-free solders Industrial catalytic converters Celitement Precision farming	Pedelecs Electric traction motors Bodywork Lightweight construction (titanium and scandium air-frame) Vehicle catalytic converters Lithium-ion batteries for vehicles Highly efficient aircraft engines Hybrid motors	Automatic substance separation processes Slag and sludge treatment Phosphorus recovery	Water efficiency technologies Reverse osmosis (highly permeable membranes) Decentralised water treatment

How will the material requirements for environmental technologies develop?

The dynamics of the environmental technology markets play an important role in the analysis of raw materials' criticality. Broadly, it may be assumed that rising global demand for environmental technologies will further expand their market volume. However, the pace of growth may vary, depending on how the general and environmental conditions evolve in future. The analysis of the criticality of raw materials for environmental technologies was therefore based on two scenarios: firstly, **business-as-usual (BAU)**, which extrapolates current trends, and secondly, a scenario based on much more dynamic development of markets for environmental technologies, predicated on the assumption that the green economy (GE), which is already regarded by many international organisations and countries, including Germany, as the guiding vision for the 21st century, becomes established. The trend scenario would then be the scenario with the higher probability of occurrence. The GE scenario is a more optimistic scenario, enabling analysis of the development of the raw materials requirement in a radical transition to a green economy.

Looking ahead, it is clear that out of a total of 64 raw materials investigated across the 40 selected environmental technologies, 38 will play a part in satisfying raw materials requirements (see Table). For 21 raw materials, global demand exceeding 3% of total primary production in 2013 (baseline) was identified for at least one of the scenarios (BAU or GE), meaning that these raw materials are strategically significant for market development and diffusion of the relevant environmental technologies.

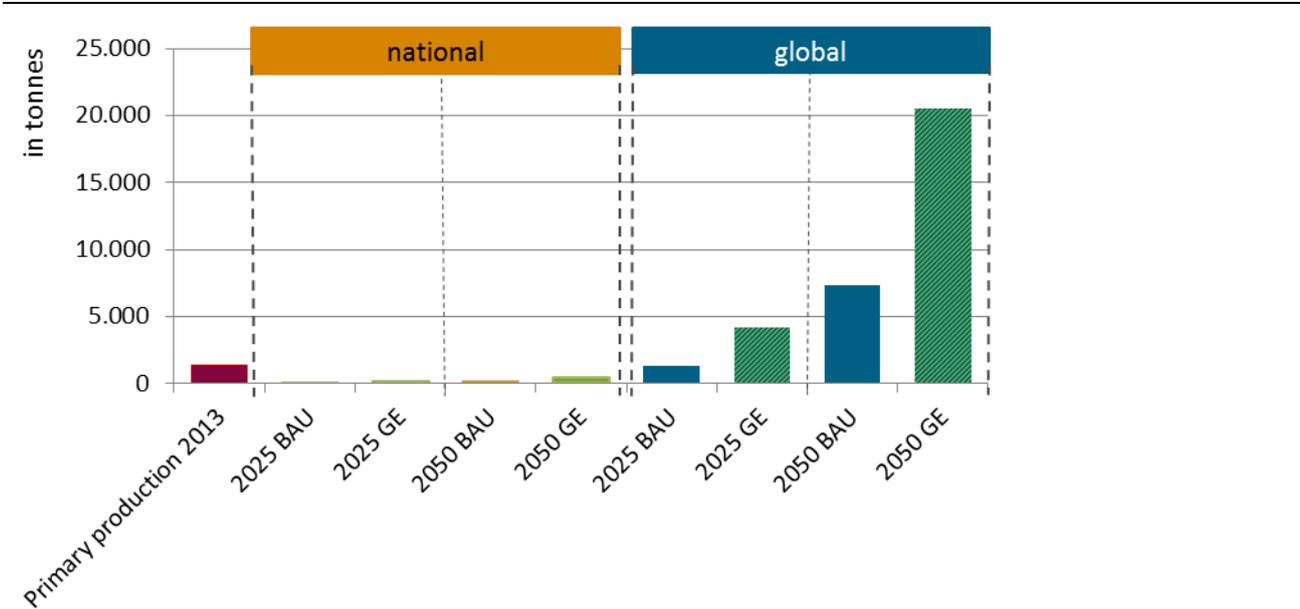
As an example, the figure below shows the scenario results for dysprosium, a rare earth metal, across all 40 environmental technologies studied. Dysprosium is used almost exclusively in neodymium-iron-boron (NdFeB) magnets; it is added to these magnets so that they can be used in high temperature applications. The addition of dysprosium is extremely important for the functional longevity of these permanent magnets at high temperatures. The dysprosium requirement for all 40 environmental technologies studied is shown in relation to the baseline, i.e. primary production in 2013. As is evident from the figure, solely for the environmental technologies investigated in this project, a global business-as-usual scenario results in a dyspro-

Raw materials requirement across all environmental technologies in the green economy scenario for 2025 in relation to global primary production in 2013

Raw material	Percentage
Palladium	423%
Ruthenium	409%
Rhodium	331%
Dysprosium	304%
Iridium	289%
Lithium	247%
Terbium	238%
Platinum	153%
Tin	82%
Neodymium	81%
Praseodymium	67%
Gallium	63%
Silver	58%
Indium	32%
Cerium	15.5%
Titanium as TiO ₂	12.5%
Magnesium	11.7%
Copper	11.2%
(Metallic) silicon	5.0%
Manganese	4.8%
Gold	3.3%
Titanium (metal)	2.6%
Yttrium	2.6%
Selenium	1.3%
Europium	1.0%
Gadolinium	0.4%
Cobalt	0.4%
Zirconium	0.3%
Molybdenum	0.3%
Nickel	0.3%
Germanium	0.2%
Chromium	0.3%
Natural graphite	0.2%
Zinc	0.03%
Tantalum	0.03%
Vanadium	0.01%
Lead	0.01%
Phosphate	0.001%

sium requirement of almost 1,300 tonnes in 2025, close to the 2013 primary production baseline (approx. 1,400 tonnes), while the requirement in a green economy scenario far exceeds this baseline, amounting to more than 4,000 tonnes.

Figure 6: Absolute material requirements for dysprosium [in tonnes] compared with primary production 2013



Source: Authors' own graphics

BAU = Business-as-usual scenario; GE = Green economy scenario

The dynamic development of the global dysprosium requirement for 2025 is driven primarily by the sustainable mobility lead market (90 % in the BAU / 96 % in the GE scenario). In the global GE scenario for 2025, 73 % of the dysprosium requirement for the sustainable mobility lead market relates to electric motors for battery electric vehicles (BEV), plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) and fuel cell electric vehicles (FCEV), with hybrid cars accounting for 26 % and pedelecs 1 %. The projected dynamic development of electromobility is thus the key factor driving the dysprosium requirement, notwithstanding the assumed reduction in the percentage dysprosium content of neodymium-iron-boron (NdFeB) magnets as early as 2025.

Criticality of environmental technologies

The criticality of the raw materials used in environmental technologies was ranked using a methodology comprising the following three dimensions:

1. Supply risk
2. Environmental implications
3. Strategic significance

For each dimension, a separate methodological basis was used in order to facilitate characterisation. A final ranking was then produced for each raw material. In addition, a ranking for each dimension was produced at the raw material level, which was then applied to the environmental technologies.

The **supply risk** dimension of criticality was assessed using the methodology described in *VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands*¹⁷. This Guideline is based on a system of 13 indicators subdivided into three groups. The indicators are listed in the table below.

Table 5: Indicators according to VDI Guideline Series 4800 No. 2

Geological, technical and structural indicators	Geopolitical and regulatory indicators	Economic indicators
Ratio of reserves to global production	Herfindahl-Hirschman index of reserves	Herfindahl-Hirschman index of companies
Degree of coproduction / by-production	Herfindahl-Hirschman index of primary production (countries)	Degree of increase in demand
Distribution of functional EoL recycling technologies	Political country risk	Technical feasibility and profitability of substitutions in main applications
Profitability of storage and transport	Regulatory country risk	Annualised price volatility
Degree of distribution of natural resources / growing regions		

Source: VDI 2016: Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Gründruck. Berlin 2016.

The **environmental** dimension of criticality was assessed using the data and methodology described by Graedel et al. in the paper *Criticality of metals and metalloids*¹⁸. In this paper, Graedel calculated the environmental implications of the various elements using the Ecoinvent databases (versions 2.2 and 3) and the ReCiPe impact assessment method¹⁹. Ecosystems and human health were used as endpoints in determining the environmental implications.

The **strategic significance** dimension of criticality was calculated using the scenario results for material requirements for the various environmental technologies. Here, strategic significance was determined on the basis of the global requirement across the 40 ETs in the green economy scenario for 2025 in relation to the baseline, i.e. global primary production in 2013.

Each of the three dimensions of criticality was assigned a rank, with rank 1 denoting the element with the highest criticality and rank 21 the element of least criticality. In order to apply the raw materials results across all three dimensions to the environmental technologies, the elements' three criticality scores were aggregated in order to produce a final ranking. This was performed by adding and then averaging the individual scores. Rhodium, for example, is ranked 5 for supply risk, 1 for environmental

¹⁷ VDI 2016: Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Gründruck. Berlin 2016.

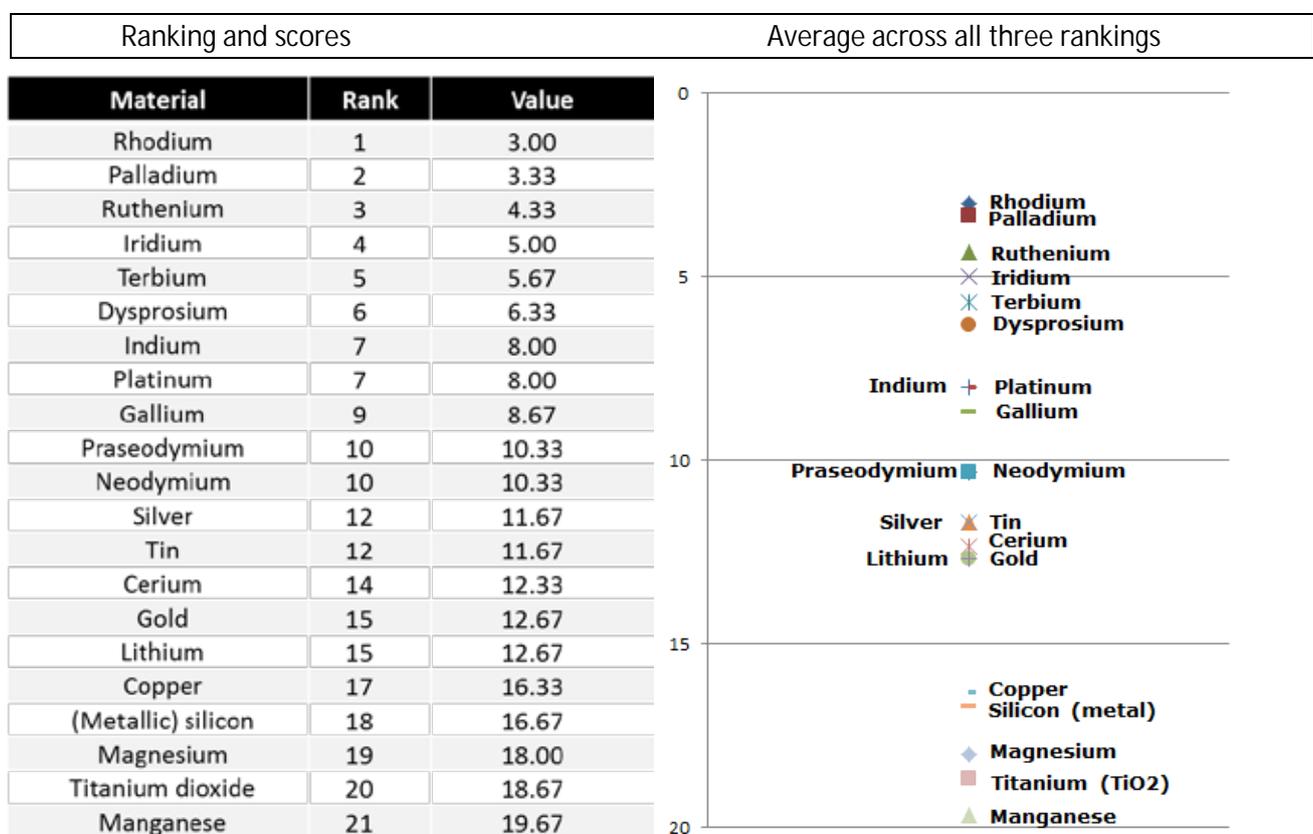
¹⁸ Graedel et al. 2015: Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N.T.; Nuss, P.; Reck, B.K.: Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 112, Issue 14, 2015, 4257 - 4262. (<http://www.pnas.org/content/112/14/4257.full.pdf?with-ds=yes>).

¹⁹ ReCiPe 2013: Goedkoop M.J., Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schryver, A.; Struijs, J.; van Zelm, R.: ReCiPe 2008 - First Edition. Report I: Characterisation - May 2013. Amersfoort / Leiden / Nijmegen / Bilthoven 2013 (www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf).

implications and 3 for strategic significance. Added together, this produces a score of 9 and an average of 3. As this is the smallest average, rhodium is placed first in the final ranking, meaning that it has the highest criticality across all three dimensions. This procedure was repeated for all the other elements. The averages were then placed in reverse order (i.e. the lower the score, the higher the criticality). The element with the lowest score is ranked first, while the element with the highest score, denoting the lowest level of criticality, is ranked in last place (21).

The final ranking is presented in the table below. The platinum group metals rhodium, palladium, ruthenium and iridium are the top-ranking elements (1-4), followed by the heavy rare earth metals terbium and dysprosium (5 and 6). Indium and platinum share seventh place. In 10th place are light rare earths neodymium and praseodymium, with silver and tin placed joint 12th and gold and lithium joint 15th. At the bottom of the table are copper (17), silicon (18), magnesium (19), titanium dioxide (20) and manganese (21).

Figure 7: Final ranking of the raw materials



Source: Authors' own graphics

As the next step, in order to select the 20 priority environmental technologies for screening of substitution options, the raw materials ranking was applied to the ETs. The following four relevant variables were used for this purpose.

1. Highest individual raw material ranking in the environmental technologies
2. Average across all raw materials and areas of criticality for the environmental technologies
3. Number of relevant raw materials in the environmental technologies
4. In marginal cases: mass requirement for the key raw material for each environmental technology.

The most critical raw material for each ET is the first sorting criterion as this is always the limiting factor. The second sorting criterion is the average across all raw materials and areas of criticality, as this ensures that ETs with the same most critical raw material are sorted further. The third criterion is the number of relevant raw materials. In marginal cases, if the first three sorting criteria have still not produced any differentiation, the mass requirement for the key raw material is used.

This methodology produces a logically well-founded ranking of the ETs and thus achieves the objective, i.e. the selection of 20 priority ETs. The ranking produced a group of 17 ETs, which are clearly located at the top of the table. They include environmental technologies such as catalytic converters, permanent magnets, solar cells, white light emitting diodes (LEDs), green data centres, lead-free solders, RFID and oxygen depolarised cathodes. The results are robust, as a sensitivity analysis shows. With changed weighting of the criteria and changed evaluation of the criteria, the order of the criticality assessments of the raw materials also changes, but the basic criticality assessment for the environmental technologies remains the same.

The 20 environmental technologies selected, with relatively high criticality, can be clustered in the following technology groups:

- ▶ Electronics: lead-free solders, green data centres
- ▶ Catalytic converters: automotive, industrial
- ▶ Permanent magnets: pedelecs, hybrid motors, electric vehicle traction motors, high-performance permanent magnets for other applications, permanent magnet generators for wind turbines
- ▶ Solar technology: thin-film solar cells, tandem cells, concentrated solar power (CSP) technology
- ▶ Storage technologies: lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles (PHEV), lithium-ion energy storage
- ▶ Without permanent magnet generators: synchronous generators, asynchronous generators in wind turbines
- ▶ Other technologies: RFID, oxygen depolarised cathodes, white LEDs, gas/combined cycle power plants.

Substitution options

For the environmental technologies studied, the following conceivable options for critical raw materials substitution were identified.

Table 6: Substitution options

Environmental technology	Material level	Substitution options Technology level	Functional level
Electronic			
Lead-free solders	Tin-bismuth alloys	Sintered silver Friction stir welding	Molecular electronics
Green data centres			
Catalytic converters			
Automotive	Replacement of platinum by palladium Replacement of platinum by multi catalytic	Rhodium by platinum in a HC-SCR Rhodium by V ₂ O ₅ /TiO ₂ /W in a SCR	Electromobility with BEV Electromobility with FCEV

Environmental technology	Material level	Substitution options Technology level	Functional level
	converters in diesel-powered vehicles Partial replacement of platinum by gold Replacement of platinum by silver in diesel particulate filters Replacement of palladium by platinum	Rhodium by zeolites (with copper or iron) in SCR Cerium by another type of air control system	
Industrial			
Permanent magnets			
Pedelects - motors	REE-free motors	Reluctance motor	
Hybrid motors	Samarium-cobalt magnets Cerium and cobalt for neodymium and dysprosium	Asynchronous motor (ASM) Asynchronous motor with high revolutions per minute (ASM with high rpm) Externally / electrically excited synchronous motor (EESM) Other permanent magnets Switched reluctance motor (SRM) Transversal flux motor (TFM) NdFeB magnets without heavy rare earths	
Electric vehicle traction motors for BEV and PHEV	Samarium-cobalt magnets Cerium and cobalt for neodymium and dysprosium	NdFeB magnets with reduced rare earth content ASM ASM with high rpm EESM Other permanent magnets SRM TFM	
High-performance permanent magnets for other applications	Samarium-cobalt magnets	Three-phase asynchronous motor Low voltage motor (Synchronous reluctance motor)	
Permanent magnet generators for wind	Dysprosium by terbium FeCo- or FeNi-based	Nanocomposites Nanostructures	

Environmental technology	Material level	Substitution options Technology level	Functional level
turbines	materials	Externally excited generators HTS generators	
Without permanent magnet generators			
Synchronous generators in wind turbines		Reluctance motor	
Asynchronous generators in wind turbines		Reluctance motor	
Storage technologies			
Pedelects – batteries	Copper by aluminium		Fuel cell
Lithium-ion batteries for vehicles		Nickel metal hybrid battery	Fuel cell Double-layer capacitor
Stationary lithium-ion energy storage		Sodium sulphur battery Redox flow battery	Power-to-gas (hydrogen)
Solar technologies			
Thin-film solar cells	Indium by gallium, Gallium by indium Indium-free TCOs	CZTS cells	
Concentrating solar power	Aluminium mirrors		
Tandem cells in concentrating PV	Indium-free TCOs Aluminium mirrors		
Other technologies			
Combined cycle power plants	Copper by aluminium	Ceramic matrix composites (aluminium oxide) C-C composites	
RFID	Copper by aluminium Copper by silver	Manual sorting Mechanised process technology Optical sensors, software	Waste prevention Deposit schemes
Chlor-alkali electrolysis with oxygen depolarised cathodes	Substitution Ag by Ag(I) or Ag(II) oxides	Deacon/Sumitomo processes (chlorine)	Substitutes for chlorine products
White LEDs	MOF Quantum dots Cadmium-free quantum dots	White OLEDs Foil-based flexible wOLEDs	

Ag: Silver; AlNiCo: Aluminium-Nickel-Cobalt; ASM: Asynchronous Motor; Au: Gold; BEV: Battery Electric Vehicle; C-C Composites: Carbon-Carbon Composites; CZTS cells: Copper Zinc Tin Sulphide; EESM: Electrically / Externally Excited Synchronous Motor; FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle; HTS: High Temperature Superconductor; LED: Light Emitting Diode; MOF: *Metal-Organic Frameworks*; OLED: Organic Light Emitting Diode; PHEV: Plug-in-Hybrid Electric Vehicle; Q-

Dots: Quantum Dots ; RFID: Radio Frequency Identification; rpm: Revolutions per Minute; SCR: Selective Catalytic Reduction; SRM: Switched Reluctance Motor; : TCO: Transparent Conducting Oxides; TiO₂: Titanium Dioxide; TFM: Transversal Flux Motor; V₂O₅: Vanadium Pentoxide, W: Tungsten

The substitution options identified have reached varying stages of maturity. For example, substitution options for neodymium-iron-boron (NdFeB) magnets in electric motors for BEV with asynchronous motors, externally electrically excited synchronous motors (EESM) and motors with reduced rare earth content are already available on the market. Sintered silver, as a substitute for lead-free solders, has already entered the commercial phase as well. In niche applications, synchronous reluctance motors can be used as a substitute for high-performance permanent magnets in industry.

Other substitution options are not yet competitive on price; an example is the use of organic light emitting diodes (OLEDs) as a substitute for white LEDs.

For six environmental technologies – green data centres, industrial catalytic converters, pedelec motors, synchronous generators in wind turbines, asynchronous generators in wind turbines, and gas/combined cycle power plants – no foreseeable substitution options were identified within the project framework. These technologies were therefore excluded from further analysis.

As regards the individual environmental technologies studied, it is clear that for some environmental technologies, substantial reductions in the relevant raw materials requirement can be achieved through substitution. It should be noted that not all the raw materials of relevance to the environmental technologies are replaced with substitutes. For the following environmental technologies, a substantial reduction in the relevant raw material requirements can be achieved through substitution, as compared with the green economy scenario. The percentage, shown in parentheses, states the reduction potential that can be achieved in a substitution scenario, as compared with the green economy scenario, for each raw material used in an environmental technology.

- ▶ RFID (radio frequency identification): substantial reduction in copper and silver in 2025 (-96 %) and 2050 (-100 %)
- ▶ white LEDs: substantial reduction in cerium in 2025 (-60 %)
- ▶ hybrid motors: substantial reduction in dysprosium and terbium in 2025 (-55 %)
- ▶ electric motors for BEV and PHEV: substantial reduction in dysprosium, neodymium, praseodymium and terbium in 2050 (-64 %)
- ▶ permanent magnets in wind turbines: substantial reduction in dysprosium in 2025 (-40 %)

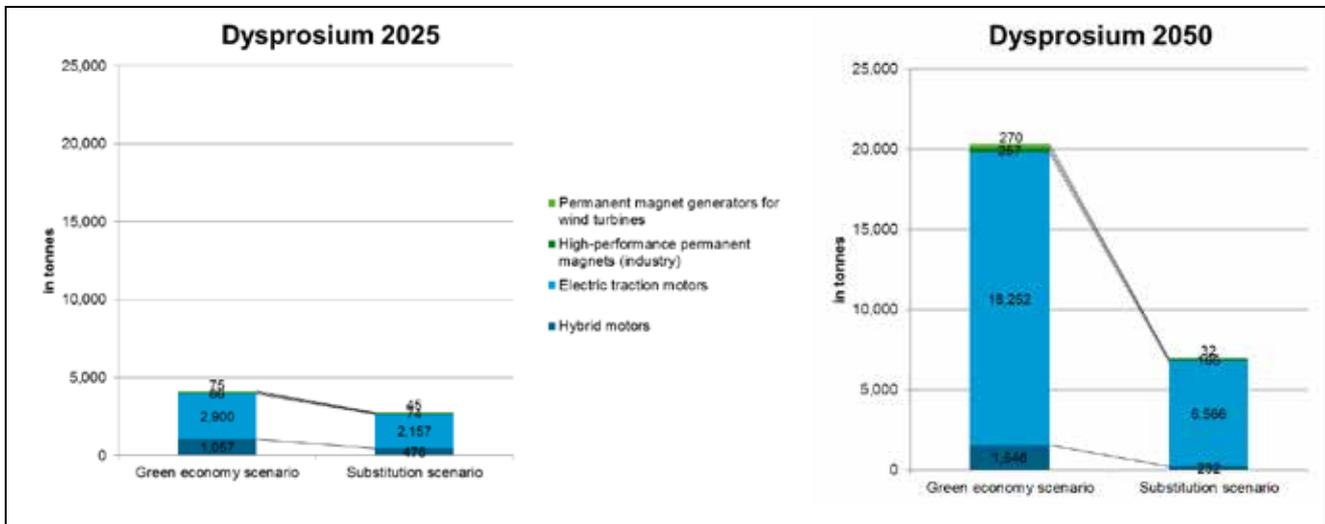
With other environmental technologies, potential for resource conservation through substitution can only be identified to a limited extent. The use of substitutes may also lead to an increased requirement for other relevant raw materials. This applies, for example, to thin-film photovoltaics, where the slight decrease in gallium, indium and silver in 2025 (-5 %) is accompanied by an increased requirement for zinc and tin in the substitution scenario.

The results for the raw materials across all 40 environmental technologies studied reveal that the raw materials requirement for these ETs changes considerably in the substitution scenario compared with the green economy scenario. Marked changes were identified in relation to silver, gold, palladium, rare earths, lithium, tin, gallium, titanium dioxide, manganese and platinum. This mainly consists of a reduction in the raw materials requirement in the substitution scenario. An increase in the raw materials requirement was observed only in relation to platinum. The effects are illustrated below with reference to dysprosium and platinum.

For dysprosium, the reduction potential in the substitution scenario for 2025 amounts to 33 %, i.e. approximately 1,300 tonnes (see Figure below, left). The most substantial reductions can be achieved in electric motors for BEV and PHEV and in hybrid motors, amounting to 742 tonnes and 50 tonnes,

respectively. In 2050, the reduction potential in the substitution scenario amounts to 66 %, i.e. 13,300 tonnes (see Figure below, right). In 2050 too, the most substantial reductions can be achieved in electric traction motors and hybrid motors, amounting to 11,700 tonnes and 1,300 tonnes, respectively.

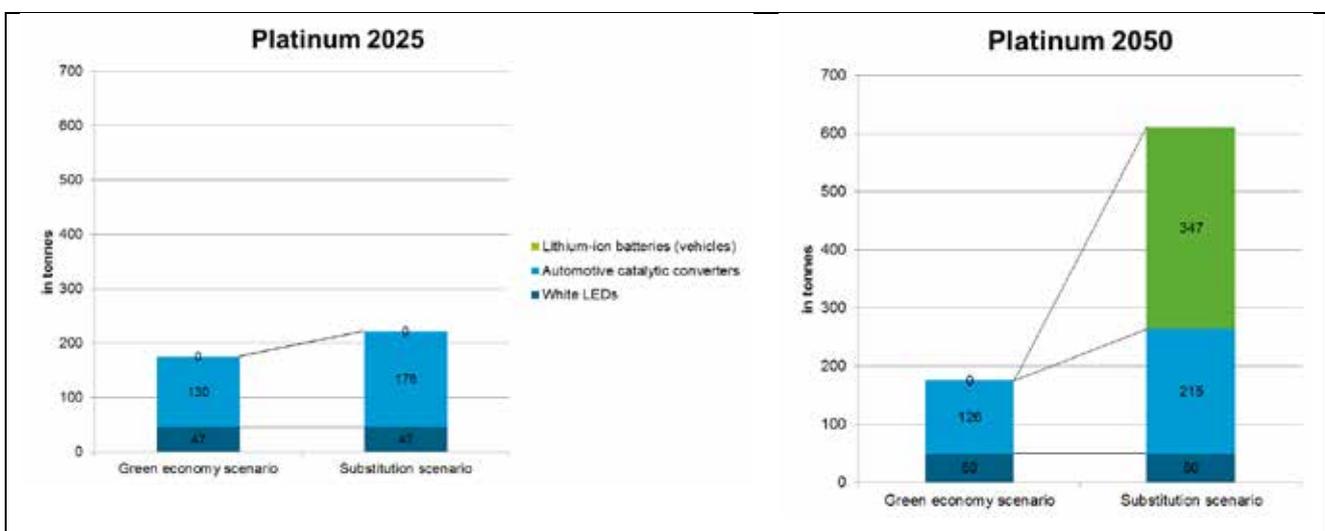
Figure 8: Dysprosium requirement for the environmental technologies studied in the green economy scenario and substitution scenario in 2025 (left) and 2050 (right)



Source: Authors' own graphics

With platinum, a different picture emerges. The requirement for platinum increases in the substitution scenario both in 2025 and in 2050 compared with the green economy scenario. In 2025, the increased requirement in the substitution scenario amounts to 26 % / 46 tonnes (see Figure below, left). This additional requirement arises from the partial substitution of platinum for palladium in automotive catalytic converters. In 2050, the increased requirement for platinum in the substitution scenario amounts to almost 250 % / 436 tonnes (see Figure below, right). Again, this additional requirement relates to automotive catalytic converters and amounts to 89 tonnes (partial substitution of platinum for palladium). However, the largest increase in the requirement in 2050 arises in relation to lithium-ion batteries for vehicles, with the use of fuel cells as a substitute (almost 350 tonnes).

Figure 9: Platinum requirement for the environmental technologies studied in the green economy scenario and substitution scenario in 2025 (left) and 2050 (right)



Source: Authors' own graphics

Roadmap: Tapping substitution potential

The roadmap shows where action is needed, and what form it should take, in order to utilise the identified substitution potential. Reflecting this need for action, practical measures were identified in four areas: technological development, market launch, diffusion through awareness-raising and exchange, and legal/regulatory frameworks.

Technological development

Research and development are required primarily in respect of those substitution options for which a relatively small market share is projected to 2025. Here, a number of disadvantages and obstacles have to be overcome for utilisation of this substitution potential. In many instances, it will be necessary to resolve ongoing technical challenges (lower power density, higher costs) for substitution to become competitive. Copper zinc tin sulphide (CZTS) solar cells, for example, are not yet competitive and the efficiency levels being achieved are relatively low. Further research is therefore required to improve efficiency. Moreover, laboratory efficiency must be achieved in commercial systems as well. With regard to indium-free TCOs (transparent conducting oxides) problems affecting large-scale manufacturing have to be addressed. With white organic light emitting diodes (wOLEDs), it is important to improve their physical and technical properties in the short to medium term. At present, their lifespan is still too short for practical use and they are less energy-efficient than white light emitting diodes (wLEDs). Further research and development are required in order to make inexpensive white organic light emitting diodes (wOLEDs) ready for use in products aimed at the consumer market.

There is also a substantial need for research on high temperature superconducting (HTS) generators for wind turbines. This is a relatively new technology with the potential to achieve very high levels of efficiency in high power ranges using lightweight nacelles. Although some demonstration projects already exist, it is currently impossible to predict when HTS generators are likely to be ready for use in wind energy systems. The first step is to improve the efficiency and reliability of the systems as a whole. With regard to generators for wind turbines, the development of FeCo- or FeNi-based materials, nanocomposites and nanostructures appears to be a promising approach. All these materials are still being developed on a laboratory scale and seem unlikely to achieve the power densities of market-standard permanent magnets even in the medium term. Current research should therefore mainly aim to identify promising material combinations and ways of improving their magnetic properties. Here, the focus is emphatically on R&D, with support for market launch coming later.

Market launch

Many substitution options are already at a very advanced stage of development but are only found in niche markets. This applies, for example, to substitutes for white LEDs, low voltage motors with high-performance permanent magnets in industrial applications, and hybrid and electric traction motors. Here, the main priority is to expedite market launch and diffusion. With regard to white LEDs, conversion of lighting technology will have fairly major implications for value chains. Furthermore, the use of area (instead of point) light sources can cause problems in terms of compatibility with lighting systems in the existing building stock. In order to bring these products to market, entirely new lighting concepts for both indoor and outdoor areas will have to be developed. With regard to diffusion, production costs will have to be reduced for some substitution options. Support is required, for example, in order to scale up demonstration and pilot systems (e.g. OLEDs, sodium sulphur batteries, tandem cells) to commercial production and to reduce costs. Support could also be provided for process development, gathering of experience and economies of scale in manufacturing.

Diffusion through awareness-raising and exchange

In many cases, utilisation of substitution options can be supported with awareness-raising and exchange. With electric traction motors, for example, various technological options, such as asynchronous motors and synchronous motors with reduced rare earth content, are already available in some battery electric vehicles now on the market. Further diffusion should be supported with awareness-raising and confidence-building measures. With asynchronous motors, it is mainly the motor manufacturers themselves who have an interest in establishing their product in the market. Nevertheless, efforts should also be made by the German Government and ministries (e.g. BMU, BMWi), networks and associations (e.g. VDMA, VDA, ZVEI, VDI ZRE) and the EU (e.g. Joint Research Centre, EU Framework Programme for Research and Innovation/Horizon 2020) to develop information offers on the substitution of the asynchronous motor for the synchronous motor. With permanent magnets, too, further diffusion is required, which should be supported by broad-scale awareness-raising, starting right away.

The NdFeB permanent magnet with reduced rare earth content is already available on the market as well. Strong in-market implementation is assumed by 2025 (60%) and 2050 (83%). Further diffusion should be supported by structural policy networks which cluster the knowledge of technologies, needs and conditions for the development and implementation of innovative substitution solutions. Information offers are needed for other environmental technologies as well, such as selective catalytic reduction (SCR) technologies (vanadium pentoxide/titanium dioxide/tungsten SCR or zeolites). Some practical progress has already been made here; however, further improvements and an information campaign to support diffusion are essential to achieve the potential market shares identified, i.e. 5%, for selective catalytic reduction (SCR) technologies. In order to reduce the cerium content in catalytic converter systems, the sensor technology used must be improved or replaced. There are already some promising findings on high frequency-based load sensing in catalytic converter systems, which have already been brought to maturity in the laboratory and should now be installed and tested in vehicles. An information campaign on commercialisation should then follow in order to fulfil the diffusion potential.

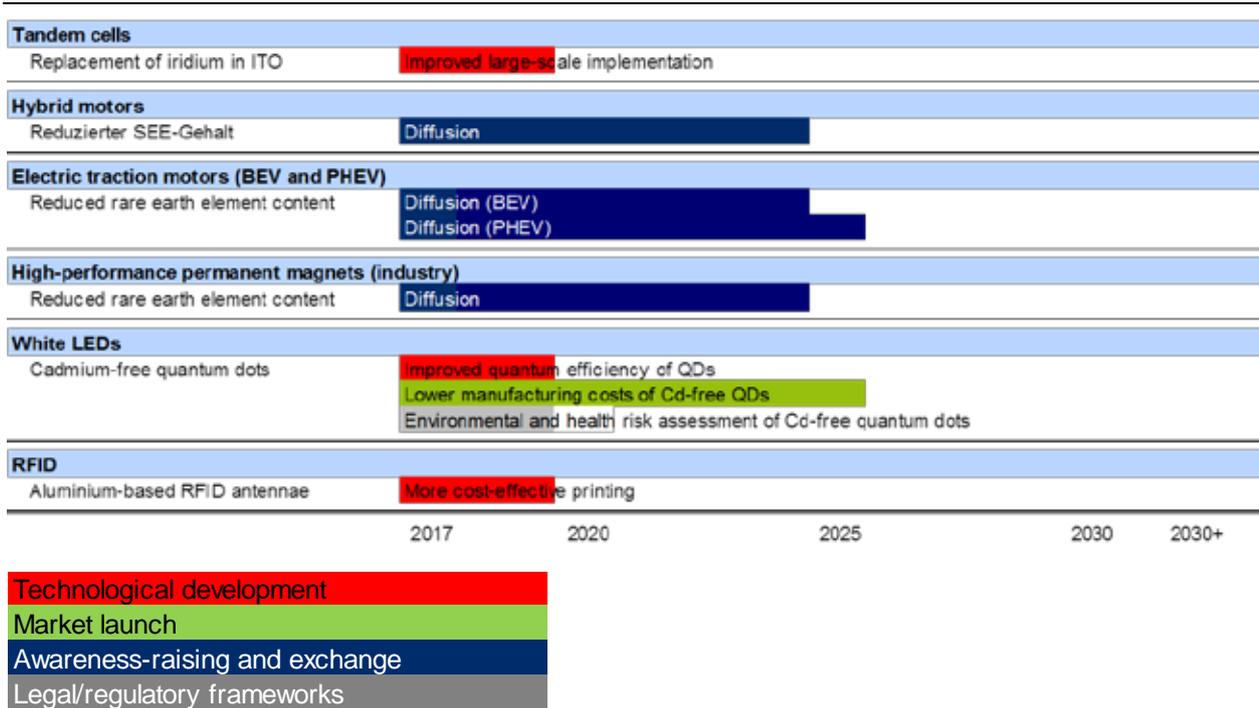
Legal/regulatory frameworks

In addition to technological development, market launch and diffusion through awareness-raising and exchange, legal and regulatory measures have a significant role to play (e.g. in relation to white OLEDs). Innovation should be accompanied by studies on the environmental and health impacts of cadmium-free quantum dots, with a particular focus on the manufacturing of quantum dots and the safe disposal/recycling of the lighting products. In addition, the utilisation of substitution potential should be supported through standardisation to ensure compatibility of white OLED lighting products, including appropriate measurement and quality standards.

The following table shows the environmental technologies and substitution options whose projected potential market share in 2025 exceeds 15%.²⁰

²⁰ A comprehensive analysis and overview of the measures relating to the individual environmental technologies, with their key stakeholders, can be found in Work Report 6.

Figure 10: Environmental technologies and their substitution options with a possible market share > 15% in 2025



Source: Authors' own graphics

Conclusions and outlook

The methodology developed and first used within the project framework, comprising systematic screening, monitoring and prioritisation of environmental technologies and substitution options, has proved its worth and received positive feedback from stakeholders at technical workshops. Substitution options were identified for a number of key environmental technologies. Relevant substitution options are mainly available for the following technologies: electric motors, solar energy, lighting and storage technologies. The broad spectrum of measures, but also the resources required for their implementation, show that the roadmap can only be implemented through concerted action by manufacturers, users, policy-makers and the scientific community. The roadmap further reveals that for the utilisation of the identified substitution potential, targeted efforts are required in the innovation system from policy-makers (e.g. through research, innovation and diffusion funding), research institutes (e.g. Fraunhofer, industrial collective research (AiF), universities, major research centres, etc.), industry and associations. In addition to the strategies for implementation of the roadmap, more far-reaching recommendations for action must be pursued:

1. Embed a forward-looking approach in practical action. This can be achieved through regular monitoring; the environmental technologies and raw materials should be assessed for criticality and substitution options every four years.
2. More intensive moves towards efficiency and substitution should be initiated before raw materials become scarce and critical. Systematic screening and early review of criticality are essential.
3. The substitution options with high market potential should be analysed in more depth with a view to utilisation of this potential.
4. There is scope to provide support for substitution research: by opening up the German Government's Resource Efficiency Award to include substitution by launching a separate BMBF

Substitution Research Programme, focusing on lighting, solar and storage technologies, as part of the resource efficiency funding programmes.

In future, a more far-sighted approach should be adopted towards the issue of critical raw materials substitution in order to minimise the impacts of scarcity on the economy. As the raw materials markets are extremely volatile and the extraction of some raw materials is limited to a small number of countries, price shocks with dramatic short-term impacts may occur more frequently in future. It is vital, therefore, to establish continuous monitoring of environmental technologies which make use of potentially critical raw materials and to introduce regular reviews of substitution options for these technologies.

1 Hintergrund und Ziele des Projektes SubSKrit

Umwelttechnologien gelten als Schlüssel zur Bewältigung der globalen Herausforderungen beim Klima- und Ressourcenschutz. Unter dem **Begriff Umwelttechnologien** werden technologische Innovationen zusammengefasst, deren Einsatz eine signifikante Verringerung der Umweltbeanspruchung gegenüber einer herkömmlichen Technologie mit vergleichbarem Anwendungszweck mit sich bringt. Die auch als Grüne Technologien (Green-Tech) bezeichneten Innovationen zeichnen sich durch verbesserte Energie- oder Ressourceneffizienz im Vergleich zu konventionellen Technologien aus.

Die **Entlastung der Umwelt** von den Auswirkungen der Techniknutzung kann auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Umwelttechnologien verringern die Ressourceninanspruchnahme - sei es durch geringere Rohstoff- und Energieverbräuche oder einen verringerten Schadstoffausstoß - und führen so zu einer erhöhten **Ressourceneffizienz** bei Produktions- oder Konsumprozessen. Neue High-Tech Konzepte ermöglichen auch Umwelttechnologien, die konventionelle Produkte oder Verfahren mit geringer Energieeffizienz oder hohem Rohstoffverbrauch gänzlich ersetzen. So beeinflussen Umwelttechnologien zahlreiche Umweltaspekte: Die Verminderung der Treibhausgasemissionen, den Schutz von Umweltmedien wie Wasser, Boden, Luft und den Erhalt von natürlichen Ökosystemen. Auch der Aspekt der nachhaltigen Landnutzung rückt mehr und mehr in den Vordergrund, weil die Entnahme von Rohstoffen aus der Natur meist mit einer starken Beeinträchtigung weiterer natürlicher Ressourcen einhergeht.

Allerdings enthalten viele Umwelttechnologien **ihrerseits versorgungskritische Rohstoffe**, beispielsweise die Metalle der Seltenen Erden. Erst die Nutzung solcher speziellen High-Tech Werkstoffe und darauf basierender Fertigungsverfahren ermöglicht jene **hohe technische und funktionale Leistung**, welche diese Technologien in ihren jeweiligen Anwendungsfeldern zu Umwelttechnologien werden lässt. Die Effizienzverbesserung gegenüber herkömmlichen Technologien führt deshalb einerseits zu Einsparungen bei traditionellen Werkstoffen wie Kupfer und Stahl, zieht aber eine steigende Nachfrage nach strategischen Technologiemetallen nach sich. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf den Bedarf an solchen knappen Rohstoffen, sondern auch auf die Umwelt. Die Gewinnung und Weiterverarbeitung **einiger** Technologiemetalle ist mit einem hohen ökologischen und energetischen Rucksack verbunden. Deswegen sind auch Umwelttechnologien ihrerseits mit ernststen ökologischen und gesellschaftlichen Herausforderungen gekoppelt. Außerdem sind die Reserven bei den meisten dieser **Metalle** auf wenige Länder konzentriert. Daraus resultiert eine hohe Abhängigkeit der Hersteller von Umwelttechnologien vom globalen Rohstoffhandel, zumal der Markt für die meisten Technologiemetalle eher klein und wenig transparent ist.

Europa und Deutschland sind von möglichen Versorgungsengpässen besonders stark betroffen, da hier nur eine geringe Primärförderung stattfindet und der Großteil der Rohstoffe importiert wird. Das jüngste Update [COM 2017] der Europäischen Kommission zu kritischen Materialien von 2017 weist nun 27 Stoffe als kritisch aus. Die meisten dieser Stoffe spielen auch in Umwelttechnologien eine wichtige Rolle [JRC 2013]. Insbesondere für Deutschland nimmt deshalb die Rohstoffsicherung eine Schlüsselrolle ein. Vor diesem Hintergrund hat die Bewältigung der Rohstoffkritikalität bei der Entwicklung von Umwelttechnologien ein großes **ökonomisches Potential** für die deutsche und europäische Wirtschaft. Die Rohstoffsicherung zum zukünftigen Ausbau der Umwelttechnologie hat damit sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht eine hohe Priorität. Dies spiegelt sich auch im Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung (ProgRess II) [BMUB 2016] wider. Die Entwicklung zahlreicher neuer Alternativen zu existierenden Umwelttechnologien erfolgt nicht zuletzt vor dem Hintergrund möglicher **Versorgungsengpässe** bei kritischen Rohstoffen als auch stark schwankender Rohstoffpreise.

Grundsätzlich beruhen alle nachhaltigen Ressourcenstrategien auf vier Säulen: einer nachhaltigen Primärproduktion von Rohstoffen, einer hohen Materialeffizienz, dem Recycling von Sekundärrohstoff-

fen, sowie der Substitution kritischer Rohstoffe durch weniger kritische Rohstoffe. Alle vier Säulen werden benötigt, da jede dieser Teilstrategien auch mit Einschränkungen verbunden ist. Im Bereich der Seltenerdelemente beispielsweise sind in sehr kurzer Zeit erstaunliche Fortschritte in der Materialeffizienz erzielt worden, z. B. die Reduktion des Einsatzes von Dysprosium in Permanentmagneten oder die Reduktion von Lanthan in Raffineriekatalysatoren. Doch reichen diese Verbesserungen der Materialeffizienz allein nicht aus, um die drastisch steigende Nachfrage nach diesen Technikkomponenten abzupuffern. Das Recycling kann hier auch noch nicht entscheidend zur Deckung des Rohmaterialbedarfs beitragen, da diese Sekundärrohstoffe erst viele Jahre nach ihrer erstmaligen Verwendung wieder auf den Rohstoffmarkt gelangen. Von daher ist das Recycling langfristig eine wichtige Säule, kann je nach Material aber kurzfristig keine Versorgungsengpässe abwenden. Die Realisierung einer nachhaltigen Primärproduktion ist eine sehr hohe Herausforderung, da der Rohstoffabbau in vielen Herkunftsländern ohne ausreichende Umweltauflagen und Sozialstandards stattfindet. Deshalb entstammt ein großer Teil der gegenwärtig am Weltmarkt verfügbaren Rohstoffe aus nicht nachhaltigem Bergbau.

Aus den vorgenannten Gründen kommt der Strategie „Substitution“ für Deutschland eine besonders hohe Bedeutung zu. Das Hauptaugenmerk gilt hier der Suche nach Alternativen für jene Technikkomponenten, welche bislang auf den Einsatz kritischer Materialien angewiesen sind. Dabei gilt es, Substitutionsmöglichkeiten mit möglichst ebenbürtiger technischer und funktioneller Leistung zu entwickeln. Allerdings weisen diese Alternativen in der Praxis oft eine geringere Energieeffizienz oder andere Einschränkungen der erwünschten Eigenschaften auf. Deshalb ist eine Substitution kritischer Werkstoffe bei vielen Umwelttechnologien nur durch Einsatz anderer High-Tech Materialien möglich, die mit ähnlichen Problemen behaftet sein können. Zugleich sind in Deutschland und Europa aber auch das Know-how und die Innovationskraft vorhanden, um hier erfolgreiche Entwicklungen für eine nachhaltige Rohstoffbewirtschaftung anzustoßen. Das Thema Substitution steht deshalb auch im Fokus der europäischen Innovationspolitik. So ist die Förderung von Substitutionen eine Aufgabe der European Innovative Partnership (EIP) zu Rohstoffen.

Die Zielsetzung der Studie ist die Erstellung einer Roadmap für die Substitution kritischer Rohstoffe in Umwelttechnologien. Diese Roadmap soll aufzeigen, welche Substitutionsmaßnahmen dazu beitragen, den Ausbau von Umwelttechnologien auch vor dem Hintergrund steigender Versorgungsrisiken im Rohstoffbereich vorantreiben zu können. Die Roadmap soll einen Beitrag bei der Umsetzung und Fortentwicklung der nationalen Rohstoffstrategie und des deutschen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess II leisten. Außerdem soll sie Hintergrundinformationen sowie Empfehlungen für die politische Debatte liefern. Dazu werden die Maßnahmen nicht nur identifiziert, sondern es werden auch Akteure und Instrumente mit Einfluss auf den Innovationsprozess der Umwelttechnologien benannt.

2 Methodik

Die methodische Vorgehensweise im Projekt wird durch die sechs Hauptprojektphasen reflektiert, die in der nachfolgenden Abbildung aufgeführt sind. In den folgenden Unterkapiteln wird die methodische Vorgehensweise innerhalb der Hauptprojektphasen zusammenfassend erläutert.

Abbildung 11: Überblick über die Hauptprojektphasen



2.1 Methodik: Systematisierung und Screening von Umwelttechnologien (AP 1)

In einem ersten Schritt des Forschungsprojektes wurden 115 als relevant eingestufte Umwelttechnologien für Deutschland zusammengestellt.

Unter Umwelttechnologien werden generell Technologien verstanden, mit denen eine signifikante Umweltverbesserung durch eine verringerte Umweltbeanspruchung gegenüber einer vergleichbaren Technologie einhergeht. Bei der Verringerung der Umweltbeanspruchung kann die Umwelt entweder als Aufnahmemedium, wenn ein verringerter Schadstoffausstoß vorliegt, oder als Quelle entlastet werden, wenn eine verringerte Ressourcenentnahme erfolgt. Grundlage der Auswahlmethodik der zu untersuchenden Umwelttechnologien ist eine weit gefasst Definition, die [Schippl et al. 2009] verwenden. Demgemäß ist folgende Arbeitsdefinition Gegenstand des Vorhabens:

„Technologien, Güter und Dienstleistungen, die der Vermeidung, Verminderung und Beseitigung von Umweltbeeinträchtigungen sowie der Wiederherstellung bereits geschädigter Umweltfunktionen dienen und somit einen Beitrag zu einem nachhaltigen Umgang mit den natürlichen Ressourcen leisten“ [Schippl et al. 2009].

Davon ausgehend werden diese nach [Coenen et al. 1996] eingeteilt in:

- ▶ Techniken des nachsorgenden Umweltschutzes, wie z. B. Abfallbehandlung,
- ▶ Techniken des kompensatorischen Umweltschutzes, z. B. Erosionsschutz,

- ▶ Techniken des vorsorgenden Umweltschutzes, z. B. Erhöhung der Material- und Ressourceneffizienz sowie
- ▶ Techniken der Umweltbeobachtung, z. B. Überwachung der Umweltmedien.

Für das Vorhaben ist diese Einteilung zu grob. Daher wurden weitere Differenzierungen vorgenommen, die es erlauben, eine Umwelttechnologieebene zu wählen, die die Analyse der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien erlaubt.

Als sinnvoller und konsistenter Rahmen für die Auswahl von Umwelttechnologien wurde eine Einteilung in Leitmärkte nach dem Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland „GreenTech made in Germany 4.0“ vorgenommen [BMUB 2014]. Als Leitmärkte werden wesentliche Teilbereiche der Umwelttechnologien bezeichnet. In diesen Teilbereichen sind ökonomische Belange und ökologische Herausforderungen besonders eng verknüpft.

Die Umwelttechnologien werden in sechs Leitmärkte unterteilt:

1. Umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie: Erneuerbare Energien, umweltschonende Nutzung fossiler Brennstoffe, Speichertechnologien, effiziente Netze
2. Energieeffizienz: energieeffiziente Produktionsverfahren, energieeffiziente Gebäude, Energieeffizienz von Geräten, branchenübergreifende Komponenten
3. Rohstoff- und Materialeffizienz: materialeffiziente Produktionsverfahren, Querschnittstechnologien, nachwachsende Rohstoffe
4. Nachhaltige Mobilität: alternative Antriebstechnologien, erneuerbare Kraftstoffe, Technologien zur Effizienzsteigerung, Verkehrsinfrastruktur und Verkehrssteuerung
5. Kreislaufwirtschaft: Abfallsammlung, -transport und -trennung, stoffliche Verwertung, energetische Verwertung, Abfalldeponierung
6. Nachhaltige Wasserwirtschaft: Wassergewinnung und -aufbereitung, Wassernetz, Abwasserreinigung, Effizienzsteigerung bei der Wassernutzung

Die Einteilung in diese Leitmärkte hat mehrere Vorteile. Zum einen kann auf eine bestehende und akzeptierte Systematik aufgesetzt werden. Zum anderen umfassen die sechs Leitmärkte bedeutsame Umwelttechnologien. Darüber hinaus liegen für diese Märkte aggregierte und für verschiedene Marktsegmente und Technologielinien spezifische und aktuelle Marktdaten sowie prospektive Einschätzungen zu ihrer Marktdynamik vor. Auf Basis der Systematik wurden Umwelttechnologien aus aktuellen Studien und politischen Leitdokumenten identifiziert und in einer Matrix für ein Screening erfasst.

Neben dem Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland GreenTech made in Germany 4.0 [BMUB 2014] handelt es sich um folgende Leitdokumente, die ausgewertet wurden:

- ▶ Green Tech Made in Germany 3.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland [BMUB 2012]
- ▶ Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems [WI 2014]
- ▶ Future Metal Demand from Photovoltaic Cells and wind Turbines, Investigating the Potential Risk of Disabling a Shift to Renewable Energy Systems [European Parliament 2011]
- ▶ Materials critical to the energy industry [Achzet et al. 2011]
- ▶ Masterplan Umwelttechnologien [BMU/BMBF 2008]
- ▶ Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies [American Physical Society 2011]
- ▶ Critical Metals in the Path towards the decarbonisation of the EU Energy Sector [JRC 2013]
- ▶ Substitution of Critical Raw Materials [CRM InnoNet 2013]
- ▶ Rohstoffe für Zukunftstechnologien [BMW 2009]
- ▶ Ressourcenschonung durch ausgewählte grüne Zukunftstechnologien [NABU 2013]

Als Ergebnis der Auswertung dieser Leitdokumente konnten nach einem Abstimmungsprozess mit dem Umweltbundesamt 115 Umwelttechnologien identifiziert werden, die als voraussichtlich bedeutsam einzustufen sind. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass der tatsächliche Beitrag der identifizierten Technologien zu Umweltschutz und Ressourcenschonung von den jeweiligen Rahmenbedingungen ihrer Nutzung abhängt (z. B. Cloud Computing). Die Technologien tragen keinesfalls unter jedweden Umständen zur Verbesserung der Umweltqualität und Ressourcenschonung bei. Vielmehr besitzen sie zunächst nur ein signifikantes Potential dazu.

Bei den Technologien wurden sowohl konkrete Technologien (z. B. LED) als auch Konzepte oder Felder (z. B. thermoelektrische Energiewandlung) betrachtet, außerdem wurden Produkte, Komponenten von Produkten, Maschinen oder Anlagen sowie Verfahren (z. B. automatische Sammel- und Stofftrennverfahren) und Systemlösungen (z. B. Cloud Computing) berücksichtigt. Es erfolgte eine Clusterung der Technologien soweit wie möglich, ggf. bis zur „übergreifenden“ Technologieebene, so lange eine hinreichende Homogenität gewährleistet war. Eine trennscharfe Unterscheidung der einzelnen Technologiekategorien ist nicht immer möglich. Umwelttechnologien stellen vielfach eine Querschnittstechnologie dar, mit zahlreichen Überschneidungen zu anderen Technologien etwa aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus, der Elektrotechnik, der Chemieindustrie oder dem Fahrzeugbau.

Außerdem besteht erheblicher Spielraum in der Wahl der Ebene (z. B. Windenergie oder bestimmte Technologielinien unterschieden nach Getriebe- und Generatorenarten), der Definition und Abgrenzung von Umwelttechnologien.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass aus forschungspragmatischen Gründen keine umfassende Auswahlmethodik entwickelt wurde und daher die ausgewählten Technologien keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Da die Technologieauswahl aber auf der Grundlage einer breiten Literaturanalyse erfolgte, die wesentliche Referenzdokumente umfasste, ist davon auszugehen, dass das Spektrum an Umwelttechnologien gut abgebildet wurde.

Die Zusammenstellung der Umwelttechnologien wurde auf dem Kick-off-Meeting des Projekts im Umweltbundesamt am 16.10.2014 vorgestellt und diskutiert. Auf dieser Grundlage wurde die Zusammenstellung einer Liste möglicher relevanter Umwelttechnologien mehrstufig mit dem Umweltbundesamt abgestimmt, so dass eine Liste im Umfang von 115 Umwelttechnologien vorliegt, die die Basis für eine Priorisierung von 40 Umwelttechnologien bildet. Die Umwelttechnologieliste (115 UT) ist im Anhang dokumentiert.

Im Anschluss an die Auswahl der 115 Umwelttechnologien wurden diese auf Basis von drei Kriterien bewertet: Relatives Umweltentlastungspotential, globale Marktdynamik und Relevanz für die deutsche Wirtschaft. Die dabei vorgenommenen Einschätzungen wurden zusätzlich gewichtet. Das Umweltentlastungspotential wird mit 50 % und die beiden anderen ökonomischen Bewertungskriterien jeweils mit 25 % gewichtet. Die folgende Abbildung illustriert beispielhaft für Elektroantriebsmotoren und RFID die Vorgehensweise.

Tabelle 7: Beispiele für Gesamtergebnisse aus dem Screening

Umwelttechnologie	Kriterium A: Umweltentlastungspotential		Kriterium B: Globale Marktdynamik		Kriterium C: Relevanz für die deutsche Wirtschaft		Gesamtergebnis nach Sensitivität
	Einstufung	Punkte	Einstufung	Punkte	Einstufung	Punkte	
Elektroantriebsmotoren	sehr hoch	250	sehr hoch	125	sehr hoch	125	500
RFID	mittel	150	hoch	100	hoch	100	350

Quelle: Eigene Darstellung

Mittels dieser Methodik wurden aus den 115 Umwelttechnologien in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt folgende 40 Umwelttechnologien für die weitere Bearbeitung im Projekt SubSKrit ausgewählt:

Tabelle 8: Die ausgewählten 40 Umwelttechnologien nach Leitmärkten

Energieerzeugung	Energieeffizienz	Rohstoffeffizienz	Mobilität	Kreislaufwirtschaft	Wasserwirtschaft
Lithium-Ionen-Stromspeicher Concentrated Solar Power HTS-Generatoren Reluktanz-Generatoren Gas-und-Dampf-Kraftwerke Dünnschicht-Solarzellen Tandemzellen Kristalline Silizium-Solarzellen Speicherkraftwerke Permanentmagnet-Generatoren in WKA Fremderregte Synchroneratoren in WKA Fremderregte	Kompressoren RFID Weiße LED Organische LEDs Hochleistungs-Permanenmagnete in Industrieanwendungen Grüne Rechenzentren Membranelektrolyse Chloralkali mit Sauerstoffverzehrkatode	Aerogele Nanobeschichtung von Oberflächen Bleifreie Lote Industriekatalysatoren Celitement Precision Farming	Pedelecs Elektroantriebsmotoren Karosserie Leichtbau (Titan und Scandium airframe) Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke Hybridmotoren	Automatische Stofftrennverfahren Me-Schlacken- und Klärschlammbehandlung Phosphorrückgewinnung	Wassereffizienztechnologien Umkehrosmose (hochpermeable Membranen) Dezentrale Wasseraufbereitung

Energieerzeugung	Energieeffizienz	Rohstoffeffizienz	Mobilität	Kreislaufwirtschaft	Wasserwirtschaft
Asynchrongeneratoren in WKA					

Quelle: Eigene Darstellung

2.2 Methodik: Abschätzung des funktionalen Materialbedarfs (AP 2)

Ziel des 2. Arbeitspaketes ist die Ermittlung des spezifischen und absoluten Materialbedarfes der 40 prioritären Umwelttechnologien. Im Fokus des Projektes liegen zunächst 64 Rohstoffe. Diese sind zum einen aus der Liste des UNEP International Resource Panel (ohne Eisen und Aluminium) und der Liste der kritischen Rohstoffe der Europäischen Kommission [EU 2014]. Die Liste wird in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt für diesen Arbeitsschritt bewusst groß gehalten. Die untersuchten Materialien sind in Kapitel 3.3.1 aufgelistet.

Zur Ermittlung des spezifischen Materialbedarfs wird für jede Umwelttechnologie zunächst eine geeignete spezifische Einheit definiert. Bezogen auf diese spezifischen Einheiten wird aus Fachliteratur, eigenen Quellen sowie Experteninterviews der Materialbedarf je spezifischer Einheit ermittelt. Bei der Erhebung dieser Daten wird auf den intrinsischen Materialbedarf (in den jeweiligen Komponenten/Technologien etc.) abgehoben. Das bedeutet, zusätzlicher Materialbedarf durch Verarbeitungsrückstände, Produktionsausschuss etc. sind hier nicht berücksichtigt. Die entsprechend ermittelten spezifischen Materialbedarfe werden anschließend ausgehend vom Jahr 2013 für 2025 und 2050 mit entsprechenden Szenarioannahmen auf nationaler als auch globaler Ebene (jeweils Anzahl spezifischer Einheiten) verbunden. Auf diese Weise werden für die 40 Umwelttechnologien für ein Business-As-Usual-Szenario als auch für ein Green-Economy-Szenario sowohl für die nationale als auch die globale Ebene die absoluten Materialbedarfe ermittelt.

2.3 Methodik: Kritikalitätsanalyse (AP 3)

Zur Auswahl der 20 UTs wird ein zweistufiges Verfahren über die drei Kritikalitätsdimensionen angewandt, um erst ein Ranking der Rohstoffe und danach ein Ranking der UTs zu ermöglichen.

In einem ersten Schritt wird die Anzahl der zu betrachtenden Rohstoffe reduziert. In den 40 prioritären UTs finden sich nur 37 relevante Rohstoffe. Zur weiteren Fokussierung auf die wichtigsten Rohstoffe wird ein Abschneidekriterium angewandt (3 % Gesamtbedarf bzgl. der Primärförderung 2013 über alle UTs im Green Economy-Szenario), welches die Anzahl relevanter Rohstoffe auf 21 einengt.

Diese Rohstoffe werden durch verschiedene Methoden in den drei Kritikalitätsdimensionen Versorgungsrisiko, ökologisches Schadenspotential und strategische Bedeutung bewertet.

Für die **Kritikalitätsdimension Versorgungsrisiko** wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands [VDI 4800 2016] genutzt. Die Richtlinie basiert auf einem System von 13 Indikatoren, die in 3 Gruppen eingeteilt sind.

Jeder Rohstoff erhält für jeden Indikator eine Bewertung, wobei die Bewertungsskala von 0 bis 1 reicht und die Zwischenschritte 0,3 und 0,7 beinhalten. Eine Bewertung einzelner Rohstoffe wird über eine Zahl vorgenommen. Entgegen dem Verfahren der Richtlinie, welche die einzelnen Wertungen mittels degressiver Addition aggregiert, wird in der Bildung eines Einzelwertes auf den arithmetischen Mittelwert zurückgegriffen, da die degressive Addition spätere Sensitivitätsanalysen erschwert.

In der VDI 4800 finden sich für weite Teile der zu betrachtenden Rohstoffe Bewertungen aufgrund von Berechnungen, Schätzungen und Expertenmeinungen. Es fehlen allerdings Wertungen für folgende

Rohstoffe: Iridium, Ruthenium, Rhodium, Gold, Praseodym und Terbium. Diese fehlenden Daten in der Bewertung wurden über Analogieschlüsse ausgeglichen.

Für die Platingruppenmetalle Iridium, Ruthenium und Rhodium werden die Wertungen von Platin und Palladium herangezogen. Die Basis bildet Palladium, wobei das regulatorische Länderrisiko und der Grad der Nachfragesteigerung eher analog zu Platin gesehen werden. Für Gold wird auf die Daten von Silber zurückgegriffen, da dieses in der Förderstruktur, der Knappheit und der geopolitischen Verteilung nah an Gold liegt. Für das leichte Seltenerdelement Praseodym werden die Daten von Neodym übernommen, welches ebenfalls ein leichtes Seltenerdelement ist. Für Terbium, dem schweren Seltenerdelement, wird die Bewertung aus den Daten für das schwere Seltenerdelement Dysprosium übernommen.

Die 13 Indikatoren werden wie oben beschrieben über einen Mittelwert zu einem Wert zusammengefasst, auf dessen Basis die Elemente anschließend einer Rangbildung unterworfen werden. Auf Platz 1 liegt das Element mit dem höchsten Wert (also dem höchsten Versorgungsrisiko) während das Element mit dem geringsten Wert (also dem geringsten Versorgungsrisiko auf dem letzten Platz (21) geführt wird.

Für die **Kritikalitätsdimension ökologisches Schadenspotential** wird auf die Daten und die Methodik von Graedel et al. aus der Veröffentlichung „Criticality of metals and metalloids“ [Graedel 2015] zurückgegriffen. Graedel hat in dieser Veröffentlichung Daten für die verschiedenen Elemente aus Ecoinvent 2.2 und 3 über die Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe [ReCiPe 2013] berechnet. Er hat für Elemente, die über verschiedene Routen gewonnen werden, die relativen Produktionsvolumina ermittelt und die Daten für das jeweilige Element entsprechend gewichtet. Das Ergebnis sind Daten für die jeweiligen Midpointkategorien, die über die Gewichtungsschlüssel aus ReCiPe in die drei Endpunktkategorien überführt werden können. Da der Endpoint Ressourcenverbrauch über die anderen Dimensionen der Kritikalität abgebildet wird hat auch Graedel nur Werte für die Endpoints Ökosystemqualität und menschliche Gesundheit ermittelt. Die ermittelten Werte werden als Einheit in Points ausgedrückt und können addiert werden, um einen Gesamtscore zu generieren. In einer weiteren Veröffentlichung von Graedel „Methodology of Metal Criticality Determination“ [Graedel 2012] wird die in [Graedel 2015] angewandte Methodik zur Skalierung der Umweltergebnisse auf einer Skala von 0 bis 100 dargestellt. Das Ergebnis der beiden Endpoints wird addiert und dann mit folgender Formel skaliert:

$$\text{Ökologisches Schadenspotential} = \log_{10}(\text{ReCiPe-Points} + 1) \cdot 20$$

Durch diese Methode wird für jedes untersuchte Element ein ökologisches Schadenspotential ermittelt, welches wie beim Versorgungsrisiko, einer Rangbildung unterworfen wird. Der höchste Wert (also das Element mit dem höchsten Schadenspotential) hat hier den höchsten Platz (1), während der geringste Wert (also das Element mit dem geringsten Schadenspotential) den letzten Platz einnimmt (21).

Für die **Kritikalitätsdimension strategische Bedeutung** wird auf die Materialbedarfe der 40 prioritären Umwelttechnologien 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 Platz 1 gesetzt, während das Element mit dem geringsten Bedarf auf dem letzten Platz (21) eingestuft wird.

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 Ran-

king zu bilden. Dies geschieht über das Addieren der einzelnen Platzierungen und der Bildung eines Mittelwertes. Für jeden einzelnen Rohstoff wird der Rang in den Kritikalitätsdimension Versorgungsrisiko, ökologisches Schadenspotential und strategische Bedeutung addiert und durch drei geteilt. 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.

Für das **Ranking der Umwelttechnologien** müssen die Ergebnisse des Rohstoffranking übertragen werden. Um die UTs nach ihrer Relevanz zu ordnen, wurden die UTs in abfallender Priorität nach folgenden Kriterien sortiert:

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

Der kritischste Rohstoff jeder UT ist das erste Sortierungskriterium, da dieser stets den limitierenden Faktor darstellt. Als zweites Sortierkriterium folgt der Mittelwert der Kritikalitätsränge aller in der UT befindlichen Rohstoffe, 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 gestattet die Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien in diesem Arbeitspaket. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Auswahl der Umwelttechnologien auch unter Annahme veränderter Gewichtungen und Bewertungen der Kriterien sowie unterschiedlicher Szenarioverläufe robust bleibt (vgl. Kapitel 4.3)

Die detaillierten Zahlen zur Kritikalitätsbewertung der einzelnen Rohstoffe und Umwelttechnologien finden sich in Arbeitsbericht 3.

2.4 Methodik: Screening des Substitutionspotentials (AP 4)

Das Substitutionspotentialscreening baut auf der vorher durchgeführten Auswahl der 20 relevanten Umwelttechnologien mit kritischem bzw. potentiell kritischem Materialbedarf auf. Differenziert wird nach materieller, technologischer und funktionaler Substitution. Bei einer Materialsubstitution werden partiell Werkstoffe oder Teile derselben durch andere ersetzt. Ein Beispiel ist hier die reine **Materialsubstitution** von Dysprosium und Neodym durch Samarium und Kobalt in Permanentmagneten. Die technologische Substitution zeichnet sich dadurch aus, dass der Einsatz von neuen Technologien und Verfahren den gleichen Umweltnutzen erzielt. Hierzu zählen auch Faktorsubstitutionen unter Variation der Arbeits- und Materialintensität. Zum Beispiel ist der permanent erregte Synchronmotor mit Seltenen Erden in einem Elektrofahrzeug durch einen Asynchronmotor ohne Seltenerdelemente substituierbar. Die funktionale Substitution erzielt den gleichen Umweltnutzen durch ein neues Produkt oder eine Produkt-Dienstleistung. Eine funktionale Substitution eines Fahrzeug-Abgas-Katalysators besteht z. B. in einem vollelektrischen Pkw, der keinen Katalysator mehr benötigt.

Nach der Identifizierung möglicher materieller, technologischer und funktionaler Substitutionsmöglichkeiten wird eine vertiefte Analyse vorgenommen. Es werden neben möglichen Effizienzverlusten auch mögliche Restriktionen in den verschiedenen Anwendungsfeldern betrachtet. Ebenfalls werden mögliche ökologische Vor- und Nachteile hinsichtlich des Materialeinsatzes untersucht und eine Einschätzung zum Entwicklungsstadium der einzelnen Substitutionsalternativen gegeben.

Das Substitutionscreening basiert auf intensiver Literatur- und Internetrecherche sowie Interviews mit Fachleuten aus Industrie und Wissenschaft. Die Ergebnisse des Screenings wurden am 13. Oktober 2016 im Rahmen eines Fachgesprächs ausgewählten Fachleuten aus den verschiedenen Technologiebereichen vorgestellt und gemeinsam mit ihnen diskutiert. Diese Expertenrunde konnte wichtige Hinweise liefern und Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings validieren. Die Rückmeldungen des Fachgesprächs sind in die Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings mit eingegangen.

2.5 Methodik: Kritikalitätsauswirkungen (AP 5)

Zur Analyse der Kritikalitätsauswirkung eines Substitutionsszenarios wird in einem mehrstufigen Prozess vorgegangen. Zunächst wurde das Substitutionsszenario gemeinsam mit dem Auftraggeber abgestimmt. In diesem Szenario sind Annahmen getroffen, wie hoch der Marktanteil der jeweiligen, als zukünftig realisierbar eingeschätzten Substitutionstechnologie in einem Substitutionsszenario ausfallen könnte. Darauf aufbauend wird ermittelt wie sich dies auf den Rohstoffbedarf der einzelnen Technologien auswirkt. Hierzu werden die globalen Bedarfe der Umwelttechnologie im Substitutionsszenario mit den Bedarfen der ursprünglichen Technologie im globalen Green Economy-Szenario 2025 und 2050 verglichen. Mit diesem Schritt wird deutlich, welche globalen Potentiale zur Rohstoffeinsparung bzw. welcher Mehrbedarf in einem Substitutionsszenario je Umwelttechnologie möglich wären.

Abschließend wird die Kritikalität der Rohstoffe im Substitutionsszenario mit Hilfe eines übergeordneten Scores mit dem Green-Economy-Szenario verglichen: Im Arbeitspaket 3 wurde die Gesamtkritikalität der relevanten Rohstoffe über die drei Indikatoren Versorgungsrisiko, strategische Bedeutung und ökologisches Schadenspotential bewertet und auf die Umwelttechnologien übertragen. Hieraus ergaben sich die 20 weiter zu betrachtenden Technologien. Die Auswirkungen der Substitutionen auf die Gesamtkritikalität soll nun mit den gleichen Indikatoren bewertet werden. Allerdings wird hier von einer Rangbildung abgesehen, da ein Gesamtscore vor allem die Änderung der Massen der einzelnen kritischen Rohstoffe abbilden muss. Daher wird nun eine Aggregation der drei Indikatoren über alle Rohstoffe durchgeführt, um einen Gesamtscore für das gesamte Szenario der Umwelttechnologien bzw. deren Rohstoffbedarf zu erhalten.

Als Aggregation wird das Produkt der drei Indikatoren (Versorgungsrisiko, strategische Bedeutung, ökologisches Schadenspotential) verwendet, ohne Mitbetrachtung der Masse, da diese im Indikator strategische Bedeutung in Bezug auf die Primärproduktion bereits enthalten ist.²¹

Da der Gesamtscore mit normierten Werten sehr klein ist, wurde die Aggregation durch Multiplikation ohne vorherige Normierung durchgeführt. Dies wird als übersichtlich und transparent erachtet und wird deshalb im Folgenden als Bewertungsmethode für die Szenarien mit und ohne Substitution herangezogen.

Die Formel zur Berechnung des Gesamtscores lautet:

$$\text{Gesamtscore} = \sum_{k=Cer}^{Zinn} \text{Versorgungsrisiko}_k \cdot \text{strategische Bedeutung}_k \cdot \text{ökologisches Schadenspotential}_k$$

Der Gesamtscore dient nur dem Vergleich, ob das Substitutionsszenario tatsächlich eine absolute Einsparung erzielt. Die prozentuale Veränderung ist hierbei von untergeordneter Bedeutung und kann auch nicht genutzt werden, um absolute Aussagen zu treffen, da hier sehr viele Annahmen hinter den Zahlen stehen und die berechneten Gesamtscores keinem anderen Zweck dienen als zu verifizieren, dass das Substitutionsszenario einen positiven Effekt auf die Gesamtkritikalität hat.

²¹ Weitere Ansätze zur Aggregation wurden untersucht, aber nicht weiter verfolgt. Diese sind im Arbeitsbericht 5 ausgeführt.

2.6 Methodik: Substitutions-Roadmap (AP 6)

Im Arbeitspaket 6 wird für die ausgewählten 14 Umwelttechnologien, welche Substitutionspotential aufweisen, eine Substitutions-Roadmap erstellt. Die Roadmap soll sichtbar machen, wo welcher Handlungsbedarf besteht, um die identifizierten Substitutionspotentiale erschließen zu können.

Dazu werden Einzelmaßnahmen (technologisch spezifisch als auch übergreifend) ausgearbeitet, für deren Umsetzung Zeitpunkte bzw. -räume sowie Akteure spezifiziert werden. Zentrale Handlungsfelder für die Erschließung der identifizierten Substitutionspotentiale sind dabei die Technologieentwicklung, die Markteinführung und die Schaffung von geeigneten Formaten für Qualifizierung, Austausch und Monitoring von Substitutionsmöglichkeiten. Eine Basis für die Ermessung des technologie- bzw. substitutionsspezifischen Handlungsbedarfs liefern die Ergebnisse insbesondere aus AP 4 und AP 5.

In folgenden fünf 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 (AP5): 1. Priorität: > 15 %; 2. Priorität: > 5 – 15 %; 3. Priorität: ≤ 5 %
- ▶ Schritt 4: Konkretisierung der Angaben zu den Substitutionsoptionen für Handlungsbedarf, Maßnahme, Akteure und Zeithorizont
- ▶ Schritt 5: Bündelung und Visualisierung der Maßnahmen in Form eines „Fahrplans“ zur Erschließung der Substitutionspotentiale.

3 Umwelttechnologien im Fokus

3.1 Vorauswahl von Umwelttechnologien

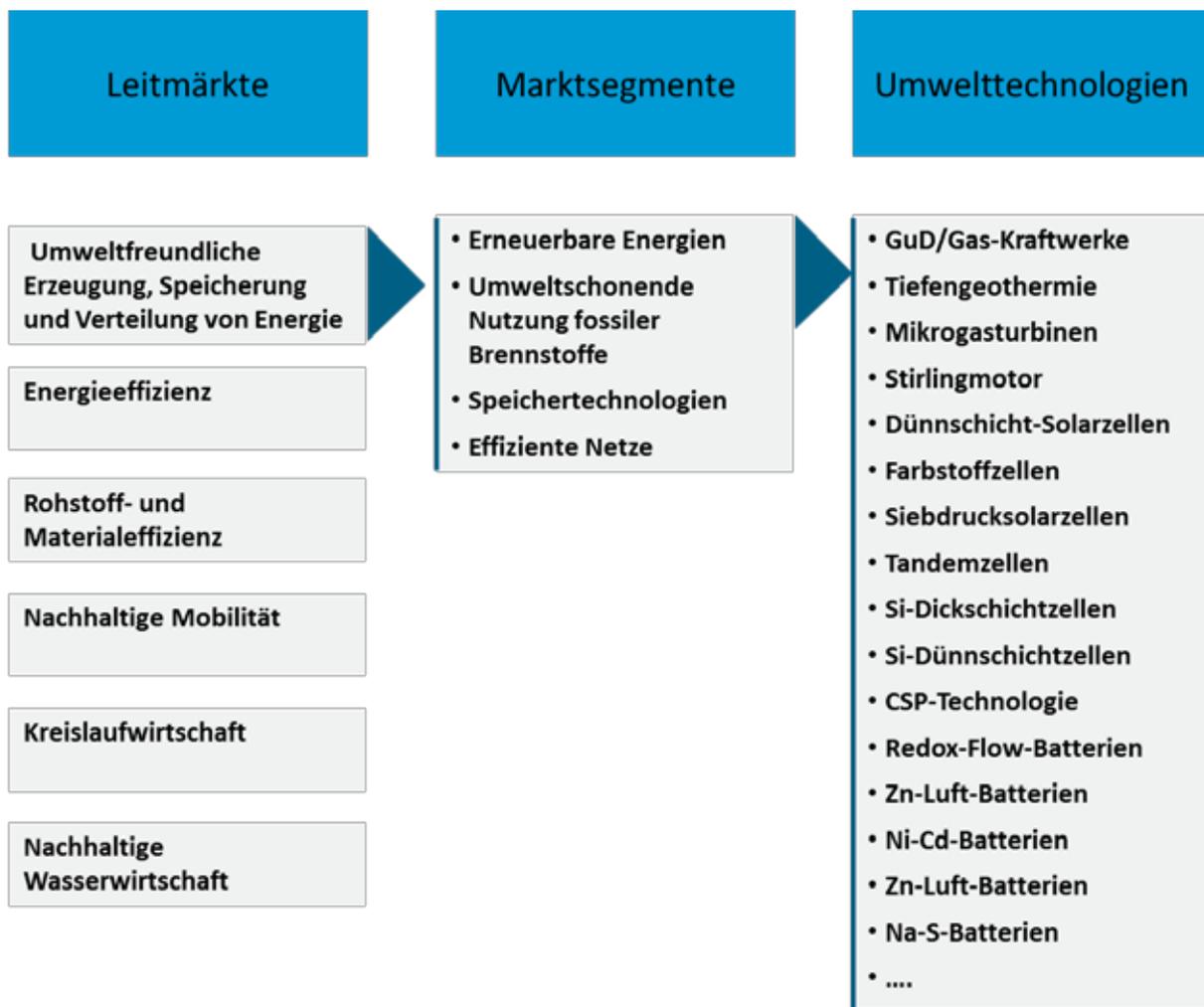
Grundlage der Auswahlmethodik der zu untersuchenden Umwelttechnologien ist eine weit gefasste Definition, die [Schippel et al. 2009] verwenden, wonach diese ihren Ursprung in der Ausrichtung als Umweltschutztechnologien haben. Demzufolge werden unter Umwelttechnologien Technologien, Güter und Dienstleistungen verstanden, „die der Vermeidung, Verminderung und Beseitigung von Umweltbeeinträchtigungen sowie der Wiederherstellung bereits geschädigter Umweltfunktionen dienen und somit einen Beitrag zu einem nachhaltigen Umgang mit den natürlichen Ressourcen leisten“ [Schippel et al. 2009]. Als sinnvoller und konsistenter Rahmen für die Auswahl von Umwelttechnologien wurde eine Einteilung in Leitmärkte nach dem Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland „Green-Tech made in Germany 4.0“ vorgenommen [BMUB 2014]. Als Leitmärkte werden wesentliche Teilbereiche der Umwelttechnologien bezeichnet. In diesen Teilbereichen sind ökonomische Belange und ökologische Herausforderungen besonders eng verknüpft.

Die Umwelttechnologien werden in sechs Leitmärkte unterteilt:

1. Umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie: Erneuerbare Energien, umweltschonende Nutzung fossiler Brennstoffe, Speichertechnologien, effiziente Netze
2. Energieeffizienz: energieeffiziente Produktionsverfahren, energieeffiziente Gebäude, Energieeffizienz von Geräten, branchenübergreifende Komponenten
3. Rohstoff- und Materialeffizienz: materialeffiziente Produktionsverfahren, Querschnittstechnologien, nachwachsende Rohstoffe
4. Nachhaltige Mobilität: alternative Antriebstechnologien, erneuerbare Kraftstoffe, Technologien zur Effizienzsteigerung, Verkehrsinfrastruktur und Verkehrssteuerung
5. Kreislaufwirtschaft: Abfallsammlung, -transport und -trennung, stoffliche Verwertung, energetische Verwertung, Abfalldeponierung
6. Nachhaltige Wasserwirtschaft: Wassergewinnung und -aufbereitung, Wassernetze, Abwasserreinigung, Effizienzsteigerung bei der Wassernutzung.

Die Einteilung in diese Leitmärkte hat mehrere Vorteile. Zum einen kann auf eine bestehende und akzeptierte Systematik aufgesetzt werden. Zum anderen umfassen die sechs Leitmärkte bedeutsame Umwelttechnologien. Darüber hinaus liegen für diese Märkte aggregierte und für verschiedene Marktsegmente und Technologielinien spezifische und aktuelle Marktdaten sowie prospektive Einschätzungen zu ihrer Marktdynamik vor.

Abbildung 12: Segmentierung der Umwelttechnologien nach Leitmärkten



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [BMUB 2014]

Auf Basis der Systematik wurden Umwelttechnologien aus aktuellen Studien und politischen Leitdokumenten identifiziert und in einer Matrix für ein Screening erfasst. Als Ergebnis der Auswertung konnten 115 Umwelttechnologien identifiziert werden, die als bedeutsam einzustufen sind. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass der tatsächliche Beitrag zu Umweltverbesserung und Ressourcenschonung der identifizierten Technologien von den jeweiligen Rahmenbedingungen ihrer Nutzung abhängt. Die Technologien tragen keinesfalls unter jedweden Umständen zur Umweltverbesserung und Ressourcenschonung bei. Vielmehr besitzen sie lediglich ein signifikantes Potential zur Umweltverbesserung und Ressourcenschonung. Bei den Technologien wurden sowohl konkrete Technologien (z. B. LED) als auch Konzepte oder Felder (z. B. thermoelektrische Energiewandlung) betrachtet. Außerdem wurden Produkte, Komponenten von Produkten, Maschinen oder Anlagen sowie Verfahren (z. B. automatische Sammel- und Stofftrennverfahren) und Systemlösungen (z. B. Cloud Computing) berücksichtigt. Es erfolgte soweit wie möglich eine Clustering der Technologien, ggf. bis zur „übergreifenden“ Technologieebene, solange eine hinreichende Homogenität gewährleistet ist. Eine trennscharfe Unterscheidung der einzelnen Technologieebenen ist nicht immer möglich. Umwelttechnologien stellen vielfach eine Querschnittstechnologie dar, mit zahlreichen Überschneidungen zu anderen Technologien etwa aus Bereich des Maschinen- und Anlagenbau, der Elektrotechnik, der Chemieindustrie oder dem Fahrzeugbau. Es sei deshalb ausdrücklich darauf hingewiesen, dass aus forschungspragmatischen Gründen keine umfassende Auswahlmethodik entwickelt wurde und daher die ausgewählten Technologien keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Da die Technologieauswahl aber auf der Grundlage ei-

ner breiten Literaturanalyse erfolgte, die wesentliche Referenzdokumente umfasst, ist davon auszugehen, dass das Spektrum an Umwelttechnologien im Wesentlichen gut erfasst wurde. Für 40 ausgewählte Umwelttechnologien wurden im nächsten Schritt Szenarien hergeleitet, welche die Basis für die Bestimmung der Materialbedarfe bilden.

3.2 Szenarien zur Marktentwicklung von Umwelttechnologien

Die Dynamik auf den Märkten für Umwelttechnologien spielt für die Analyse der Kritikalität von Rohstoffen eine wichtige Rolle. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die global steigende Nachfrage nach Umwelttechnologien das Marktvolumen für Umwelttechnologien weiterhin expandieren lässt. Die Geschwindigkeit des Wachstums kann aber unterschiedlich ausfallen, je nachdem wie sich die Rahmen- und Umfeldbedingungen in Zukunft verändern werden. Der Analyse der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien wurden deshalb zwei Szenarien zugrunde gelegt: Zum einen ein Business-As-Usual-Szenario, das bestehende Trends extrapoliert. Zum anderen ein Szenario, in dem sich die Marktdynamik für Umwelttechnologien deutlich stärker ausprägt. Dies wäre der Fall, wenn „Green Economy“, das heute schon in Deutschland aber auch von vielen internationalen Organisationen und Ländern als Leitbild für das 21. Jahrhundert verstanden wird, sich durchsetzt. Das Business-As-Usual-Szenario wäre dann ein Szenario mit höherer Eintrittswahrscheinlichkeit, das Green Economy-Szenario eher ein Extrem-Szenario, das eine Analyse ermöglicht, die aufzeigt, wie sich der Rohstoffbedarf im Fall einer grundlegenden Transformation in Richtung einer „grünen“ Wirtschaft entwickelt.

Das Business-As-Usual-Szenario

Das Business-As-Usual-Szenario basiert auf der Erwartung, dass die Marktprognosen für das Wachstum der Umwelttechnologien, wie sie in dem Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland [BMUB 2014] gemacht worden sind, eintreffen. Erwartet wird eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 6,5 Prozent bis zum Jahr 2025. Die einzelnen Leitmärkte zeigen ein unterschiedliches Wachstumstempo. Der wachstumsstärkste Leitmarkt ist die nachhaltige Mobilität mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 9,6 Prozent im Zeitraum 2013 bis 2015. Auch die Leitmärkte für Rohstoff- und Materialeffizienz sowie für umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie entwickeln sich mit 8,2 Prozent bzw. 7,4 Prozent dynamischer als der Durchschnitt der Umwelttechnologien. Etwas unterdurchschnittlich wachsen die Leitmärkte für nachhaltige Wasserwirtschaft (5,7 %), Kreislaufwirtschaft (4,4 %) und Energieeffizienz (4,3 %). Das Szenario entspricht den heutigen Markterwartungen. Demnach wird das globale Volumen der Leitmärkte für Umwelttechnologien voraussichtlich von 2.536 Milliarden Euro im Jahr 2013 auf 5.385 Milliarden Euro im Jahr 2025 steigen. [BMUB 2014]

Das Green Economy-Szenario

Das Green Economy-Szenario beschreibt einen alternativen Entwicklungspfad, in dessen Mittelpunkt die Realisierung einer Green-Economy in Industrieländern bis zum Jahr 2050 steht. Dies umfasst einen umfassenden wirtschaftlichen Innovationsprozess. Ziel ist die absolute Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch. Forciert wird ein solches Szenario durch steigende Rohstoff- und Energiepreise. Außerdem spielt die Ausgestaltung der nationalen und globalen Umweltpolitiken eine wichtige Rolle. Das Marktwachstum für Umwelttechnologien liegt bei diesem Szenario über den Markterwartungen.

Tabelle 9: Faktoren der Szenarien Business-As-Usual und Green Economy

Faktoren	BAU - Szenario	Green Economy - Szenario
Grundannahmen	Trendfortschreibung	Green Economy wird in Deutschland und anderen Industrieländern verwirklicht Große Transformation
Basis	GreenTech-4.0 [BMUB 2014]	Leitbilder der Green Economy
Wachstumsdynamik	Fortschreibung der Wachstumsdynamik	Beschleunigte Wachstumsdynamik gegenüber Trend
Zeitraum	2025 2050	2025 2050
Bezugsraum	National Global	National Global

Quelle: Eigene Darstellung

3.3 Materialbedarf der ausgewählten Umwelttechnologien

3.3.1 Rohstoffe im Fokus

In der Analyse des Materialbedarfs für die 40 ausgewählten Umwelttechnologien wurde der Fokus zunächst auf 64 Rohstoffe gerichtet. Diese sind zum einen aus der Liste der UNEP International Resource Panel (ohne Eisen und Aluminium) und der Liste der kritischen Rohstoffe der Europäischen Kommission [EU 2014] ausgewählt und werden in nachfolgender Tabelle in alphabetischer Reihenfolge dargestellt.

Tabelle 10: 64 Rohstoffe im Fokus des Projektes

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

Quelle: Eigene Darstellung

3.3.2 Spezifischer Materialbedarf

Zur Ermittlung des spezifischen Materialbedarfs wird für jede Umwelttechnologie zunächst eine geeignete spezifische Einheit definiert. Bezogen auf diese spezifischen Einheiten wird aus Fachliteratur, eigenen Quellen sowie Experteninterviews der Materialbedarf je spezifischer Einheit ermittelt. Bei der Erhebung dieser Daten wird auf den intrinsischen Materialbedarf (in den jeweiligen Komponenten/Technologien etc.) abgehoben. Das bedeutet, zusätzlicher Materialbedarf durch Verarbeitungsrückstände, Produktionsausschuss etc. sind hier nicht berücksichtigt.

Anhand des Beispiels des Elektromotors wird das Vorgehen veranschaulicht. Der Elektroantriebsmotor wird eingesetzt in vollelektrischen Pkw (BEV) und Plug-in-Hybrid-Pkw (PHEV). Die spezifische Einheit wird definiert als Leistung eines Synchronmotors mit Permanentmagnet von >50kW je PHEV bzw. BEV.

In Synchronmotoren mit Permanentmagnet werden die Seltenen Erden, Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium sowie Gallium und Kupfer eingesetzt. Der spezifische Materialbedarf für die Stützjahre 2013, 2025 und 2050 ist in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 11: Spezifischer Materialbedarf der Elektroantriebsmotoren (in Gramm je BEV bzw. PHEV)

Material	2013 [Angabe in Gramm]	2025 [Angabe in Gramm]	2050 [Angabe in Gramm]
Dysprosium	210	120	120
Gallium	1	1	1
Kupfer	12.600	12.600	12.600
Neodym	360	450	450
Praseodym	120	120	120
Terbium	24	24	24

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die spezifischen Materialbedarfe für die untersuchten Umwelttechnologien sind in Arbeitsbericht 2 detailliert beschrieben.

Die entsprechend ermittelten spezifischen Materialbedarfe werden anschließend ausgehend vom Jahr 2013 für 2025 und 2050 mit entsprechenden Szenarioannahmen auf nationaler als auch globaler Ebene (jeweils Anzahl spezifischer Einheiten) verbunden. Auf diese Weise werden für die 40 Umwelttechnologien für ein Business-As-Usual-Szenario als auch für ein Green-Economy-Szenario für die nationale als auch die globale Ebene die absoluten Materialbedarfe ermittelt.

3.3.3 Absoluter Materialbedarf in den Szenarien

Der absolute Materialbedarf wird für jede Umwelttechnologie auf Basis des spezifischen Materialbedarfs erhoben. Die Hochrechnung wird zum einen für Deutschland und weltweit durchgeführt. Zum anderen werden zwei Szenarien betrachtet: Das Business-As-Usual- und das Green-Economy-Szenario. Als beispielhafte Ausführung wird in den kommenden Tabellen der absolute Materialbedarf für die Elektroantriebsmotoren zusammengestellt.

Tabelle 12: Absoluter Materialbedarf national (in t): Elektroantriebsmotoren

Material	BAU-Szenario			Green Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	1,56	31,9	124	74,2	303
Gallium	0,007	0,266	1,03	0,618	2,53
Kupfer	93,7	3.352	12.991	7.788	31.861
Neodym	2,68	120	464	278	1.138
Praseodym	0,892	31,9	124	74,2	303
Terbium	0,178	6,38	24,7	14,8	60,7

Quelle: Eigene Zusammenstellung

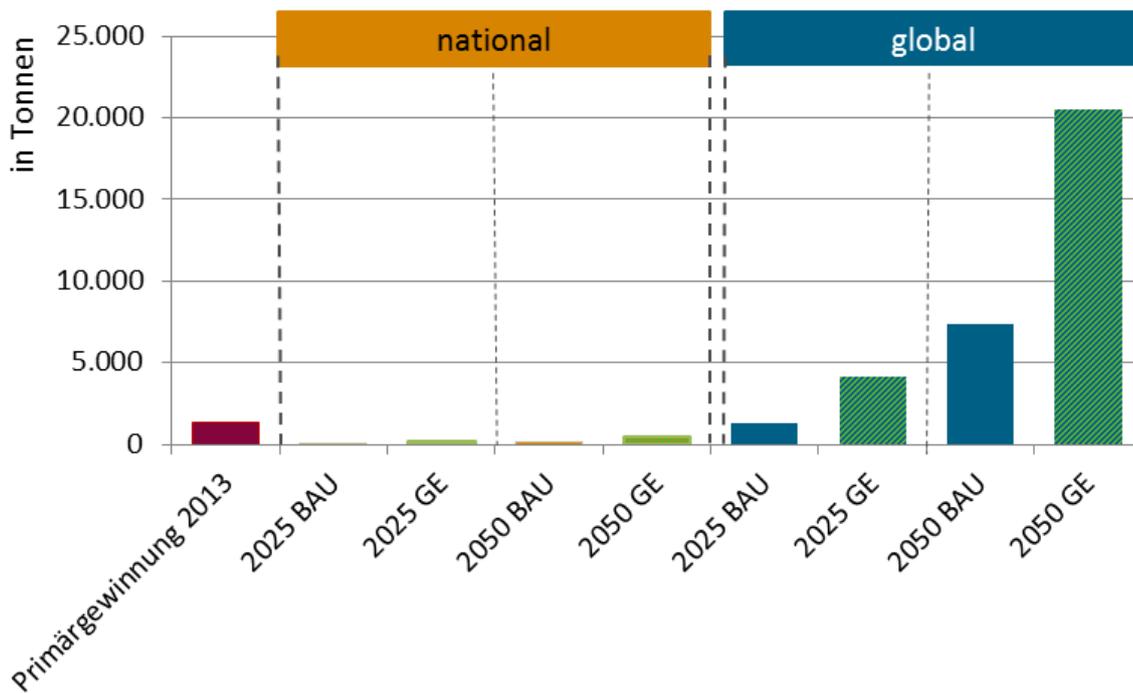
Tabelle 13: Absoluter Materialbedarf global (in t): Elektroantriebsmotoren

Material	BAU-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	37,5	544	3.834	2.900	18.252
Gallium	0,179	4,53	31,9	24,2	152
Kupfer	2.251	57.090	402.527	304.482	1.916.466
Neodym	64,3	2.039	14.376	10.874	68.445
Praseodym	21,4	544	3.834	2.900	18.252
Terbium	4,29	109	767	580	3.650

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Der Materialbedarf wird- aufbauend auf den Bedarf je Umwelttechnologie - für die 40 untersuchten Umwelttechnologien in Summe betrachtet. Am Beispiel des Dysprosiumbedarfs ist dies in folgender Abbildung visualisiert. Der Dysprosiumbedarf für alle 40 untersuchten Umwelttechnologien wird dabei der globalen Primärgewinnung 2013 gegenübergestellt. Aus dieser Abbildung 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.

Abbildung 13: Absoluter Dysprosiumbedarf [in Tonnen] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Quelle: Eigene Darstellung

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 73 % des Dysprosiumbedarfs innerhalb des Leitmarktes Nachhaltige Mobilität auf Elektromotoren für BEV, PHEV und Brennstoffzellenfahrzeuge (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 Dysprosiungehalts an den entsprechenden Neodym-Eisen-Bor-Magneten.

Die Übersicht über den globalen Rohstoffbedarf der untersuchten Rohstoffe in den 40 Umwelttechnologien wird in folgender Tabelle im Verhältnis zur globalen Primärförderung 2013 dargestellt.

Tabelle 14: Globaler Rohstoffbedarf (in alphabetischer Reihenfolge)

Rohstoff	Primärförderung	Business As Usual-Szenario		Green Economy-Szenario	
		2025	2050	2025	2050
Blei	0,01%	0,01 %	0,02%	0,01%	0,01%
Cer	11,5 %	16,4 %	24 %	15,5 %	15,0 %
Chrom	0,1 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %
Dysprosium	22,3 %	95 %	539 %	304 %	1505 %
Europium	0,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Gadolinium	0,0 %	0,4 %	0,4 %	0,4 %	0,4 %
Gallium	2,2 %	56 %	74 %	63 %	104 %
Germanium	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,2 %	1,0 %
Gold	2,1 %	4,0 %	5,3 %	3,3 %	3,6 %

Rohstoff	Primärförderung	Business As Usual-Szenario		Green Economy-Szenario	
Indium	23 %	25 %	23 %	32 %	23 %
Iridium	163 %	289 %	560 %	289 %	560 %
Kobalt	0,1 %	0,3 %	0,9 %	0,4 %	1,5 %
Kupfer	3,8 %	8,2 %	18,3 %	11,2 %	33 %
Lithium	1,8 %	51 %	346 %	247 %	1253 %
Magnesium	0,3 %	10,9 %	74 %	11,7 %	76 %
Mangan	0,6 %	2,3 %	7,1 %	4,8 %	21 %
Molybdän	0,1 %	0,1 %	0,8 %	0,3 %	1,3 %
Natürlicher Graphit	0,0 %	0,1 %	0,7 %	0,2 %	1,3 %
Neodym	4,7 %	29 %	150 %	81 %	393 %
Nickel	0,1 %	0,2 %	0,6 %	0,3 %	0,9 %
Palladium	258 %	438 %	780 %	423 %	675 %
Phosphat	0,0 %	0,001 %	0,002 %	0,001 %	0,002 %
Platin	87 %	158 %	236 %	153 %	194 %
Praseodym	3,1 %	21 %	121 %	67 %	336 %
Rhodium	197 %	341 %	639 %	331 %	544 %
Ruthenium	224 %	410 %	766 %	409 %	764 %
Selen	0,4 %	0,6 %	0,5 %	1,3 %	0,8 %
Silber	26 %	55 %	93 %	58 %	101 %
Silizium (Metall)	3,1 %	2,4 %	4,7 %	5,0 %	6,9 %
Tantal	0,03 %	0,04 %	0,06 %	0,03 %	0,04 %
Tellur	11,4 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Terbium	9,7 %	71 %	413 %	238 %	1180 %
Titan (Metall)	2,1 %	2,6 %	3,7 %	2,6 %	3,7 %
Titandioxid	0,0 %	2,3 %	17,3 %	12,5 %	79 %
Vanadium	0,00 %	0,00 %	0,02 %	0,01 %	0,04 %
Yttrium	0,1 %	2,6 %	2,7 %	2,6 %	2,7 %
Zink	0,02 %	0,03 %	0,08 %	0,03 %	0,10 %
Zinn	39 %	74 %	152 %	82 %	168 %
Zirkon	0,1 %	0,01 %	0,01 %	0,3 %	0,9 %

Anmerkung zur Tabelle: Im Rohstoffbedarf ist der Sekundärmaterialanteil nicht abgezogen.

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Bei folgenden Rohstoffen kann kein Rohstoffbedarf für die 40 untersuchten Umwelttechnologien identifiziert werden.

Tabelle 15: Rohstoffe ohne identifizierten Materialbedarf in den 40 untersuchten Umwelttechnologien

Antimon	Kadmium	Samarium
Arsen	Kokskohle	Scandium
Barium	Lanthan	Strontium
Beryllium	Lutetium	Thallium
Bor	Magnesit	Thulium
Erbium	Niob	Wismut (Bismut)
Flussspat	Osmium	Wolfram (Tungsten)
Hafnium	Quecksilber	Ytterbium
Holmium	Rhenium	

Quelle: Eigene Darstellung

3.3.4 Identifizierung der besonders relevanten Rohstoffe

Für die weitere Betrachtung wird auf 21 besonders relevante Rohstoffe fokussiert. Die Auswahl dieser Rohstoffe basiert auf dem Rohstoffbedarf im Green Economy-Szenario 2025 der 40 untersuchten Umwelttechnologien. Von 64 untersuchten Rohstoffen wurden 37 Rohstoffe identifiziert, die in den 40 ausgewählten UTs vorhanden sind. Einige dieser Rohstoffe sind allerdings in so geringem Maße vorhanden, dass für die Dimension strategische Bedeutung ein Abschneidekriterium angewandt wurde, um weniger relevante Rohstoffe zwecks Übersichtlichkeit zu streichen. Als Abschneidekriterium wurde ein Materialbedarf im Green Economy-Szenario der 40 UTs 2025 zur Primärförderung 2013 von 3 % gesetzt. Das bedeutet, bei 3 % der Primärförderung 2013 wurde abgeschnitten. In folgender Tabelle sind die Anteile des Rohstoffbedarfs im Green-Economy-Szenario 2025 zur Primärförderung 2013 der ausgewählten 21 Rohstoffe dargestellt.

Tabelle 16: Rohstoffbedarf aller Umwelttechnologien im Green Economy 2025 in Relation zur Gesamtproduktion 2013

Oberhalb des Abschneidekriteriums	
Rohstoff	Anteil
Palladium	423 %
Ruthenium	409 %
Rhodium	331 %
Dysprosium	304 %
Iridium	289 %
Lithium	247 %
Terbium	238 %
Platin	153 %
Zinn	81,6 %

Oberhalb des Abschneidekriteriums	
Neodym	81,0 %
Praseodym	66,7 %
Gallium	63,4 %
Silber	58,3 %
Indium	31,7 %
Cer	15,5 %
Titan als TiO ₂	12,5 %
Magnesium	11,7 %
Kupfer	11,2 %
Silizium (Metall)	5,01 %
Mangan	4,84 %
Gold	3,28 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung

4 Kritikalitätsanalyse zur Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien

Die Kritikalitätsanalyse zur Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien erfolgt in drei Schritten. Zunächst findet ein Ranking der untersuchten Rohstoffe nach drei Kritikalitätsbereichen statt. Dieses Ranking wird anschließend auf die Umwelttechnologien übertragen. Abschließend wird mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse die Robustheit der Ergebnisse validiert.

4.1 Rankingergebnisse der Rohstoffe

Das Ranking der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „Versorgungsrisiko“, „Ökologisches Schadenspotential“ und „Strategische Bedeutung“ sowie das Gesamtranking über alle drei Kritikalitätsbereiche wird analog der in Kapitel 2.3 dargestellten Methodik durchgeführt. Die Ergebnisse der einzelnen Rankings sowie des Gesamtrankings werden im Folgenden dargestellt und erläutert.

Das **Rankingergebnis des Versorgungsrisikos** ist in folgender Tabelle dargestellt. Indium liegt auf dem höchsten Rang und ist somit im Versorgungsrisiko als der kritischste Rohstoff eingestuft. Es folgen die schweren Seltenerdelemente Dysprosium und Terbium auf dem 2. Rang und Gallium auf Rang 4. Sieben Rohstoffe – Edelmetalle und Seltenerdelemente - belegen gemeinsam den 5. Rang (Iridium, Rhodium, Ruthenium, Palladium, Praseodym, Neodym, Cer). Am Ende des Ranking (Rang 17-21) – also die am wenigsten kritischen Rohstoffe im Versorgungsrisiko - liegen Magnesium, Mangan, Kupfer, metallisches Silizium und Titandioxid. Die Mehrfachbelegung eines Rangs ist der Methodik geschuldet, die zwar 13 verschiedene Indikatoren bewertet, dort aber nur vier Bewertungsstufen hat, sodass hier bei einigen Rohstoffen gleiche Ergebnisse erhalten werden.

Tabelle 17: Rohstoffranking Versorgungsrisiko

Rohstoff	Rang	Wert
Indium	1	0,669
Dysprosium	2	0,631
Terbium	2	0,631
Gallium	4	0,623
Iridium	5	0,577
Praseodym	5	0,577
Rhodium	5	0,577
Ruthenium	5	0,577
Cer	5	0,577
Neodym	5	0,577
Palladium	5	0,577
Zinn	12	0,546
Platin	13	0,523
Lithium	14	0,462
Silber	15	0,454
Gold	15	0,454
Magnesium	17	0,438
Mangan	18	0,408

Rohstoff	Rang	Wert
Kupfer	19	0,400
Silizium (Metall)	20	0,392
Titan als TiO ₂	21	0,385

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Das **Rankingergebnis des ökologischen Schadenspotentials** (siehe folgende Tabelle) weist vor allem in den oberen Rankings Verschiebungen im Vergleich zum Versorgungsrisiko auf. Die Edelmetalle Rhodium, Gold, Platin, Palladium, Iridium, Ruthenium und Silber belegen die hohen Ränge (Rang 1-7), aufgrund ihres hohen Förder- und Raffinationsaufwands. Auf den unteren Rängen befinden sich - ähnlich wie beim Versorgungsrisiko - die Rohstoffe Mangan, Magnesium und Titandioxid. Während beim Versorgungsrisiko Mehrfachrankings vorkamen, treten beim Ranking des ökologischen Schadenspotentials keine Mehrfachrankings auf (kein Rang, der mehrfach vergeben ist).

Tabelle 18: Rohstoffranking Ökologisches Schadenspotential

Rohstoff	Rang	Wert
Rhodium	1	80,13
Gold	2	76,36
Platin	3	72,79
Palladium	4	68,37
Iridium	5	66,18
Ruthenium	6	54,15
Silber	7	43,64
Terbium	8	25,01
Indium	9	21,87
Gallium	10	19,78
Silizium (Metall)	11	18,22
Kupfer	12	17,05
Dysprosium	13	13,01
Zinn	14	10,61
Praseodym	15	6,44
Neodym	16	6,06
Cer	17	4,81
Lithium	18	2,78
Titan als TiO ₂	19	2,73
Magnesium	20	1,65
Mangan	21	1,10

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Das **Rankingergebnis des dritten Kritikalitätsbereiches „Strategische Bedeutung“** zeigt die folgende Tabelle. Die Platingruppenmetalle Palladium, Ruthenium und Rhodium belegen die höchsten Ränge (1-3) gefolgt vom schweren Seltenerdelement Dysprosium. Die niedrigsten Ränge werden belegt von metallischem Silizium (Rang 19), Mangan (20) und Gold (21). Das Ranking der strategischen Bedeutung beruht auf den Szenarioergebnissen des globalen Green-Economy-Szenarios 2025 und der globalen Primärförderung 2013. Das am höchsten gerankte Palladium weist in dem Green-Economy-Szenario 2025 einen Bedarf der untersuchten Umwelttechnologien von 423 % im Vergleich zur Primärförderung 2013 auf, während Gold 3,3 % des geförderten Primärmaterials 2013 in 2025 benötigt.

Tabelle 19: Rohstoffranking Strategische Bedeutung

Rohstoff	Rang	Wert
Palladium	1	422,8 %
Ruthenium	2	409,1 %
Rhodium	3	331,2 %
Dysprosium	4	304,3 %
Iridium	5	289,0 %
Lithium	6	246,9 %
Terbium	7	237,8 %
Platin	8	153,0 %
Zinn	9	81,6 %
Neodym	10	81,0 %
Praseodym	11	66,7 %
Gallium	12	63,4 %
Silber	13	58,3 %
Indium	14	31,7 %
Cer	15	15,5 %
Titan als TiO ₂	16	12,5 %
Magnesium	17	11,7 %
Kupfer	18	11,2 %
Silizium (Metall)	19	5,0 %
Mangan	20	4,8 %
Gold	21	3,3 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Um ein **Gesamtranking** der Rohstoffe zu erreichen, wurden die Mittelwerte der Einzelrankings der oben beschriebenen Kritikalitätsbereiche gebildet. Das Gesamtranking ist in folgender Tabelle aufgelistet. Die Platingruppenmetalle Rhodium, Palladium, Ruthenium und Iridium belegen hohe Ränge (Rang 1-4), da diese in zwei Rankings im oberen Bereich zu finden sind. Es folgen auf den Rängen 5 und 6 die schweren Seltenerdelemente Terbium und Dysprosium. Rang 7 fällt gleichermaßen auf Indium und Platin. Die leichten Seltenerdelemente 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.

Tabelle 20: Gesamtranking Rohstoffe

Rohstoff	Rang	Wert
Rhodium	1	3,00
Palladium	2	3,33
Ruthenium	3	4,33
Iridium	4	5,00
Terbium	5	5,67
Dysprosium	6	6,33
Indium	7	8,00
Platin	7	8,00
Gallium	9	8,67
Praseodym	10	10,33
Neodym	10	10,33
Silber	12	11,67
Zinn	12	11,67
Cer	14	12,33
Gold	15	12,67
Lithium	15	12,67
Kupfer	17	16,33
Silizium (Metall)	18	16,67
Magnesium	19	18,00
Titan als TiO ₂	20	18,67
Mangan	21	19,67

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Dieses Gesamtranking ist die Basis für die Bewertung der Kritikalität der einzelnen UTs.

4.2 Rankingergebnisse der Umwelttechnologien

Die Methodik der Übertragung der Rohstoffergebnisse auf die Umwelttechnologien wurde in Kapitel 2.3 detailliert beschrieben. Die vier relevanten Größen für das Ranking der Umwelttechnologien sind „Höchstes Einzelranking in der Umwelttechnologie“, „Mittelwert über alle Rohstoffe und Kritikalitätsbereiche in der Umwelttechnologie“, „Anzahl relevanter Rohstoffe in der Umwelttechnologie“ und bei Grenzfällen wurde zusätzlich der „Massenbedarf des kritischsten Rohstoffs je Umwelttechnologie“ herangezogen. Zunächst wird an einem Beispiel dargestellt, wie die Übertragung konkret durchgeführt wird. Im Weiteren werden die 40 bearbeiteten Umwelttechnologien in Rankinggruppen beschrieben. Am Ende des Kapitels folgt die Übersicht der 20 ausgewählten Umwelttechnologien.

In Tabelle 21 sind als Beispiel für die UT „Grüne Rechenzentren“ die relevanten Rohstoffe zusammen mit den Kategorien und Zahlen dargestellt, welche für die Bildung eines UT-Rankings benötigt werden. In der ersten Spalte sind die enthaltenen Rohstoffe aufgeführt. Direkt daneben sind die Ränge der jeweiligen Rohstoffe in den drei Kritikalitätsdimensionen aufgeführt sowie der aggregierte Rang über den Mittelwert. Auf Basis dieser Spalte werden die drei hinteren Spalten generiert. In der ersten dieser Spalten findet sich der Mittelwert aller Rohstoffränge. Es folgt der höchste Rang über alle relevanten

Rohstoffe der UT. In der letzten Spalte ist die Anzahl der relevanten Rohstoffe, welche für die UT benötigt werden, notiert. Diese Tabelle bildet für alle UTs die Grundlage zur Rangbildung. Bei Grenzfällen wird allerdings auch der nicht in der Tabelle aufgeführte Massenbedarf der Rohstoffe als Kriterium angewandt.

Tabelle 21: Übertragung der Rohstoffsicht auf die Umwelttechnologien am Beispiel der UT „Grüne Rechenzentren“

Rohstoffe	Rang Versorgungsrisiko	Rang ökologisches Schadenspotential	Rang strategische Bedeutung	Rang Mittelwert Rohstoff	Mittelwert aller Rohstoffe in UT	Höchster Rohstoff-Rang in UT	Anzahl relevante Rohstoffe in UT
					9,7	2	9
Gallium	4	10	12	9			
Gold	15	2	21	15			
Kupfer	19	12	18	17			
Neodym	5	16	10	10			
Palladium	5	4	1	2			
Platin	13	3	8	7			
Ruthenium	5	6	2	3			
Silber	15	7	13	12			
Zinn	12	14	9	12			

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Das durchgeführte Ranking führt zu einer Top-Gruppe an 11 UTs, die in folgender Tabelle dargestellt ist. Diese 11 Umwelttechnologien besitzen sehr relevante Rohstoffe mit einem höchsten Rohstoffranking zwischen 1 und 7 und auch der Mittelwert der enthaltenen Rohstoffe liegt hoch mit 4,8 bis 11,6. Zudem enthalten diese Umwelttechnologien zwischen drei und neun relevante Rohstoffe. In diese Top-Gruppe fallen Umwelttechnologien mit Katalysatoren (Industrie-, Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren), Permanentmagneten (Hybrid-, Elektroantriebsmotoren, Hochleistungspermanentmagnete: übrige Anwendungen, Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft), Pedelects) sowie Solarzellen (Dünnschicht-Solarzellen, Tandemzellen), weiße LED und grüne Rechenzentren.

Tabelle 22: Ranking der Umwelttechnologien: Die Top 11 Umwelttechnologien

Umwelttechnologie	Höchstes Rohstoffranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
Industriekatalysatoren	1 (Rhodium)	4,8	6 relevante Rohstoffe
Fahrzeug-Abgas-Katalysator	1 (Rhodium)	6,0	4 relevante Rohstoffe
Grüne Rechenzentren	2 (Palladium)	9,7	9 relevante Rohstoffe
Hybridmotoren	5 (Terbium)	9,5	6 relevante Rohstoffe
Elektroantriebsmotoren	5 (Terbium)	9,5	6 relevante Rohstoffe

Umwelttechnologie	Höchstes Rohstoffranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen	5 (Terbium)	9,6	5 relevante Rohstoffe
Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft)	6 (Dysprosium)	11,0	3 relevante Rohstoffe
Pedelects	6 (Dysprosium)	13,2	6 relevante Rohstoffe
Dünnschicht-Solarzellen	7 (Indium)	11,3	3 relevante Rohstoffe
Tandemzellen	7 (Indium)	11,5	4 relevante Rohstoffe
weiße LED	7 (Indium + Platin)	11,6	8 relevante Rohstoffe

Quelle: Eigene Darstellung

Folgende weitere sechs Umwelttechnologien fallen ebenfalls in die Auswahl der 20 und sind in folgender Tabelle aufgelistet. Diese UTs enthalten relevante Rohstoffe mit einem Gesamtranking zwischen 12 und 15. Der Mittelwert eingesetzter Rohstoffe je UT liegt zwischen 12,0 und 18,3 bei einem Einsatz von einem bis fünf relevanten Rohstoffe(n) in den Umwelttechnologien. Speichertechnologien (Lithium-Ionen-Stromspeicher, Li-Ionen Batterien für PHEV) sowie Solarenergie (CSP-Technologie), Bleifreie Lote, RFID und die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode fallen in diese Gruppe.

Tabelle 23: Ranking der Umwelttechnologien: Weitere 6 Umwelttechnologien in der Betrachtung

Umwelttechnologie	Höchstes Rohstoffranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode	12 (Silber)	12,0	1 relevanter Rohstoff
Bleifreie Lote	12 (Silber + Zinn)	13,7	3 relevante Rohstoffe
RFID	12 (Silber)	15,7	3 relevante Rohstoffe
CSP-Technologie	12 (Silber)	17,8	5 relevante Rohstoffe
Lithium-Ionen-Stromspeicher	15 (Lithium)	17,7	3 relevante Rohstoffe
Li-Ionen Batterien für PHEV	15 (Lithium)	18,3	4 relevante Rohstoffe

Quelle: Eigene Darstellung

Mit den bereits genannten UTs sind bereits 17 Umwelttechnologien für die weitere Betrachtung ausgewählt.

Bei folgenden 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 (siehe folgende Tabelle). Dabei weist die Technologie „Speicherkraftwerke -

Pumpspeicherkraftwerke“ mit 672 t den geringsten Bedarf im Vergleich zu den anderen drei UTs auf und fällt somit aus der weiteren Betrachtung heraus.

Tabelle 24: Ranking der Umwelttechnologien: 4 Grenzfälle bei der Auswahl der 20 Umwelttechnologien

Umwelttechnologie	Höchstes Rohstoff-ranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
Synchron-Generatoren	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 103.603 t
Kraftwerke – GuD/Gas	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 100.837 t
Asynchron-Generatoren in WKA	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 25.824 t
Speicherkraftwerke - Pumpspeicherkraftwerk	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 672 t

Quelle: Eigene Darstellung

Somit fallen folgende 5 Umwelttechnologien (inklusive der Pumpspeicherkraftwerke) aufgrund des vorgenommenen Ranking aus der weiteren Betrachtung heraus:

Tabelle 25: Ranking der Umwelttechnologien: 5 Umwelttechnologien fallen aus der Betrachtung heraus

Umwelttechnologie	Höchstes Rohstoff-ranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
Speicherkraftwerke - Pumpspeicherkraftwerk	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff (672 t)
Si-Dickschichtzellen	17 (Kupfer)	17,5	2 relevante Rohstoffe
Karosserie	18 (Silizium)	19,5	2 relevante Rohstoffe
Phosphorrückgewinnung	19 (Magnesium)	19,0	1 relevanter Rohstoff
Membrantechnik	20 (TiO2)	20,0	1 relevanter Rohstoff

Quelle: Eigene Darstellung

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 (z. B. Precision Farming oder Aerogele). Bei anderen Umwelttechnologien konnte der Einsatz der relevanten Rohstoffe nicht in Erfahrung gebracht werden (z. B. OLED) oder beläuft sich auf so geringen Mengen, dass keine Rohstoffrelevanz gegeben ist (z. B. Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke). Zum anderen fallen in diese Gruppe Umwelttechnologien, die noch nicht auf dem Markt sind und somit keine Substitutionspotentiale aufweisen (z. B. HTS-Generatoren).

Tabelle 26: 15 Umwelttechnologien ohne identifizierte Rohstoffrelevanz

Umwelttechnologie	Kommentar
Kompressoren	Keine Angaben möglich
Aerogele	Rohstoffbedarfs absolut gering; Entwicklung nicht absehbar
Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Rohstoffbedarf absolut gering
Celitement	Kein betrachteter Rohstoff ent- halten
OLED	Einsatz der relevanten Rohstoffe nicht bekannt
Automatische Stofftrennverfahren	Keine Angaben möglich
Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke	Rohstoffbedarf absolut gering
Leichtbau - Titan und Sc-Airframe	Rohstoffbedarf absolut gering
Nanobeschichtung von Oberflächen	Rohstoffbedarf absolut gering
Precision Farming	Rohstoffbedarfs absolut gering; Entwicklung nicht absehbar
Me-Schlackenaufbereitung	Spezifischer Materialbedarf nicht quantifizierbar
Reluktanzgeneratoren	Rohstoffbedarf absolut gering
HTS-Generatoren	Noch nicht auf dem Markt
Dezentrale Wasseraufbereitung	Spezifischer Materialbedarf nicht quantifizierbar
Wassereffizienztechnologien	Rohstoffbedarf absolut gering

Quelle: Eigene Darstellung

Abschließend sind die 20 ausgewählten Umwelttechnologien in der folgenden Tabelle aufgelistet. Diese 20 UTs stehen im weiteren Bericht hinsichtlich ihrer Substitutionspotentiale im Fokus.

Tabelle 27: Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien

Umwelttechnologie
Industriekatalysatoren
Fahrzeug-Abgas-Katalysator
Grüne Rechenzentren
Hybridmotoren
Elektroantriebsmotoren
Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen
Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft)
Pedelecs
Dünnschicht-Solarzellen
Tandemzellen

Umwelttechnologie
weiße LED
CSP-Technologie
Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode
RFID
Bleifreie Lote
Lithium-Ionen-Stromspeicher
Li-Ionen Batterien für PHEV
Synchron-Generatoren
Kraftwerke – GuD/Gas
Asynchron-Generatoren in WKA

Quelle: Eigene Darstellung

4.3 Sensitivitätsanalyse der Rankingergebnisse

Dieses Kapitel untersucht die Sensitivität des Rohstoffrankings und der Auswahl der Umwelttechnologien. Im Fokus steht das Versorgungsrisiko. Damit soll festgestellt werden, wie robust die gewonnenen Ergebnisse aus Kapitel 4.1 und 4.2 sind. Für die prospektive Sensitivitätsbetrachtung werden vier Szenarien angenommen: „Restriktive Handelspolitiken“, „Globale Marktwachstumssteigerung“, „Höhere Recyclingraten“ und „Geopolitische Risiken“. Diese Szenarien bilden mögliche Entwicklungen ab; ihre Grundannahmen sind in Tabelle 28 dargestellt. Während die ersten drei Szenarien sich jeweils auf ein Kriterium des VDI-Kataloges auswirken, ist das vierte Szenario „Geopolitische Risiken“ mit fünf Kriterien übergreifender.

Tabelle 28: Szenarien der Dimension Versorgungsrisiko

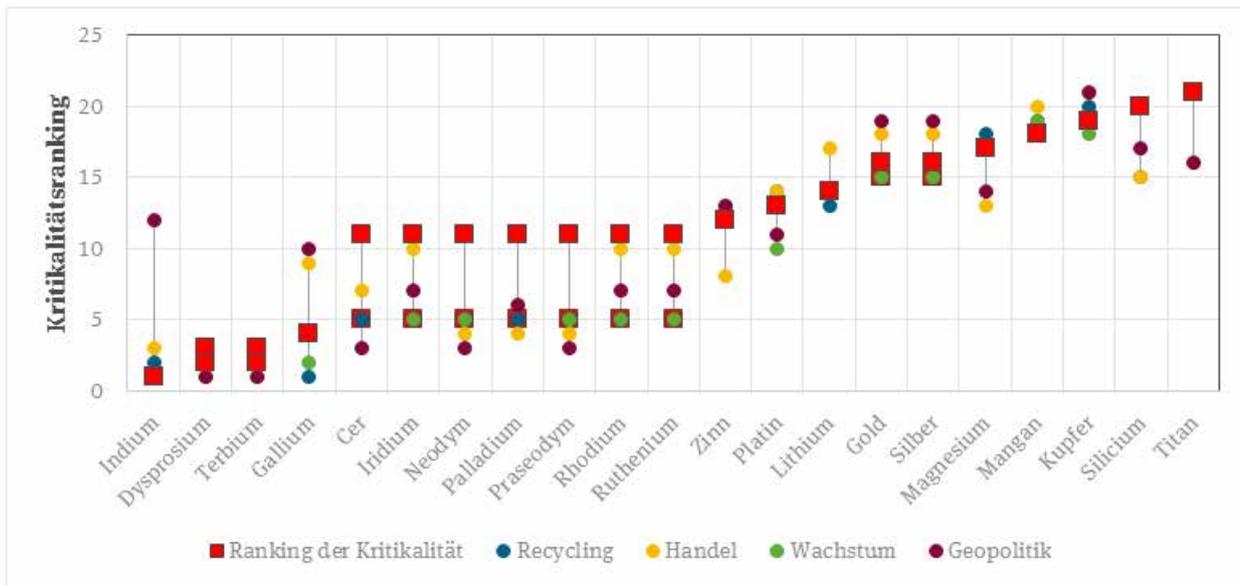
	Restriktive Handelspolitiken	Globale Marktwachstumssteigerung	Höhere - Recyclingraten	Geopolitische Risiken
Grundannahmen	Rohstoffwandel wird durch restriktive Handelsbedingungen erschwert -Handelsembargo -Marktkonzentration -Rohstoffkartelle	Weltmarkt für Rohstoffe wächst stärker als im Trend -Nachfragesteigerung -Hohes Weltwirtschaftswachstum -Schnelles Wachstum von Zukunftstechnologien	Anstieg der Recyclingraten infolge politischer Rahmenbedingungen und technologisch, logistischer Fortschritte -Recyclingrechte Konstruktion -Retro-Logistik -Demontage -Recyclingtechnologien -Globale Recyclinginfrastrukturen	Geopolitische und regulatorische Risiken nehmen zu

	Restriktive Handelspolitiken	Globale Marktwachstumssteigerung	Höhere - Recyclingraten	Geopolitische Risiken
Kriterien	-Regulatorische Situation für Rohstoffprojekte	-Globaler Nachfrageimpuls	-Recycling	-Globaler Nachfrageimpuls -Regulatorische Situation für Rohstoffprojekte -Geopolitische Risiken der Weltproduktion -Länderkonzentration der Produktion -Länderkonzentration der Reserven

Quelle: Eigene Darstellung

Die oben beschriebenen Szenarien wurden in zwei Ansätzen untersucht. Zum einen wurde die Bewertung variiert, zum anderen wurde die Gewichtung der Kriterien geändert. Im ersten Ansatz gingen die entsprechenden Kriterien mit einem Gewichtungsfaktor in die Berechnung des Versorgungsrisikos ein; für den zweiten Ansatz wurden die Kritikalitätswerte herauf- oder herabgestuft. Die Ergebnisse der Analyse sind in den folgenden Abbildungen illustriert.

Abbildung 14: Spannbreite des Ranking in den Szenarien bei veränderter Gewichtung (Dimension Versorgungsrisiko)



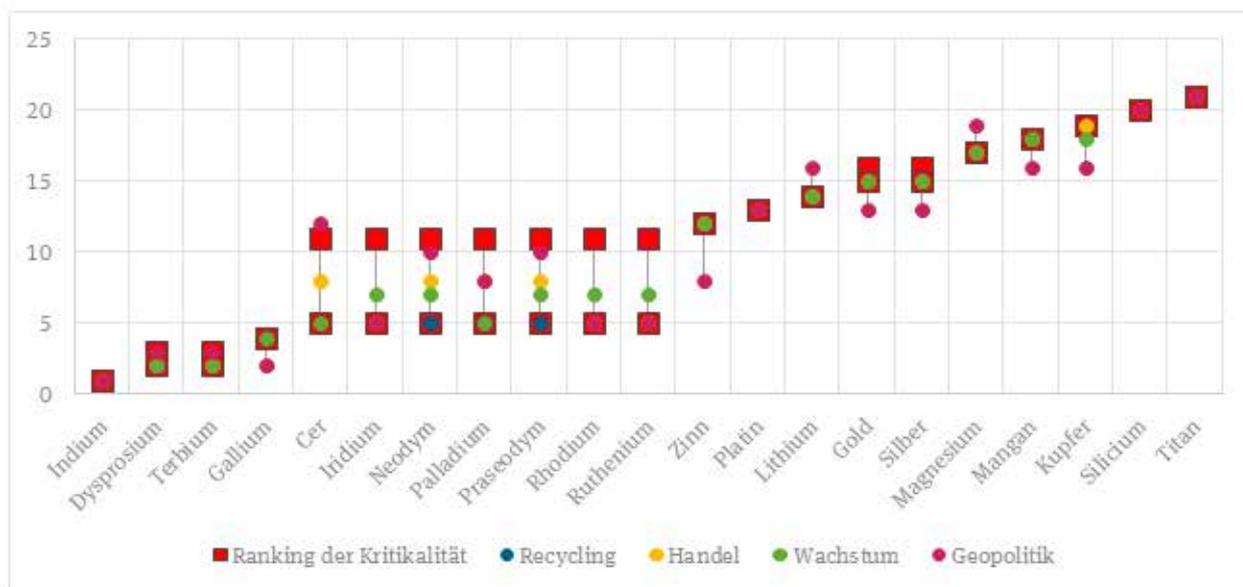
Quelle: Eigene Darstellung

Während sich die Rangfolge der Kritikalitätseinschätzung nach einer Gewichtung der entsprechenden Kriterien in den Szenarien ändert, bleibt die grundsätzliche Kritikalitätseinschätzung der Rohstoffe bestehen (siehe Abbildung 15). Ein großer Teil der Verschiebungen im Ranking ist darauf zurückzuführen, dass die Stoffe in ihrer Kritikalität sehr dicht zusammen liegen. Die absoluten Kritikalitätswerte-

te ändern sich bis auf Ergebniswerte im Szenario „Geopolitische Risiken“ in keinem Fall um mehr als 0,1.

Bei einer variierten Bewertung der Kritikalitätskriterien entsprechend der Szenarien ändert sich die Reihenfolge der Rohstoffe im Kritikalitätsranking vor allem im Szenario „Geopolitische Risiken“, weniger in den anderen Szenarien (siehe Abbildung 16). Dies liegt daran, dass im Fall zunehmender geopolitischer und regulatorischer Risiken vier von dreizehn Kriterien das Versorgungsrisiko erhöhen. Außerdem wird eine über den Trend hinausgehende globale Nachfragesteigerung angenommen, so dass das Szenario eine extreme Entwicklung gegenüber dem Basisfall widerspiegelt. Insgesamt wird deutlich, dass Verschiebungen im Ranking der Rohstoffe bei veränderter Bewertung gering ausfallen.

Abbildung 15: Spannweite des Rankings in den Szenarien bei veränderter Bewertung (Dimension Versorgungsrisiko)



Quelle: Eigene Darstellung

Zusätzlich wurde das ökologische Schadenspotential einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Es wird bestimmt aus dem Schadenspotential der menschlichen Gesundheit sowie aus dem Schadenspotential auf Ebene der Ökosysteme. In der Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss einer unterschiedlichen Gewichtung dieser beiden Aspekte untersucht (gleichgewichtet, 70/30 und 30/70). Dabei änderte sich mit einer veränderten Gewichtung des ökologischen Schadenspotentials nur in vier Fällen das Ranking eines Stoffes und dann auch nur um jeweils einen Rang.

Somit zeigt sich, dass das Ranking der Rohstoffe sehr robust ist. 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 Rohstoffe bleibt bestehen. Dies gilt auch für die Auswahl der Umwelttechnologien. Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die Auswahl der Umwelttechnologien auch unter Annahme veränderter Szenarioverläufe robust bleibt.

5 Substitutionsoptionen der 20 prioritären Umwelttechnologien

In diesem Kapitel werden die Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen kurz beschrieben. In Arbeitsbericht 4 sind die Umwelttechnologien mit ihren Substitutionsalternativen detailliert dargestellt. Ebenso werden mögliche Effizienzverluste, Restriktionen und ökologische Vor- und Nachteile analysiert.

5.1 Solartechnologien

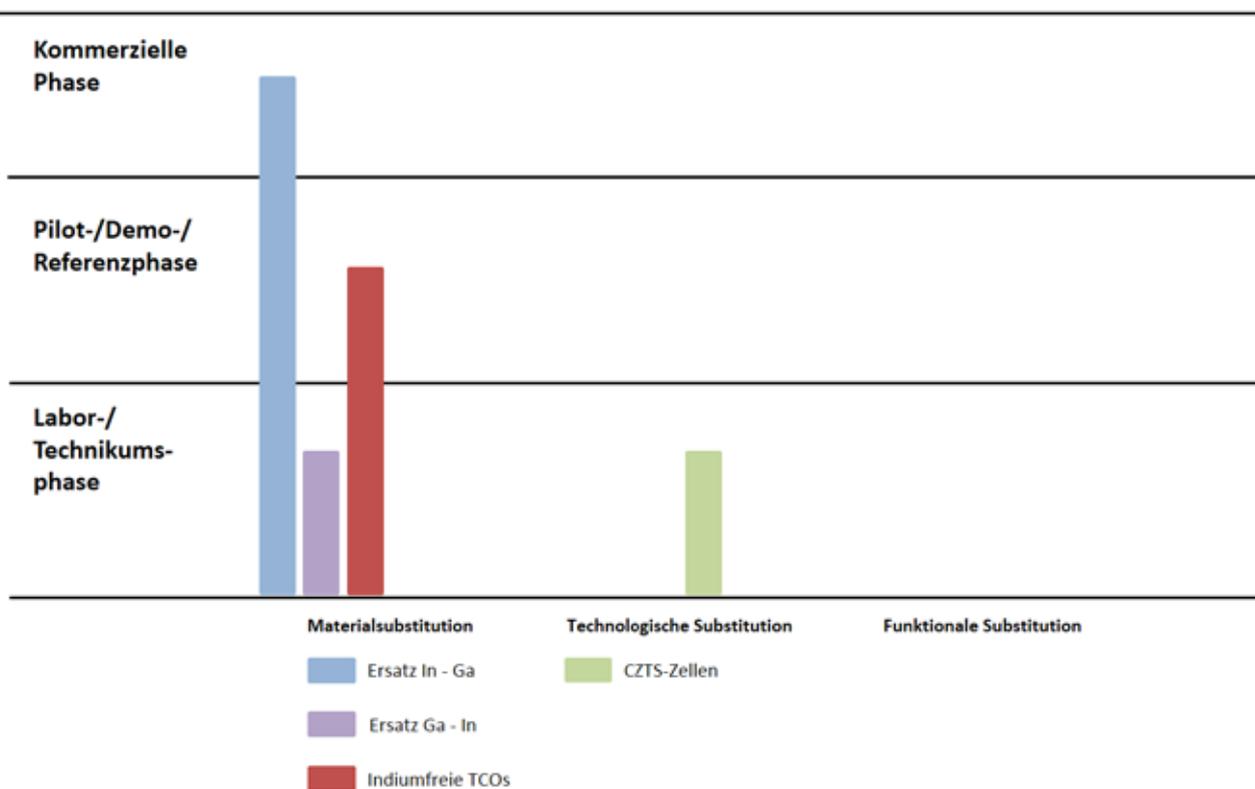
Unter den Solartechnologien wurden Dünnschicht-Photovoltaik, Concentrated-Solar-Power-Anlagen und Tandemzellen in konzentrierenden Photovoltaikanlagen betrachtet.

5.1.1 Dünnschicht-PV

Dünnschichtzellen bestehen aus photoaktiven Halbleitern, die als dünne Schichten auf ein Trägermaterial aufgedampft werden. Sie gibt es in verschiedenen Ausführungen, je nach Substrat und Leitermaterialien, darunter CIGS (bzw. CIS)-Zellen, die als Halbleiter Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selen-Verbindungen einsetzen (je nach Zelltyp kann S für Schwefel oder Selen stehen). Sie benötigen die kritischen Rohstoffe Indium und Gallium. Indium wird außerdem in Form von Indiumzinnoxid (ITO, indium tin oxide) als transparentes leitfähiges Oxid (transparent conducting oxide TCO) verwendet. ITO ist ein halbleitender, im sichtbaren Licht weitgehend transparenter Stoff. Es ist ein Mischoxid, üblicherweise aus 90 % Indium(III)-oxid (In_2O_3) und 10 % Zinn(IV)-oxid (SnO_2). TCOs, die ITO nutzen, werden in verschiedenen Solarzelltypen eingesetzt. Bei a-Si-Zellen liegt der spezifische Materialbedarf für Indium bei 4 t/GWp, für Cd-Te-Zellen bei 15,5 t/GWp.

Die folgende Abbildung zeigt die Technologiereife der Substitutionsoptionen für CIGS- bzw. CIS-Dünnschicht-Solarzellen.

Abbildung 16: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Dünnschicht-Solarzellen



Quelle: Eigene Darstellung

Auf **Materialebene** ist der Ersatz von Indium partiell durch Gallium möglich. Indium wird wegen seiner hohen Kritikalität partiell durch Gallium ersetzt, das allerdings ebenfalls zu den kritischen Rohstoffen zählt. Gallium bietet daher keine wirkliche Verringerung der Kritikalität, sie würde nur verlagert. An Stelle von ITO wäre zukünftig der Einsatz von Fluor- oder Aluminium-dotiertem Zinnoxid (FTO/ATO) auf Polymerfolien möglich. Ein anderer Ansatz zielt auf den Einsatz von Silber-Nanodrähten. TCOs auf Basis von FTO oder ATO kommen in anderen Technologielinien der Photovoltaik und anderen Technologien teilweise schon zum Einsatz. Sie weisen gegenüber Indium-basierten TCOs jedoch noch Wirkungsgradverluste auf. Forschungsanstrengungen zielen auf die zukünftige Realisierung von Wirkungsgradsteigerungen durch den Einsatz indiumfreier TCOs in Solarzellen [INREP 2016]. Es wird erwartet, dass sich indiumfreie TCOs auch in den verbleibenden Technologielinien der Photovoltaik mittelfristig durchsetzen.

In **technologischer Hinsicht** kommen alternative Halbleitermaterialien als Substitutionsoption in Betracht. Neben CIGS-Zellen sind auch Dünnschicht-Solarzellen mit Halbleitern aus amorphem Silizium (a-Si) und Cadmiumtellurid (CdTe) auf dem Markt. Amorphe Siliziumzellen benötigen Indium lediglich für die ITO-Schicht auf den Zellen. Die a-Si-Dünnschichtphotovoltaik kommt daher mit 4 t/GWp Indium für ITO aus. Gallium wird nicht eingesetzt. Kritische Stoffe sind daher nicht oder im Fall von Indium in deutlich geringerem Maße als bei CIS/CIGS-Dünnschichtzellen enthalten. Eine weitere Alternative, die ohne Indium und Gallium auskommt, ist die CdTe-Technologie. Diese ist momentan **marktführend** unter den Dünnschichttechnologien. Cadmiumtellurid-Solarzellen sind allerdings ökologisch problematisch, da mit Cadmium ein toxisches Element eingesetzt wird, das nicht in die Natur oder in Lebensmittel gelangen darf. In Solarzellen eingesetzt liegt das Schwermetall in Form der chemisch stabilen Cadmiumtellurid-Verbindung vor. Ein konsequentes Recycling mit geschlossenen Stoffkreisläufen ist unabdingbar, um zu verhindern, dass cadmiumhaltige Photovoltaik-Module unsachgemäß entsorgt und in den lokalen Abfallstrom gelangen.

Als indiumfreies Absorbermaterial kommt Kupfer-Zink-Zinnsulfid (CZTS - copper, zinc, tin, sulfur) als Substitutionsalternative in Frage. Die Technologie befindet sich im Laborstadium, ein möglicher Einsatz ist abhängig von Wirkungsgradsteigerungen (Laborwirkungsgrad heute: 12,6 %) und eher längerfristig zu erwarten. Auch der Einsatz von Perowskiten als Halbleitermaterial (möglicherweise in einer Tandemstruktur) ist längerfristig denkbar.

Auf **funktionaler Ebene** existiert zwar mit der auf Silicium-Wafern basierte Dickschichttechnologie theoretisch eine Alternative, unter Marktgesichtspunkten stellt sie aber keine wirkliche Substitutionsoption dar, da sie in unterschiedlichen Märkten eingesetzt werden, die sich nur wenig überlappen. Daneben befinden sich neue Photovoltaiktechnologien in Entwicklung. Zu ihnen gehören sehr unterschiedliche neue Technologien, die auf dem Markt noch keine so große Rolle spielen, darunter nanokristalline Silicium- (nc-Si), Farbstoff- (DSC), Polymer- (PSC) bzw. Organische- (OPV), Konzentrator- (CSC), Multijunction-, und Quantenpunkt- (QSC) Solarzellen. Sie stellen bisher keine Alternative zur Dünnschicht-PV dar, da sich die Anwendungsbereiche deutlich unterscheiden.

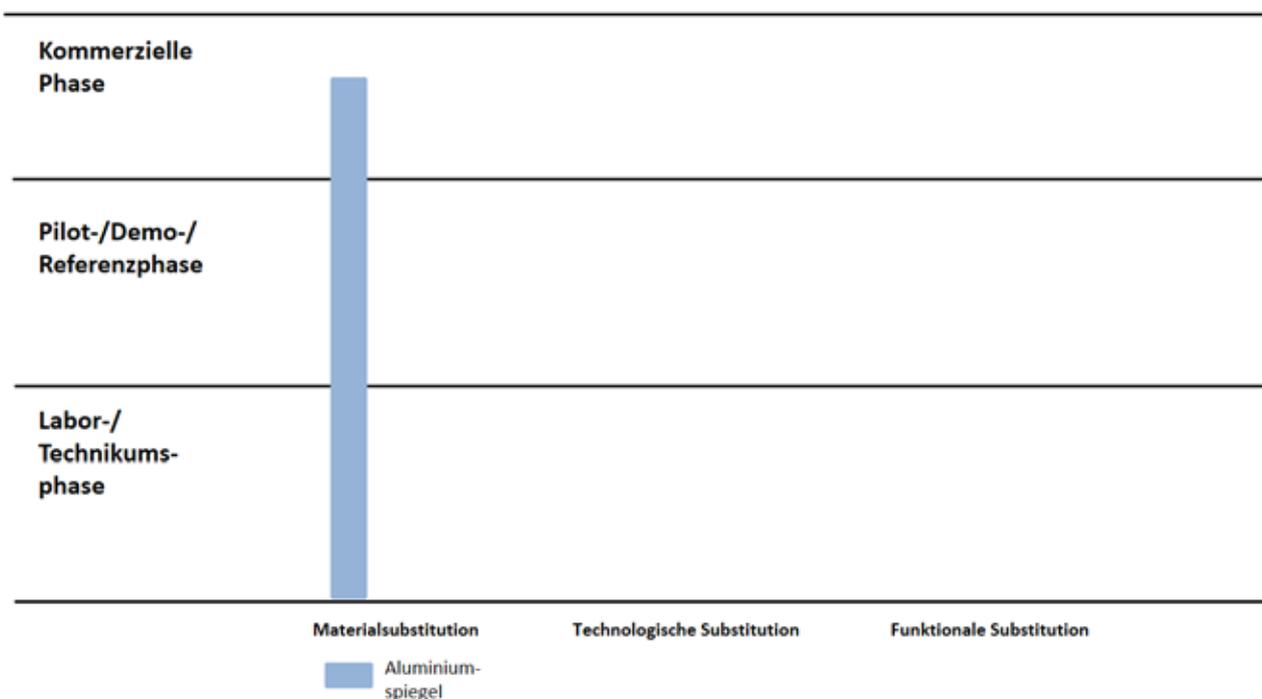
Fazit: Bisher bestehen keine ausgereiften Möglichkeiten Indium und Gallium auf Materialebene zu substituieren. Dies gilt sowohl für ITO, wo Indium als Leitmaterial eingesetzt wird, als auch für indiumhaltige Absorber. Kommerziell verfügbare indiumfreie TCOs weisen Wirkungsgradverluste auf. CZTS, das einen möglichen alternativen Halbleiter darstellt, befindet sich noch in der Entwicklung.

5.1.2 Tandemzellen

Concentrated-Solar-Power- (CSP) Kraftwerke nutzen Sonnenenergie zur Stromerzeugung. Anders als photovoltaische Anlagen basieren sie nicht auf dem photoelektrischen Effekt. Stattdessen konzentrieren Spiegelsysteme die Sonnenstrahlen auf einen Receiver, in dem ein zirkulierendes Wärmemedium erhitzt wird. Dieses Wärmemedium erzeugt dann entweder direkt oder über einen Wärmetauscher einen Dampfkreislauf, der Generatoren zur Stromerzeugung antreibt. CSP-Kraftwerke können unter-

schiedliche Spiegelsysteme und Wärmemedien nutzen. Neben Parabolrinnen gibt es drei weitere CSP-Technologien: Fresnelkollektoren, Stirling-Dish-Systeme und Turmkraftwerke. Sie unterscheiden sich vor allem in der Gestaltung der Solarkollektoren, sind aber nicht substituiv. Der prinzipielle Aufbau ähnelt dem der Parabolrinnenkollektoren. Der Unterschied ist, dass die Spiegel in den realisierten linearen Fresnel-Kollektoren aus flachen Spiegelstreifen hergestellt werden, die eine geringe Krümmung durch mechanische Biegung erhalten. Stirling-Dish-Systeme bestehen aus einem parabolisch geformten Konzentrator (ähnlich einer Satellitenschüssel), die die Solarstrahlung auf einen Kollektor im Brennpunkt der Schüssel konzentrieren. Unter den Concentrated-Solar-Power-Anlagen (CSP), die die Solarstrahlung mittels Spiegelsysteme zur Stromerzeugung bündeln, sind **Parabolrinnen-Kraftwerke** am weitesten verbreitet. 90 % der installierten Leistung entfällt heute auf diese Technologie [IEA 2014]. Der Großteil der kritischen Rohstoffe (Magnesium, Titan und Mangan) wird in den Legierungen der hochtemperaturbelasteten Komponenten eingesetzt. Daneben wird Kupfer zur Stromleitung und Silber in den Spiegeln verwendet.

Abbildung 17: Technologiereife der Substitutionsoptionen für CSP-Anlagen



Quelle: Eigene Darstellung

Silber wird für die Beschichtung der Reflektoren von Parabolrinnen-Kraftwerken benötigt. Pro GW Leistung beträgt der Silberbedarf 13 t (für eine Anlage in Spanien gemäß [Pihl et al. 2012]). Die Dicke der Silberschicht beträgt ca. 100 nm. Mittel- bis langfristig könnten die Schichten noch dünner werden, allerdings sind die Schichten mit 100 nm bereits sehr dünn, so dass das Potential gering ist [DERA 2016]. Eine **Materialsubstitution** des Silbers in den Spiegelsystemen durch eloxiertes Aluminium ist möglich, geht jedoch mit Wirkungsgradverlusten einher und wird bis dato praktisch nicht verfolgt. Für Mangan existiert keine befriedigende Substitutionsmöglichkeit [EU 2016]. Die Substitution von Magnesium ist anspruchsvoll und führt zu einer Verschlechterung der Korrosionseigenschaften [CRM InnoNet 2015]. **Titan** wird im Absorber verwendet. Parabolrinnen-Systeme verwenden Receiverrohre, die aus einer externen Glasröhre und einem inneren Metallrohr zusammengesetzt sind. Das Metallrohr ist mit Titandioxid beschichtet [EU 2016]. Die Menge an Titan ist gering, so dass ihre Substitution kaum Bedeutung hat.

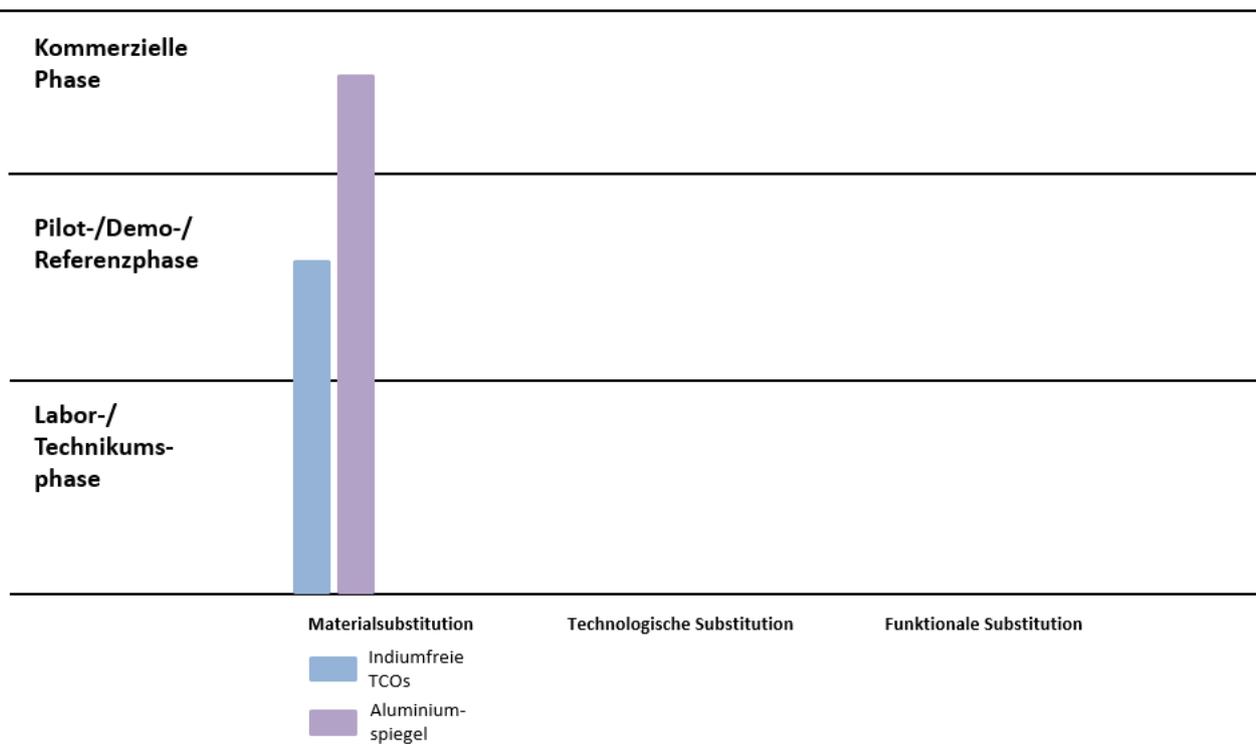
Technologisch und funktional gibt es keine Substitutionsalternativen für solarthermische Kraftwerke.

Fazit: Silber lässt sich bis dato nicht ohne Wirkungsverluste substituieren. Um Wirkungsgradverluste auszugleichen, müssten größere Spiegelflächen eingesetzt werden, was wieder einen höheren Materialverbrauch nach sich ziehen würde. Die Legierungselemente in den hochtemperaturbelasteten Komponenten lassen sich nur sehr eingeschränkt substituieren, da der Wirkungsgrad einer CSP-Anlage auch vom Temperaturniveau abhängt.

5.1.3 Concentrated Solar Power (CSP)

Tandem-Solarzellen enthalten mehrere Schichten transparenter Halbleiter, die aufgrund ihrer Dotierung selektiv verschiedene Bandbreiten der Solarstrahlung nutzen. Dies ermöglicht deutlich höhere Wirkungsgrade. Verwendet werden Linsen- oder Spiegelsysteme, um die einfallende zu konzentrieren und so die hohen Wirkungsgrade der Tandemzellen auf einer geringen Fläche auszunutzen. In Tandemzellen kommen verschiedene Kombinationen von Halbleitern zum Einsatz, die auch in der Dünnschicht-Photovoltaik Verwendung finden. Der Quasi-Industriestandard ist eine Dreifachsolarzelle aus GaInP/GaInAs/Ge [Fraunhofer ISE 2015]; aber auch Silizium-basierte Halbleiter können eingesetzt werden. Während letzteres als nicht sehr kritisch gesehen wird, sondern im Gegenteil eher eine langfristige Substitutionsmöglichkeit für andere Halbleitertypen darstellt, sind Indium und Gallium substituierensrelevante Rohstoffe. Hinzu kommt Silber, das für die Beschichtung der Spiegel verwendet wird.

Abbildung 18: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Tandemzellen in der hochkonzentrierenden PV



Quelle: Eigene Darstellung

Eine **Materialalternative** für indiumhaltige TCOs sind Polymerfolien mit transparenter, leitfähiger Beschichtung auf Basis von Fluor- oder Aluminium-dotiertem Zinndioxid (FTO/ATO). Heute kommerziell verfügbare indiumfreie TCOs weisen beim Einsatz in der Photovoltaik noch Wirkungsgradverluste auf. Forschungsprojekte zielen darauf, diese Verluste zu reduzieren oder gar höhere Wirkungsgrade

zu realisieren, so dass eine breitere Marktdurchdringung auch für CPV-Anlagen mittel- bis langfristig erwartet wird. Eine Materialsubstitution des Silbers in den Spiegelsystemen ist durch eloxiertes Aluminium möglich. Dies geht jedoch mit Wirkungsgradverlusten einher.

Im Hinblick auf eine **technologische Substitution** ist der Einsatz anderer Halbleiterkombinationen denkbar, insbesondere Silizium- und Perowskit-basierte Halbleiter. Diese sind jedoch mit erheblichen Wirkungsgradverlusten verbunden. Der Einsatz Silizium-basierter Halbleiter an Stelle der GaInP/GaInAs/Ge-Referenzzelle würde mit deutlichen Verlusten einhergehen. Der sich ergebende Wirkungsgrad hängt neben dem Halbleitermaterial auch von der Konzentration und der Auslegung der Zelle ab, so dass er hier nicht genau quantifiziert werden kann. Auch die Kombination einer Siliziumzelle mit einem Perowskit-Halbleiter bringt (gemessen an den Wirkungsgradrekorden anderer Tandemzellen von 46 %) nur eine geringe Steigerung des Wirkungsgrades; dafür ist dieser Zelltyp vergleichsweise sehr günstig. Ihr Anwendungsgebiet liegt eher in der konventionellen oder niedrigkonzentrierenden Photovoltaik, daher stellen sie keine direkte Substitutionsoption dar.

Als **funktionale Substitution** könnten in einigen eng begrenzten Anwendungsbereichen solarthermische Kraftwerke oder kristalline Siliziumsolarzellen eingesetzt werden. Sie bieten aber keine weitergehende Substitutionsperspektive.

Fazit: Die Substitution der kritischen Rohstoffe in hochkonzentrierenden PV-Anlagen ist schwierig, da der Wirkungsgrad herabgesetzt wird. Auch der Einsatz indiumfreier TCOs ist erst zu erwarten, wenn die einhergehenden Wirkungsgradverluste stark reduziert worden sind, beziehungsweise Wirkungsgradsteigerungen erzielt werden können.

5.2 Speichertechnologien

In die Technologiegruppe der Speichertechnologien fallen die Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge und die Lithium-Ionen-Stromspeicher für stationäre Anwendung sowie die Lithium-Ionen-Batterien für Pedelects.

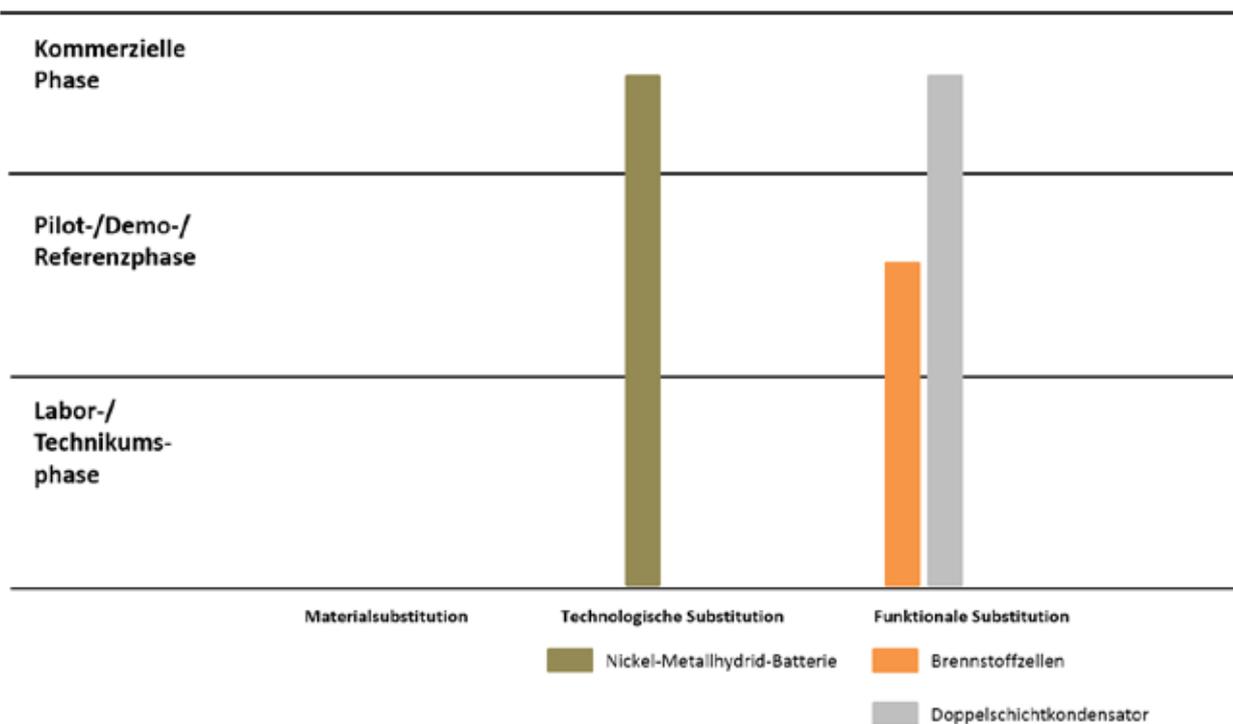
Informationsbox zu Li-Ionen-Batterien und Kobalt

Das Projekt SubSKrit lief über drei Jahre seit 2014. Zur Zeit der Analyse der Entwicklung der Li-Ionen-Batterien und der Szenarienbetrachtung war noch nicht absehbar, dass sich die NMC-Batterien v. a. im Fahrzeugbereich durchsetzen würden. Nach heutigem Stand müssten die Lithium-Ionen-Batterien in 2025 und 2050 überwiegend NMC-Batterietypen sein. Dieser Batterietyp setzt eine Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Verbindung als Kathode ein. Dadurch würde in den Szenarien der Kobaltbedarf deutlich steigen und Kobalt unter die relevanten Rohstoffe fallen.

5.2.1 Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge

In Elektrofahrzeugen kommen nahezu ausschließlich Lithium-Ionen-Akkus zum Einsatz. Li-Ionen-Akkus bestehen aus Anode und Kathode, die in einen Elektrolyten eingetaucht und durch eine Polymermembran getrennt sind. Für den Einsatz in Li-Ionen-Batterien kommt eine Vielzahl an Kombinationen verschiedener Anoden, Kathoden und Elektrolytmaterialien in Betracht, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben. Das aktive Material der positiven Elektrode (Anode) eines gängigen Li-Ionen-Akkus besteht aus Graphit. Die negative Elektrode (Kathode) enthält Lithium-Metalloxid-Verbindungen, wie Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC), Lithium-Eisen-Phosphat (LFP), Lithium-Nickel-Aluminium-Kobaltoxid (NCA) oder Lithium-Mangan-Oxid (LMO). NMC-Batterien weisen sehr hohe Energiedichten auf, sodass diese zukünftig an Bedeutung gewinnen, während die der LFP-Batterien zurückgeht. Zu den relevanten Rohstoffen gehören Lithium, Kobalt, Graphit und Nickel. Lithium ist das zentrale Element für Lithium-Ionen-Batterien. Es steht hier im Fokus.

Abbildung 19: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen



Quelle: Eigene Darstellung

Auf **Materialebene** existieren bisher keine Alternativen für Lithium. **Lithium** wird als aktives Material in der Elektrode und im Elektrolyt eingesetzt. Lithium besitzt das negativste Normalpotential aller Elemente, sodass sehr hohe Zellspannungen und damit besonders hohe massespezifische Energiedichten erreicht werden können und ist deshalb als Kathodenmaterial besonders geeignet [DERA 2016]. Es geht von einem Lithiumgehalt von 180 g/kWh aus, der durch zunehmende Ressourceneffizienz mittelfristig auf 150 g/kWh sinken wird (bezogen auf die LiCoO-Zellchemie).

Als **technologische Alternative** kommen Nickelmetallhydrid-(NiMH)-Akkus zum Einsatz. Ihr Marktanteil liegt heute bei 30 %. Forschungsanstrengungen zielen auf die Erhöhung der Energiedichte von NiMH-Batterien. Derzeit werden auch andere Optionen zur elektrochemischen Energiespeicherung untersucht, beispielsweise Aluminium-Ionen- oder Natrium-Ionen-Akkus. Für diese ist ein Einsatz noch nicht absehbar.

In Bezug auf den **funktionalen Ersatz** kommen grundsätzlich Doppelschichtkondensatoren und Brennstoffzellen in Betracht. Doppelschichtkondensatoren weisen im Vergleich zu Batterien sehr gute Leistungsdichten und Zyklenwirkungsgrade auf. Jedoch beträgt ihre Energiedichte nur etwa 1/10 der von Batterien; damit kommen sie kurzfristig nur für reine Hybrid-Anwendungen in Frage. Um wettbewerbsfähig zu sein, müsste ihr Preis gesenkt werden [Burke 2015]. Die Doppelschichtkondensatoren werden eher als Teil, denn als vollständige Substitutionsmöglichkeit gesehen. Indem sie als Rekuperatoren Bremsenergie zwischenspeichern, kann die Kapazität der Batterie potentiell gesenkt werden. Als Alternative zu Akkumulatoren kommen Brennstoffzellen-Systeme in Frage, die elektrische Energie mit Hilfe von Wasserstoff oder Methanol aus chemischer Energie bereitstellen.

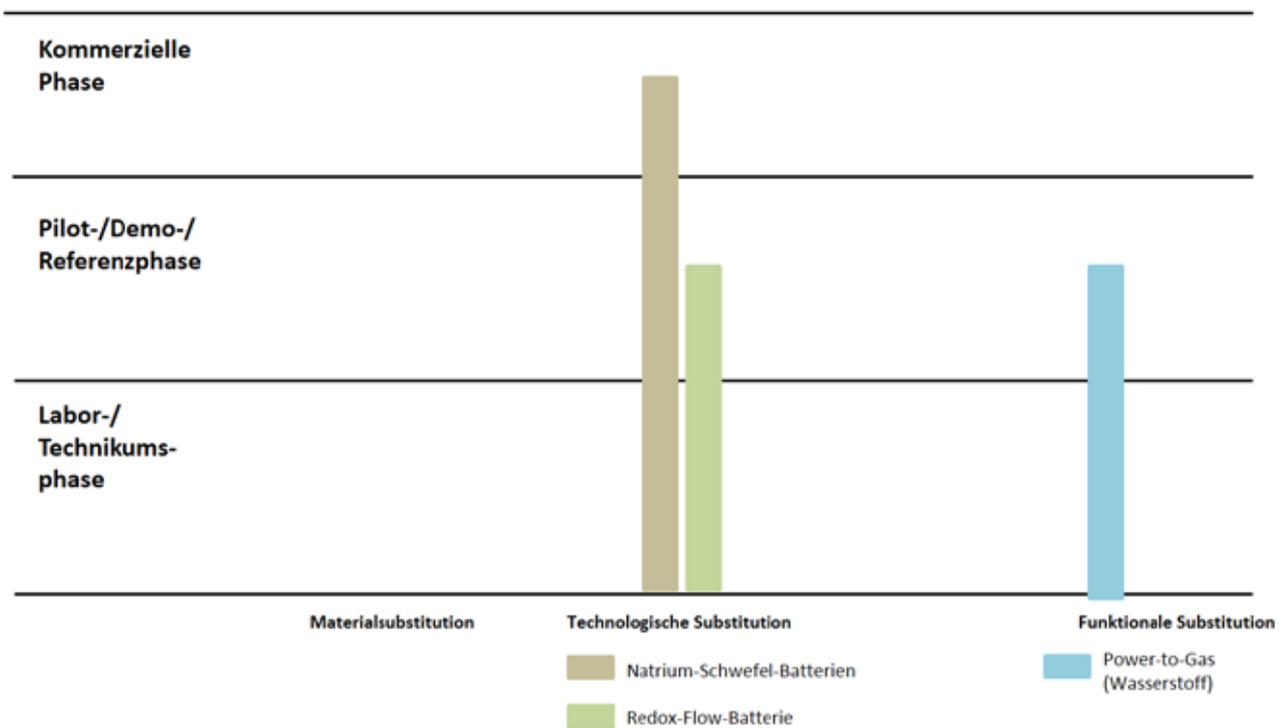
Fazit: Lithium-Ionen-Batterien gelten als die aussichtsreichste Technologie zur elektrochemischen Energiespeicherung in der Elektromobilität. Das liegt vor allem an ihren hohen Energie- und Leistungsdichten, die zur Erhöhung der Reichweiten wichtig sind. Deshalb gibt es in absehbarer Zukunft keine Substitutionsalternativen für Li-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Der Fokus der Forschung liegt auf der Materialeffizienz und dem werkstofflichen Recycling der Li-Ionen-Batterien. Lang-

fristig möglich wäre es, die Batterien aufzuarbeiten und wieder zu verwenden, um so den Rohstoffbedarf zu senken.

5.2.2 Lithium-Ionen Speicher (stationär)

Der Zellaufbau von Li-Ionen-Batterien für die stationäre Stromspeicherung entspricht prinzipiell dem Aufbau von Li-Ionen-Batterien für Fahrzeuge. Die Zellen bestehen aus Anode und Kathode, die in einen Elektrolyten eingetaucht und meist durch eine Polymermembran (Separator) getrennt sind. Je nach Anforderungen an die Kapazität bzw. die verfügbare Stromstärke wird Lithium in unterschiedlichen Verbindungen mit Übergangsmetallen als Kathodenmaterial eingesetzt: LCO (LiCoO_2), LMO (LiMn_2O_4), LFP (LiFePO_4), NMC (LiNiMnCoO_2) oder NCA (LiNiCoAlO_2). Die Anode in der Zelle ist zumeist mit Graphit (Kohlenstoff) beschichtet. In diese Kohlenstoffschicht lagert sich beim Ladevorgang das Lithium ein, es entsteht graphitiertes Lithium. Andere Anodenmaterialien sind Titandioxid oder Lithiumtitanat. Der Elektrolyt besteht aus verschiedenen organischen Lösungsmitteln bzw. Lösungsmittelgemischen, in denen ein Leitsalz gelöst ist. Als Leitsalz kommt in derzeit kommerziell erhältlichen Zellen nahezu ausschließlich Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) zum Einsatz.

Abbildung 20: Technologiereife der Substitutionsoptionen für stationäre Li-Ionen-Stromspeicher



Quelle: Eigene Darstellung

Auf **Materialebene** existiert für Lithium noch keine Substitutionsalternative. Als **technologische Substitution** von Lithium-Stromspeichern kommen andere elektrochemische Speicher in Betracht. Weit verbreitete Batteriesysteme basieren auf Blei-Säure- oder Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd). Blei-Säure-Batterien kommen in vielen, insbesondere dezentralen stationären Energiespeichern zum Einsatz [Wietschel et al. 2015]. Sie sind eine ausgereifte, günstige Technologie. Ein bedeutender Nachteil ist jedoch ihre niedrige Energiedichte und ihr geringer Zyklenwirkungsgrad. Es wird daher erwartet, dass Blei-Säure-Batterien mittelfristig keine größere Rolle mehr spielen werden [Battery University 2010]. Große Batteriesysteme mit NiCd-Akkus werden in einem ähnlichen Umfang wie Blei-Säure-Akkus eingesetzt. Auf Grund ihrer vergleichsweise geringen Zellspannungen, geringen Energie- und

Leistungsdichten und Umweltbedenken wird auch NiCd-Akkus mittelfristig keine große Bedeutung zugesprochen. Natrium-Schwefel-Batterien verwenden als aktive Materialien Schwefel für die positive und Natrium für die negative Elektrode. Sie müssen auf einer Arbeitstemperatur von 300 – 350 °C gehalten werden. Daher und auf Grund der stark korrodierenden Eigenschaften der Natriumpolysulfide eignen sich NaS-Batterien vor allem für große stationäre Anwendungen wie Netzenergiespeicherung. Der Großteil der installierten elektrochemischen Netzspeicherkapazität entfällt auf NaS-Systeme. Die meisten NaS-Speicher sind in Japan und in den USA installiert, in Europa wurden u. a. in Deutschland und in Großbritannien mehrere Projekte realisiert. Ihr Zyklenwirkungsgrad ist sehr hoch, es werden jedoch Heizsysteme benötigt, wodurch Verluste auftreten.

Redox-Flow-Batterien (RFB), die ebenfalls als Alternative in Frage kommen, zeigen ein sehr hohes Potential für die Speicherung von erneuerbaren Energien. Das zu reduzierende Arbeitsmedium wird in externen Speichern aufbewahrt und der eigentlichen Batterie zur Energieentnahme zugeführt. Dadurch lassen sich Redox-Flow-Batterien sehr einfach skalieren. Energie und Leistung können unabhängig voneinander dimensioniert werden. Zudem weisen sie sehr hohe Zyklenwirkungsgrade, keine Selbstentladung und eine hohe Lebensdauer auf [Alotto et al. 2013]. Nachteilig sind die momentan noch hohen leistungsspezifischen Kosten.

Nicht alle Batterietechnologien sind direkt untereinander substituierbar. Lithium-Ionen-Batterien erscheinen beispielsweise unter anderem sehr geeignet für die dezentrale, kurzfristige Speicherung regenerativ bereitgestellter Energie, während Redox-Flow-Batterien für diese Anwendung nicht in Frage kommen. Dafür können letztere auch zur längeren Speicherung von Energie eingesetzt werden, da sie keine Selbstentladung aufweisen. Außerdem können Hybrid-Lösungen als „Großspeicher“ fungieren. Sie kombinieren die Lithium-Ionen-Technologie (Leistungsbatterie) mit der Vanadium-Redox-Flow-Batterie (Energiebatterie). Ein Beispiel ist der MWh-Speicher von Bosch in Braderup [Kostka 2015]. Der Hybrid-Speicher dient der Vermeidung von Netzüberlastung und der Teilnahme am Regelenergiemarkt.

Für eine **funktionale Substitution** kommen für die stationäre Energiespeicherung insbesondere Wasserstoff-Brennstoffzellen (in Kombination mit Elektrolyse), Doppelschichtkondensatoren und Pumpspeicherkraftwerke in Betracht. Dabei können diese Alternativen nicht als direkte Substitutionsoptionen gesehen werden, sondern eher als Möglichkeit, die Menge der benötigten stationären Li-Ionen-Stromspeicher in einer systemischen Gesamtsicht zu reduzieren. So eignen sich Doppelschichtkondensatoren vor allem zur sehr schnellen Speicherung, etwa bei Spannungsspitzen, was eine Teilaufgabe von Li-Ionen-Batterien ist. Dagegen ist die Energiespeicherung mittels Pumpspeicherkraftwerke für lange Zeiträume prädestiniert. Bei Brennstoffzellen lassen sich Speicherdauer und -kapazität skalieren, der Gesamtwirkungsgrad ist jedoch bisher sehr gering.

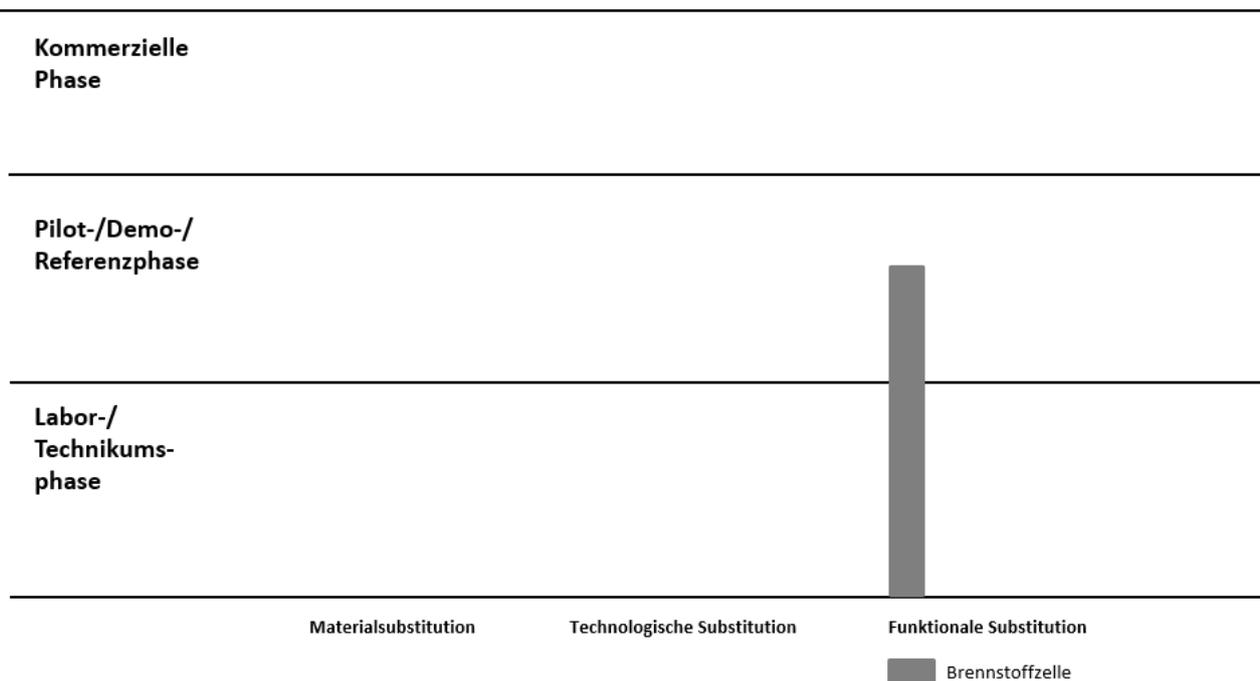
Fazit: Für Lithium in Li-Ionen-Batterien gibt es auf absehbare Zeit keine Substitutionsoptionen. Grundlagenforschung zielt auf die Entwicklung von Metall-Luft-Batterien. Kurz- bis mittelfristig könnten Redox-Flow-Batterien Li-Ionen-Batterien als stationäre Energiespeicher partiell substituieren, sind jedoch als Leistungsspeicher ungeeignet. Um auf dem Markt konkurrenzfähig zu sein, müssen vor allem die Kosten noch weiter gesenkt werden.

5.2.3 Batteriespeicher für Pedelecs

Ein Pedelec (Pedal Electric Cycle) ist mit einem elektromotorischen Antrieb von bis zu 250 Watt ausgestattet, der beim Anfahren oder am Berg den Fahrer unterstützt. Bei zunehmender Geschwindigkeit verringert sich diese Unterstützung und wird bei Erreichen von 25 km/h unterbrochen. Als Batteriespeicher kommen LiNiMnCoO₂-Akkus, LiFePO₄-Akkus als auch LiCoO₂-Speicher zum Einsatz.

In der folgenden Abbildung wird der technologische Reifegrad der verschiedenen Substitutionsansätze für Pedelec-Batterien dargestellt.

Abbildung 21: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Pedelec-Batteriespeicher



Quelle: Eigene Darstellung

Auf **Materialebene** gibt es für Lithium keine Substitutionsmöglichkeiten, allenfalls ließe sich die Konzentration verringern. Auch **technologisch** gibt es bis dato keine Möglichkeiten zur Substitution von Lithium.

In **funktionaler Hinsicht** sind Brennstoffzellen-Systeme als Alternative für Akkumulatoren denkbar. Diese stellen elektrische Energie mit Hilfe von Wasserstoff oder Methanol aus chemischer Energie bereit. Brennstoffzellen-Pedelecs werden bereits in einer Pilotserie von Linde und Pragma Industries hergestellt. Diese Pedelec-Varianten besitzen eine Reichweite von 100 km und können in wenigen Minuten geladen werden [hzwei 2016; ingenieur.de 2016]. Neben der Brennstoffzelle als Batterie wird weiterhin noch eine zusätzliche Li-Ionen-Batterie benötigt [Pragma Industries 2016].

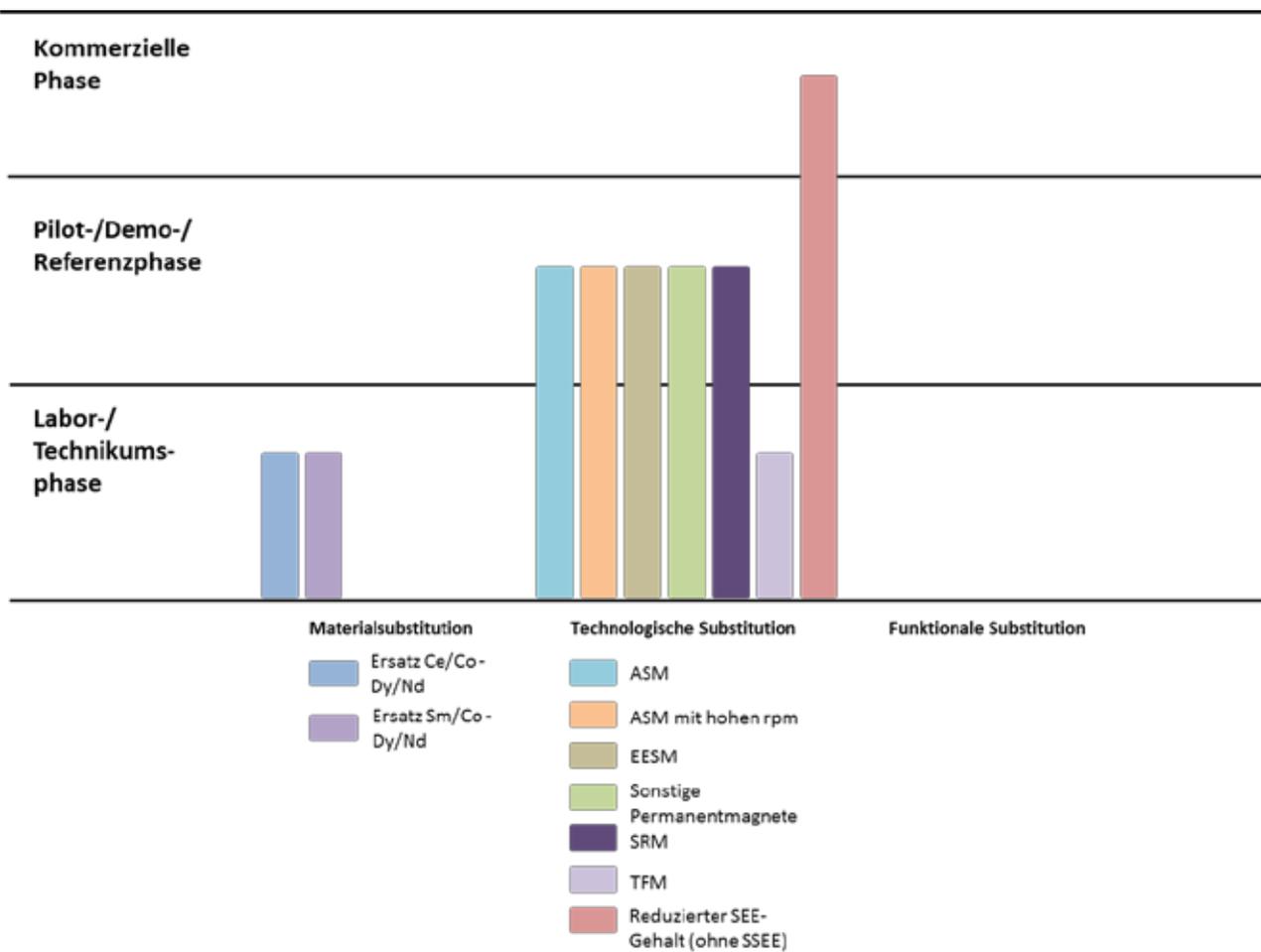
Fazit: Für Li-Ionen-Batteriespeicher für Pedelecs sind bisher keine wettbewerbsfähigen Alternativen auf dem Markt verfügbar. High-Power-Blei-Säure-Batterien, NiMH-Akkumulatoren und Doppelschicht-Kondensatoren sind theoretisch denkbar, stellen bisher keine wirkliche Alternative dar. Brennstoffzellen-Systeme kommen als Substitut in Frage, die Kosten müssten aber deutlich gesenkt werden.

5.3 Motoren / Generatoren

5.3.1 Hybridmotoren

Hybridmotoren sind elektrische Antriebsmotoren für Hybridfahrzeuge (HEV) wie z. B. der Toyota Prius. Ein HEV besitzt neben dem Elektroantriebsmotor auch einen konventionellen Verbrennungsmotor. Daher ist in einem HEV eine kompakte Bauform des E-Motors von hoher Bedeutung. In der Regel werden daher permanent erregte Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten aufgrund ihres geringen Gewichts und Volumens bei hoher Leistungsdichte eingesetzt [Buchert et al. 2011, Pavel et al. 2017]. Bei den Hybridmotoren sind folgende Rohstoffe als kritisch und relevant eingestuft: Dysprosium, Gallium, Kupfer, Neodym, Praseodym, Terbium. Der derzeitige Entwicklungsstand von potentiellen Substitutionsalternativen für Hybridmotoren ist in folgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 22: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Hybridmotoren



Quelle: Eigene Darstellung

Potentielle **Materialsubstitutionen** wie der Ersatz von Dysprosium und Neodym durch Cer und Kobalt oder Samarium-Kobalt-Permanentmagnete befinden sich heute im Labormaßstab. Kobalt und Samarium sind ebenfalls als kritische Rohstoffe eingestuft, was eine Materialsubstitution bremst.

Technologische Substitutionen sind schon deutlich weiter in ihrer Technologiereife. Aufgrund der sehr hohen Kritikalität der schweren Seltenerdelemente (Dysprosium, Terbium) sind v. a. Dy-freie Permanentmagnet-Motoren im Fokus. [Pavel et al 2017] Der Neodym-Magnet-Motor von Honda und Daido Steel, der ohne den Einsatz von schweren Seltenen Erden (Dy oder Tb) produziert wird, hat bereits Marktreife erreicht. [greencarcongress 2016]. An weiteren technologischen Substitutionen für HEV wird geforscht. Im Prototyp-Stadium zeigen sich die Optionen des Asynchronmotors (ASM), des Asynchronmotors mit hoher Drehzahl (ASM mit hohen rpm), der Extern erregter Synchronmotor (EESM), Permanentmagnete mit sonstigen Magneten (z. B. Ferritmagnete) sowie der geschaltete Reluktanzmotor (SRM). Diese Motorentypen sind alle frei von Seltenen Erden (frei von Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym), weisen aber eine niedrigere Leistungsdichte auf. Diese Substitutionsalternativen gehen weiterhin einher mit einem erhöhten Kupferbedarf und Bauraumbedarf.

Im frühen F&E-Stadium befindet sich noch der Transversalflussmotor (TFM), der ebenfalls keine Seltenen Erden benötigt.

Fazit: Für die Substitution des Einsatzes der Seltenen Erden in den Permanentmagneten der HEV-Elektromotoren sind bereits viele Anstrengungen in Forschung und Entwicklung vorgenommen worden. Nach dem derzeitigen Stand ist eine reine Materialsubstitution in den nächsten Jahren nicht ab-

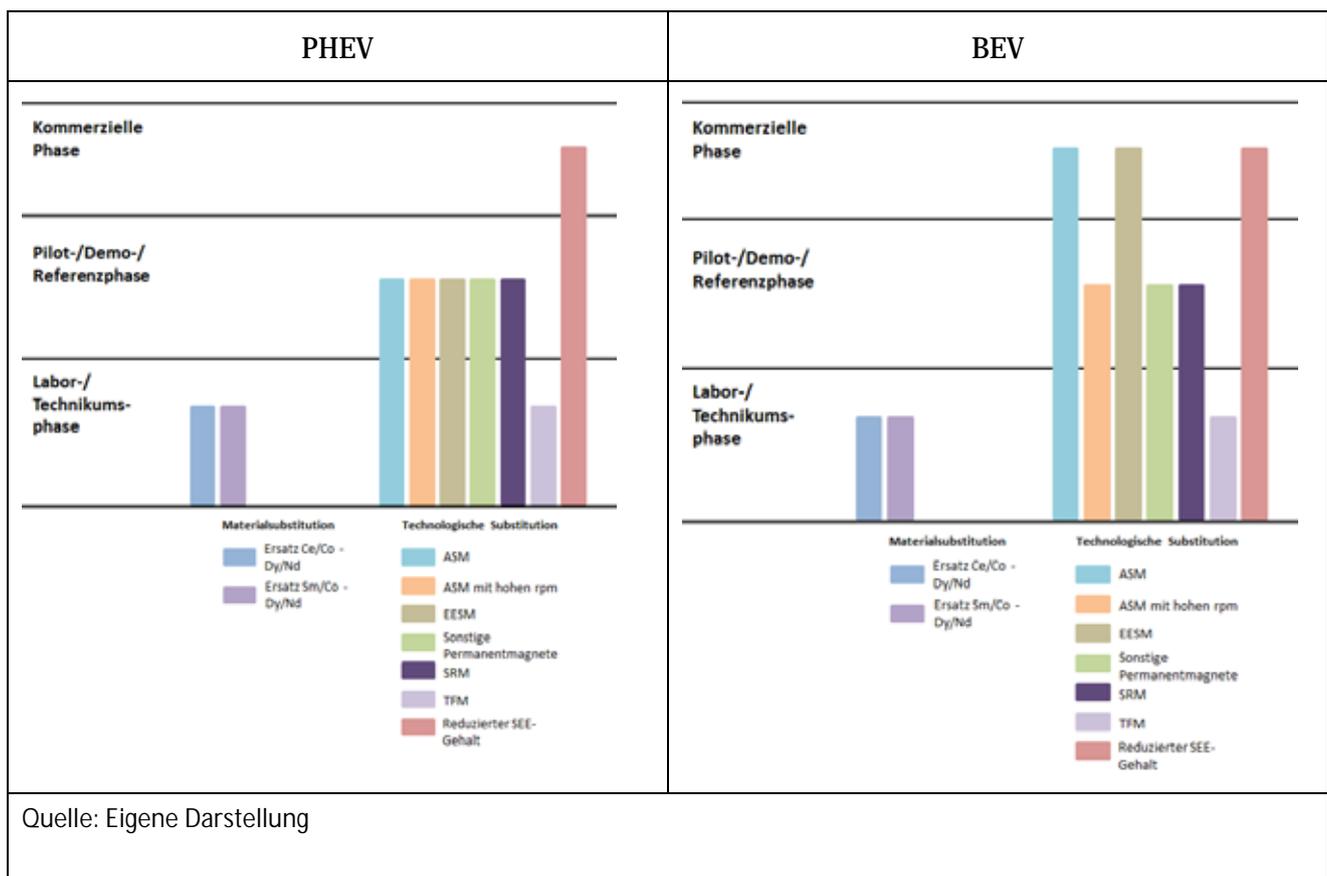
sehbar. Erste Erfolge wurden im Einsatz von Nd-Magneten ohne schwere Seltenerdelemente erzielt. Der reduzierte SEE-Gehalt wird auch von Fachleuten als vielversprechendste Substitutionsalternative gesehen. Im Allgemeinen wird der HEV in der Langfristperspektive als eine Übergangstechnologie hin zum vollelektrischen Pkw eingestuft.

5.3.2 Elektroantriebsmotoren BEV und PHEV

Unter dieser Umwelttechnologie sind Elektronantriebsmotoren für vollelektrische Pkw (BEV), Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sowie für Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) zusammengefasst. Letztere verfügen neben einem Elektromotor, der von einer Batterie mit Ladenschluss („Plug-in“) gespeist wird, zusätzlich über einen Verbrennungsmotor. Diese Umwelttechnologie fokussiert auf permanent erregte Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten (PSM) [Buchert et al. 2011, Pavel et al. 2017]. Dies ist der Standard-Motortyp aufgrund seines geringen Gewichts und geringen Volumens bei hoher Leistungsdichte. Als kritisch und relevant sind die Rohstoffe Dysprosium, Gallium, Kupfer, Neodym, Praseodym und Terbium eingestuft.

Da die Substitutionsalternativen von BEV und PHEV in ihrer Technologiereife voneinander abweichen, werden diese separat voneinander dargestellt. Da der BEV nur einen Elektromotor beinhaltet und somit der Bauraumengpass nicht so ausgeprägt ist wie beim PHEV (der über Elektromotor und Verbrennungsmotor verfügt), sind beim BEV die Substitutionsalternativen in ihrer Marktreife deutlich weiter und vielfach bereits im Markt vertreten.

Abbildung 23: Technologiereife der Substitutionsoptionen für PHEV und BEV



Als **Materialsubstitution** ist ein Austausch der Seltenen Erden Dysprosium und Neodym durch Samarium-Kobalt-Permanentmagnete oder Cer und Kobalt sowohl beim PHEV als auch beim BEV denkbar. Diese Substitutionsalternativen befinden sich im F&E-Stadium und sind in naher Zukunft nicht abseh-

bar einsatzbereit. Die Kritikalität der Rohstoffe Kobalt und Samarium hemmt zusätzlich eine Substitution.

Die **technologischen Substitutionsalternativen** sind bei beiden Motortypen ebenso identisch, unterschieden sich teilweise aber in ihrer Technologiereife. Auf dem Markt verfügbar sind Elektroantriebsmotoren mit reduziertem Seltenen Erden-Gehalt sowohl für PHEV als auch BEV. Der Asynchronmotor (ASM) und der extern erregte Synchronmotor (EESM) sind für den BEV auf dem Markt vorhanden, für den PHEV noch im Pilotstadium. Beide Substitutionsalternativen sind frei von Seltenen Erden, gehen aber mit einer niedrigeren Energieeffizienz und höherem Kupferbedarf einher. Dieser höhere Bauraumbedarf ist noch der limitierende Faktor beim Einsatz im PHEV. Ebenso im Pilotstadium befinden sich der Asynchronmotor mit hoher Drehzahl (ASM mit hohen rpm), Sonstige Permanentmagnete (z. B. Ferritmagnete) und geschaltete Reluktanzmotoren (SRM), sowohl beim PHEV als auch beim BEV. Auch diese Motorentypen sind frei von Seltenen Erden. Der Transversalflussmotor (TFM), der ebenfalls keine Seltenen Erden benötigt, ist noch im frühen F&E-Stadium.

Fazit: Für die Substitution des Einsatzes der Seltenen Erden in den Permanentmagneten der Elektromotoren sind bereits viele Anstrengungen in F&E vorgenommen worden. Nach dem derzeitigen Stand ist eine reine Materialsubstitution in den nächsten Jahren nicht absehbar. Eine reine Mengenreduzierung des SEE-Gehaltes (SEE-Gehalt absolut) ist bereits bei vollelektrischen (BEV) und Plug-in-Hybrid-Pkw (PHEV) realisiert z. B. im BMW i3.

Für den BEV sind ebenfalls Komponentensubstitutionen im Markt vorhanden. Der SEE-freie Asynchronmotor wird z. B. bereits im Tesla S eingesetzt und der ebenfalls SEE-freie EESM findet bereits Anwendung im Markt beispielsweise im Renault Zoe. Auch ist eine weitere Optimierung der bestehenden Optionen wie z. B. ASM mit höherer Drehzahl in der breiten Anwendung denkbar. Hier ist bereits die Serienproduktion geplant. Weitere Alternativen wie z. B. Eisenmagnete sind ebenso in der Massen-anwendung vorstellbar.

Für den PHEV wird an einer Reihe von E-Antriebsmotoren geforscht, die sich noch in der Pilotphase befinden. Darunter fallen ASM, ASM mit hoher Drehzahl, EESM, SRM und Sonstige Permanentmagnete. Diese Motorentypen weisen noch hohe Leistungsverluste bei größerem Bauraumbedarf oder hohe Geräuschpegel im Vergleich zum permanent erregten Synchronmotor auf.

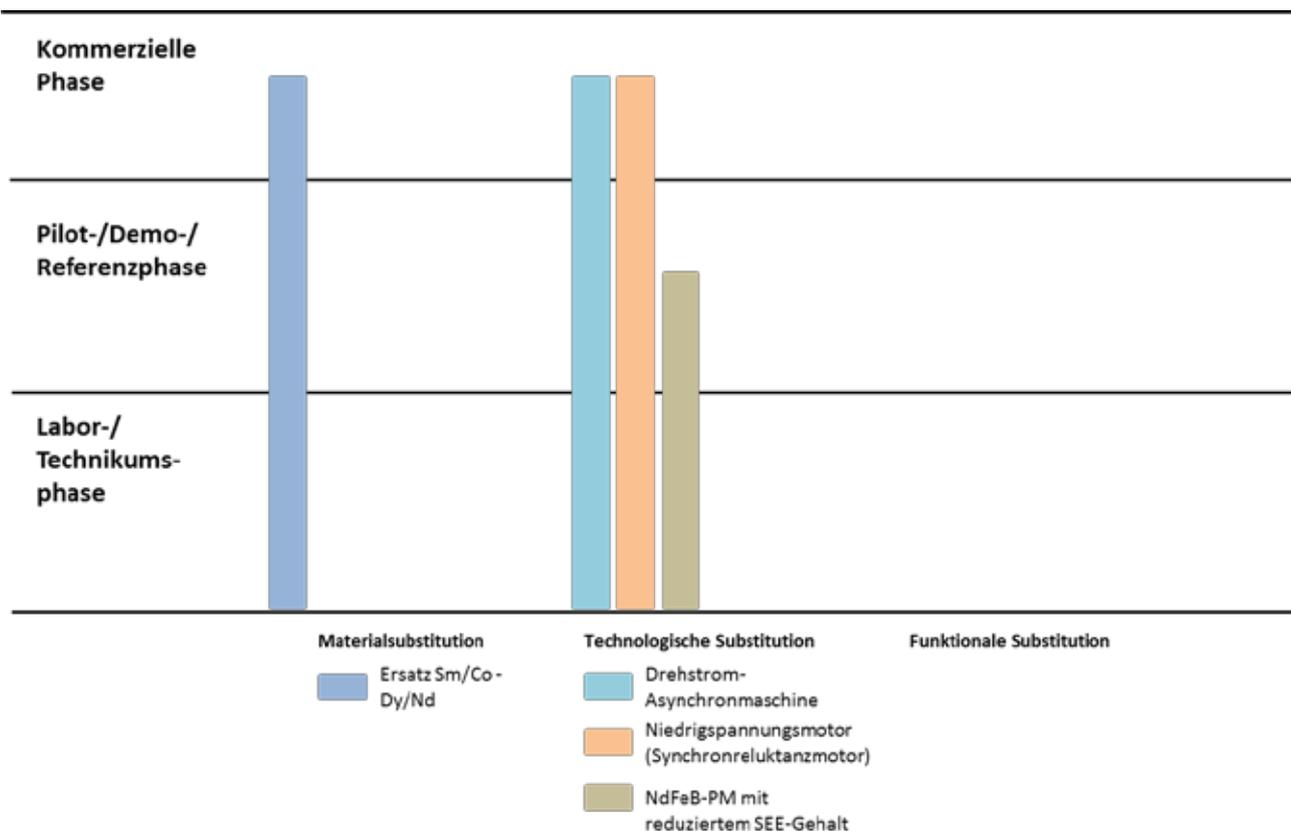
Die bereits etablierten Substitutionsoptionen ASM und EESM wie auch die Alternativen in der Pilotphase sind aufgrund ihrer Restriktionen und niedrigeren Leistungsdichte derzeit als Second-Best-Optionen einzuschätzen.

Die Forschung nach Substitutionsmöglichkeiten für den Einsatz von Seltenen Erden wurde v. a. aufgrund der kurzfristig rasant gestiegenen Preise in 2010 und Exportrestriktionen aus China angetrieben. Nachdem die Preise in der jüngsten Zeit wieder gefallen sind und auch die Exportrestriktionen aufgehoben wurden, ist der Druck nach Substitutionsmöglichkeiten geringer geworden.

5.3.3 Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie

Diese Umwelttechnologie umfasst Hochleistungs-Permanentmagnete (im Wesentlichen Neodym-Eisen-Bor-Magnete), die für Elektromotoren im industriellen Einsatz für die Industrieautomatisierung eingesetzt werden. Anwendungen für Elektromotoren bzw. Generatoren für Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge und Energieerzeugung wie z. B. Windkraftanlagen sind hier ausgenommen. Synchronmotoren mit Permanentmagneten zeichnen sich durch sehr hohe elektrische Wirkungsgrade aus und weisen daher eine entsprechende Marktdynamik auf. Bei dieser Umwelttechnologie sind die Seltenen Erden Dysprosium, Terbium, Neodym und Praseodym sowie Kupfer als kritisch und relevant eingestuft.

Abbildung 24: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie



Quelle: Eigene Darstellung

Eine materielle Substitution der NdFeB-Magnete liegt in Samarium-Kobalt-Dauermagneten (SmCo). Hierbei handelt es sich um die Ursprungstechnologie der Industriemotoren, die heute in Nischenanwendungen noch eingesetzt wird. Die SmCo-Dauermagnete weisen eine niedrigere Leistung als die NdFeB-Permanentmagnete auf und sind mit Samarium und Kobalt ebenfalls mit kritischen Rohstoffen ausgestattet, was einer großflächigen Substitution entgegensteht.

Technologische Substitutionsalternativen liegen derzeit in Drehstrom-Asynchronmaschinen und Niederspannungsmotoren (z. B. Synchronreluktanzmotoren). Beide Technologien sind frei von Seltenen Erden. Die Drehstrom-Asynchronmaschine geht einher mit einem erhöhten Kupferbedarf und ist der technologische Vorgänger zum Hochleistungs-Permanentmagneten. Die geringere Effizienz und niedrigere Leistungsdichte hemmen diese Technologie als Substitutionsalternative. Der Niederspannungsmotor zeichnet sich aus durch ein deutlich größeres Bauvolumen (ca. 50 – 100 % größeres Bauvolumen als der NdFeB-Permanentmagnet) und besitzt eine geringere Überlastfähigkeit. In Nischenanwendungen (z. B. Pumpen) ist der Niederspannungsmotor als Substitut einsetzbar.

Die Verbesserung der Materialeffizienz wird heute mit dem größten Potential eingeschätzt. So wird z. B. an Dünnschicht-Magneten geforscht, die einen reduzierten Seltenen Erden-Bedarf aufweisen. Das Potential der Materialeffizienzsteigerung wird von Fachleuten auf 20 – 25 % bei verbesserter Herstellertechnologie geschätzt [SubSKrit 2016]. Allerdings erschwert eine Reduzierung des eingesetzten Materials das Recycling der relevanten Rohstoffe.

Fazit: Es sind mit dem Drehstrom-Asynchronmotor und dem Reluktanzmotor Substitutionsoptionen für den Hochleistungs-Permanentmagneten- zumindest für Nischenanwendungen – bereits heute im Markt vorhanden. Die Entwicklung geht aber eindeutig in Richtung Effizienzoptimierung, um eine

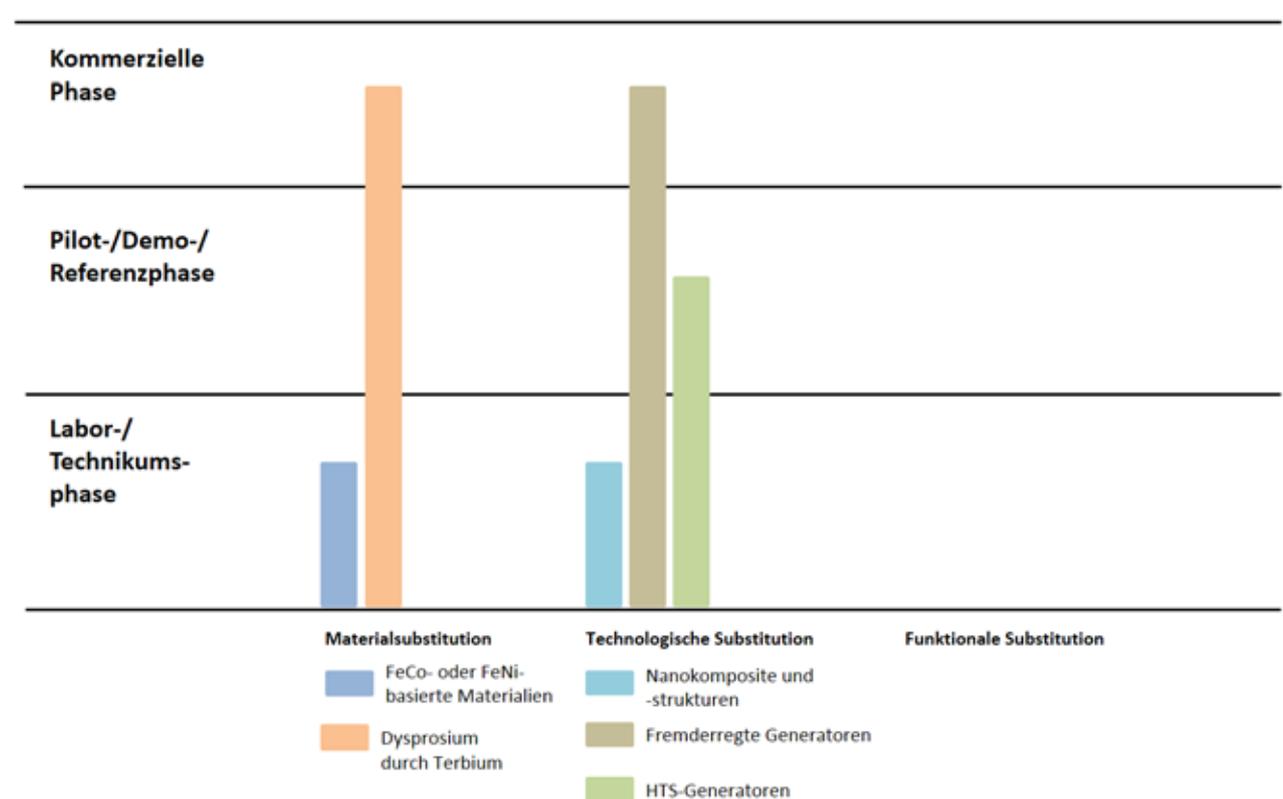
Substitution ohne Effizienzverluste zu erreichen. Das Potential der Materialeffizienzsteigerung schätzen Fachleute auf 20-25 %. Der Nachteil der Materialeffizienzsteigerung liegt allerdings in einem erschweren Recycling der relevanten Rohstoffe durch dissipativen Einsatz.

Im Allgemeinen ist die Umstellung auf ein Substitut in der industriellen Anwendung keine kurzfristige Entscheidung. Ergebnisse einer Studie in Baden-Württemberg zeigen, dass Industriebetriebe in Baden-Württemberg ihre Systeme während der Hochpreisphase der Seltenen Erden kaum gewechselt haben. Grund hierfür ist, dass die Motoren meist sehr genau an die Anlagen eingepasst sind und wenig Spielraum für einen kurzfristigen Umstieg auf andere Motoren-Typen besteht. [Buchert et al. 2014]

5.3.4 Permanentmagnetgeneratoren in WKA

Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen dienen der Transformation der Bewegungsenergie des Windrades in elektrische Energie. In ihnen werden Seltenerdelemente eingesetzt. Die folgende Abbildung illustriert die Technologiereife der Substitutionsoptionen für Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen.

Abbildung 25: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen



Quelle: Eigene Darstellung

Für eine **Materials substitution** müssen die relevanten Materialien betrachtet werden. Das am häufigsten zum Einsatz kommende Material für Permanentmagnete in Windkraftanlagen ist NdFeB, dem Dysprosium zugesetzt wird, um die Koerzitivfeldstärke und die Temperaturbeständigkeit zu erhöhen. Der Bedarf an NdFeB-Magnetmaterial liegt laut [DERA 2016] zwischen 0,2 bis 2,0 t/MW.

Während für den Einsatz in der Elektromobilität schon Permanentmagnetmotoren verfügbar sind, die auf den Einsatz von Dysprosium verzichten, ist dieses Ziel für Generatoren in Windkraftanlagen noch nicht erreicht. Bisher ist auf Materialebene eine teilweise Substitution von Neodym durch Praseodym möglich. Dabei kann ein Verhältnis von Nd:Pr = 3:1 nicht unterschritten werden, da ansonsten die

magnetischen Eigenschaften zu stark beeinträchtigt würden [DERA 2016]. Als Substitut kommt Terbium in Frage. Genau wie Dysprosium erhöht Terbium die Temperaturbeständigkeit, den Korrosionswiderstand und die Koerzitivfeldstärke der Magnete; darüber hinaus reduziert es (anders als Dysprosium) nicht ihre Remanenz. Sollten die Preise für Terbium zukünftig fallen, könnte es als Substitut zum Einsatz kommen. Mittels Hochdurchsatz-Screening wird darüber hinaus nach neuen Materialien gesucht, deren magnetische Eigenschaften einen Einsatz in Permanentmagnetmotoren ermöglichen könnten [Fraunhofer ISI 2015]. Ein Fokus liegt auf der Nutzung von FeCo- und FeNi-Verbindungen als Permanentmagnete. Allerdings liegen die erzielbaren Energiedichten noch deutlich unter denen von NdFeB-Magneten, so dass ihr zukünftiger Einsatz in Windkraftanlagen fraglich scheint.

An Stelle einer Komplettsubstitution zielen zahlreiche Forschungsprojekte auf die Verringerung des Bedarfs an Elementen der Seltenen Erden, insbesondere Dysprosium, für NdFeB-Magneten durch neue produktionstechnische Verfahren. Dazu zählt das Metallpulverspritzguss-Verfahren (Net-Shape-Production), bei dem die Magnete unmittelbar in der erforderlichen Form produziert werden. Dadurch lassen sich Fertigungsabfälle beim Schleifen und Schneiden vermeiden. Ein materialwissenschaftlicher Ansatz ist die Dysprosium-Layer-Technologie. Hier wird Dysprosium gezielt an Korngrenzen konzentriert, so dass mit einer niedrigeren Gesamtmenge an Dysprosium gleiche Materialeigenschaften gewährleistet werden. Ein weiterer Ansatz ist das Grain-Size-Tuning. Bei diesem Verfahren werden die Korngrößen des Magnetmaterials bis in den Nanobereich so optimiert, dass weniger Dysprosium bei gleichbleibenden Magneteigenschaften erforderlich ist [DERA 2016].

Als **technologische Substitution** ohne Seltenerdelemente könnten langfristig Nanokomposite und Nanostrukturen in Frage kommen. Zum Einsatz kommen könnte beispielsweise Material auf Basis einer Eisen-Kobalt-Verbindung, in der nanometerkleine magnetische Stäbchen wie an einer Perlenkette aufgereiht in einer Matrix fixiert sind [Elektronik Praxis 2015]. In einigen Anwendungsfällen lassen sich PMG durch fremderregte Generatoren substituieren. Dies wird mit niedrigeren Wirkungsgraden einhergehen, die allerdings durch ebenfalls niedrigere Investitionskosten dennoch einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen könnten. Die Nutzung fremderregter Generatoren führt jedoch zu größeren Gondeln, was für Anlagen mit sehr hohen Leistungen, insbesondere Offshore, ein Ausschlusskriterium darstellt. Größere Erwartungen werden in Reluktanzgeneratoren und besonders High-Temperature-Superconducting (HTS) Generatoren gesetzt, in denen das Kupfer in den Läuferwicklungen teilweise durch keramische Hochtemperatursupraleiter ersetzt wird. HTS-Generatoren scheinen sehr gut geeignet für Anwendungen in hohen Leistungsbereichen und Offshore-Anwendungen, da sie Gondeln mit sehr hohen Wirkungsgraden bei kompakten Ausmaßen und geringem Gewicht ermöglichen. Im Vergleich zu einem permanenterregten Generator für eine 10-MW-Anlage können rund 50 % des Generatorgewichts eingespart werden [Wuppertal Institut 2014]. HTS-Generatoren sind eine vergleichsweise junge Technologielinie. Große Maschinen werden zwar getestet, jedoch ist noch nicht abzusehen, wann HTS-Generatoren in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen könnten. Die Entwicklung der keramischen Hochtemperatursupraleiter konzentriert sich auf Bismut-(Blei)-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxid $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ kurz BSCCO). Für die Verwendung in Windkraftanlagen scheint dieses Material jedoch wenig geeignet. Aussichtsreicher sind Yttrium-Barium-Kupferoxid-Gruppen $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x})$ mit $x < 0,6$. Hier könnte Yttrium auch durch Neodym oder andere Seltenerdmetalle substituiert werden, was jedoch erst bei höheren Rohstoffpreisen zu erwarten ist.

Fazit: Trotz intensiver Forschungsanstrengungen wird auf absehbare Zeit kein Magnetmaterial mit vergleichbaren Eigenschaften ohne Elemente der Seltenen Erden zur Verfügung stehen. Wahrscheinlich sind graduelle Optimierungen der NdFeB-Magnete, insbesondere Verbesserung der Produktionsmethoden und die Verringerung des Anteils schwerer Seltener Erden [DERA 2016]. Mittelfristig scheint eine Substitution von PMG in Windkraftanlagen nur durch fremderregte Generatoren möglich. Diese sind jedoch durch ihre schlechteren Wirkungsgrade und das sich ergebende größere Gondelausmaß und -gewicht insbesondere für Offshore-Anlagen im hohen Leistungsbereich unzureichend.

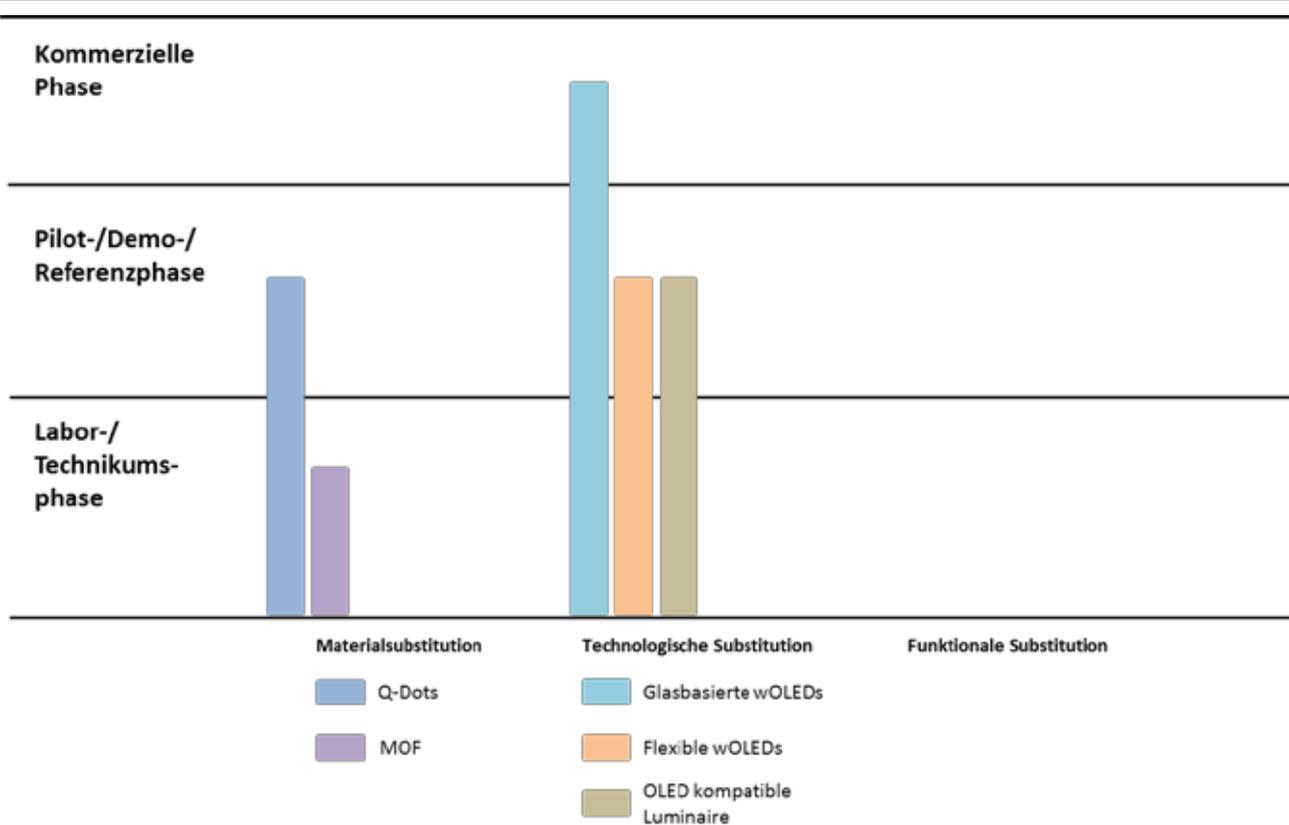
Hoffnungen werden in HTS-Generatoren gesetzt, ihr Einsatz in Windkraftanlagen ist aber noch ungewiss.

5.4 Beleuchtung

5.4.1 Weiße LED

Die Lichterzeugung mittels Leuchtdioden basiert auf einer Festkörpertechnologie. Dabei werden auf Halbleiterkristalle aus Gallium Nitrid oder Indiumgalliumnitrid durch Stromfluss zur Emission eines monochromatischen Lichts angeregt. Durch die Elektrolumineszenz entsteht zunächst ein einfarbiges Licht mit sehr enger Spektralverteilung im Bereich rot, gelb, grün oder blau. Zur Erzeugung von weißem Licht lassen sich zwei physikalische Effekte nutzen: additive Farbmischung durch räumlich nahe Anordnung von roten, grünen und blauen LEDs sowie die Lumineszenzkonversion. Marktübliche wLEDs nutzen letzteren Effekt und werden als phosphorconverted white LEDs (pc-wLEDs) bezeichnet. Die Erzeugung von weißem Licht mittels Lumineszenzkonversion erfolgt bei heutigen pc-wLEDs üblicherweise mittels Phosphoreszenzstoffen, die aus einem Gemisch von Aluminiumoxid und Oxiden von Seltene-Erde Elemente (Yttrium-Aluminium-Granat - YAG) bestehen. Die Feinabstimmung der Farbtemperatur des blau-gelben Mischspektrums erfolgt durch Dotierung der YAG Leuchtstoffschicht mit Oxiden von Seltenen Erden (z. B. Cer, Gadolinium, Europium). Die Menge der verwendeten Phosphoreszenzstoffe und Dotierungssubstanzen per LED hängt von deren Größe, Leistung, Lichtfarbe und dem jeweiligen Hersteller ab. Pc-wLEDs sind kostengünstig herstellbar und erweisen sich als äußerst langlebig und relativ unempfindlich gegenüber Alterung.

Abbildung 26: Technologiereife der Substitutionsoptionen für weiße Leuchtdioden



Quelle: Eigene Darstellung

Eine **Materials substitution** der Galliumnitrid- oder Indiumgalliumnitrid-Halbleiterkristalle existiert theoretisch durch andere Halbleiter oder durch konjugierte Polymere. Aus physikalischen Gründen lässt sich blaues Licht jedoch nicht einfach mit anderen Halbleitermaterialien wie Silizium erzeugen. Ein technisch nutzbares Potential zur materiellen Substitution von Gallium und Indium ist deshalb aus heutiger Sicht nicht erkennbar.

Substitutionspotentiale für Elemente der Seltenen Erden eröffnen sich theoretisch durch die Nutzung von cadmium-freien Quantum Dots auf Basis von Kupfer-Indium Sulfid / Zink Sulfid (CuInS/ZnS) oder Indium Phosphid (InP/ZnS) [LED professional Review, 2015]. Diese cadmium-freien Quantum Dots sind konform zu den Anforderungen der RoHS Verordnung. Allerdings ist deren Quantenausbeute bei der Lumineszenzkonversion geringer als bei cadmiumhaltigen Quantum Dots. Deshalb sind cadmium-freie Quantum Dots bisher vorrangig für das Marktsegment der LED-basierten Hintergrundbeleuchtung für TV Flachdisplays (Flüssigkristall Displays) kommerzialisiert worden [Reinhard, 2016].

Konjugierte Polymere können in Form von OLEDs als Substitut in Frage kommen. Allerdings haben diese Materialien eine schlechte Verarbeitbarkeit, niedrigere Effizienz, und geringe Lebensdauer als konventionelle wLED.

Die **technologischen Substitutionspotentiale** für wLEDs existieren zumeist im Zusammenhang mit den zuvor erläuterten alternativen Leuchtstoffen. Deren Anwendung wird ein punktuelles technisches Re-Design der konventionellen pc-wLEDs erfordern. Weiße OLEDs werden gemeinhin als potentielle Nachfolgetechnologie zu wLEDs betrachtet [Kalyania & Dhobleb 2012]. Die Technologie basiert auf dem Prinzip der polymeren Elektrolumineszenz in konjugierten (halbleitenden) Polymeren. wOLEDs enthalten im Gegensatz zu wLEDs keine Phosphors auf Basis von Elementen der Seltenen Erden. Das Substitutionspotential von OLED-basierten Leuchtmitteln wird nicht nur von technischen Faktoren beeinflusst, sondern auch vom Produkt-Design und Konsummustern. Insbesondere die Nutzungsdauer der Lichtquellen und deren Ersatzraten bestimmen den Gesamtmaterialverbrauch. Bislang konnten sich starre, auf Glassubstrat basierende weiße OLEDs wegen ihres hohen Preises noch nicht in nennenswertem Umfang am Markt verbreiten. Hingegen wird der Technologie der flexiblen OLEDs ein großes Marktpotential prognostiziert, wenn es gelingt, diese mittels Rolle-zu Rolle Produktionstechnologie kostengünstig auf Foliensubstrat herzustellen. In diesem Fall wird das Prinzip der „Economies-of-scale“ es ermöglichen großflächige OLED-Leuchtelemente in großen Mengen zu produzieren. Momentan ist die Qualität und Haltbarkeit der flexiblen OLED Leuchtelemente noch zu gering, besonders im Vergleich zu den günstig herstellbaren weißen LEDs. Zudem konnte die Herstellung hoch effizienter und langlebiger OLED Leuchtmittel bei geringen Kosten bisher noch nicht verwirklicht werden.

Eine **funktionale Substitutionsmöglichkeit** für Beleuchtung ist gegenwärtig nicht bekannt.

Fazit: Es gibt Innovationspfade für materielle und technologische Substitution der in pc-wLED verwendeten Halbleiter und Phosphoreszenzstoffe. Allerdings sind diese Entwicklungen noch auf niedrigem Reifegrad. Die Verwendung von Cadmium-basierten Quanten-Dots als Leuchtstoff stellt aufgrund des Schwermetallgehalts keine ökologisch sinnvolle Substitutionsmöglichkeit dar. Hingegen stellen MOFs (metallorganischen Gerüstverbindungen = MOF für "metal-organic framework") eine attraktive SEE-freie und wahrscheinlich ungiftige Alternative für YAG Phosphors dar. Es kann noch nicht abgeschätzt werden, ob sich diese Alternativen in der Praxis bewähren. Deshalb sollte die Innovation im Bereich MOF gezielt gefördert und mittels Begleitforschung (z. B. Lebenszyklusanalyse) auf nachhaltige Richtung gelenkt werden. In Hinblick auf wOLEDs sind bereits erste Produkte am Markt verfügbar. Allerdings könnte die Massenproduktion in Form kostengünstiger Folie-basierter OLEDs zu Reboundeffekten führen. Dies könnte passieren, wenn die Anwendung von billigen OLEDs im Beleuchtungssektor zu einer Nachfragesteigerung nach Beleuchtung führt. Zudem könnte es zu einem erhöhten Verbrauch an Platingruppenmetallen führen, wenn die Lebensdauer dieser Art von OLEDs nicht wesentlich gesteigert werden kann.

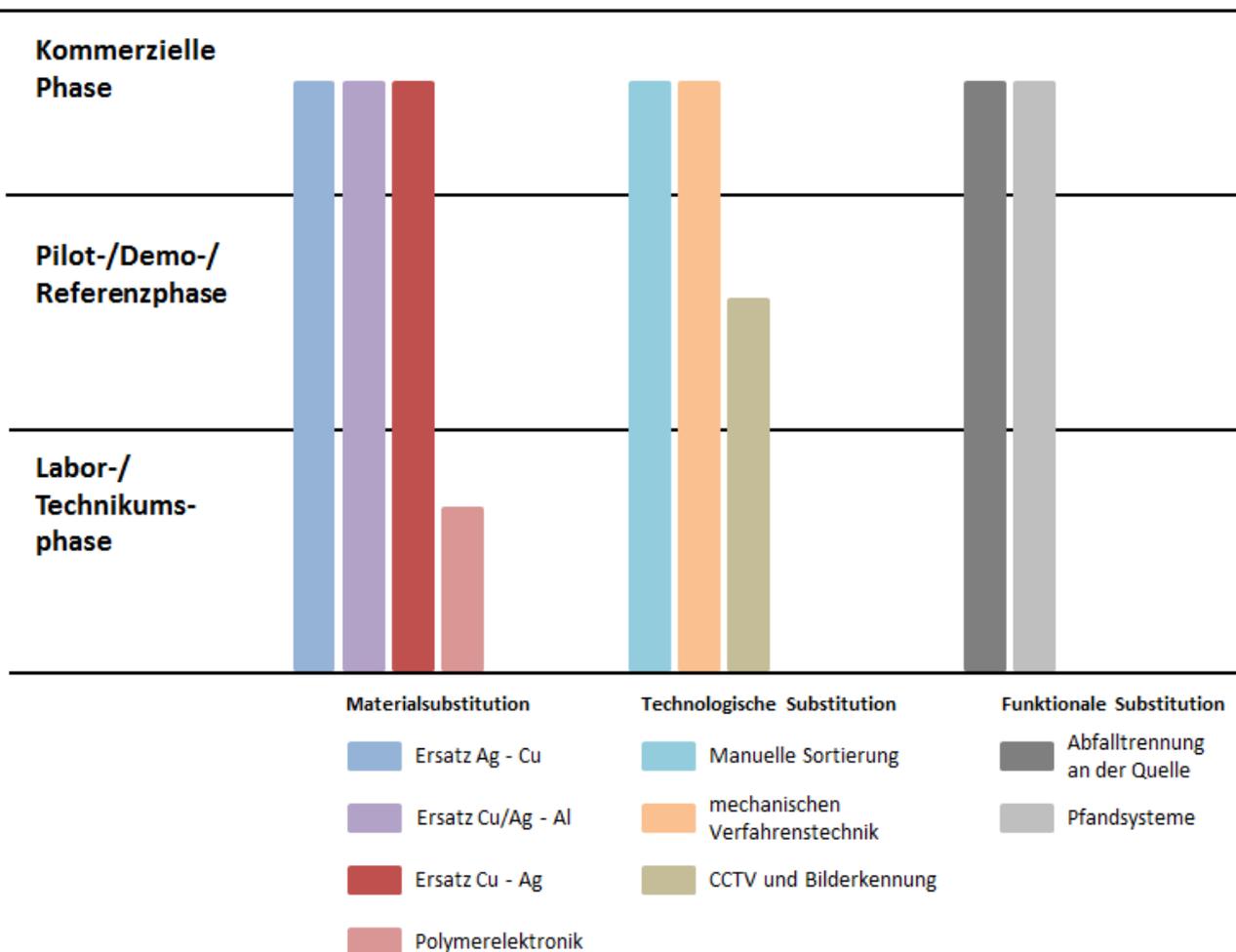
5.5 Weitere Technologien

5.5.1 RFID für Wertstofftrennung

Die RFID-Technologie besteht aus zwei Komponenten, einerseits dem passiven Transponder und andererseits dem aktiven Lesegerät, welches vom Transponder berührungslos Daten auslesen kann. Ein Transponder besteht im Wesentlichen nur aus einem Mikrochip und einer winzigen metallischen Antenne. Es gibt zahlreiche technischen Varianten von Transpondern, die sich hinsichtlich der Bauformen und Größe der Antennen, der Chips und der Art des Trägermaterials unterscheiden. Außerdem hängt die Bauform vom Frequenzbereich der Funkkoppelung mit dem Lesegerät ab. Die Größe der Lesegeräte hingegen wird von der gewünschten Reichweite/Geometrie des Auslesebereichs sowie der erforderlichen Mobilität bzw. Integration in die Infrastruktur der Umgebung bestimmt.

Marktübliche RFID Transponder enthalten gedruckte oder geätzte Kupfer-basierte Antennen auf Polymer- oder Papiersubstraten. Kostengünstige aber weniger robuste Varianten enthalten Aluminium als Antennenmaterial. Hingegen werden hochwertige Transponder mit silberhaltigem Antennenmaterial hergestellt. In diesem Fall werden die Antennen mit Hilfe additiver Herstellungsverfahren (Drucktechnologien) auf ein Polymersubstrat gedruckt. Dies geschieht mittels Inkjet oder Screenprinting von elektrisch leitfähiger Tinte. Diese leitfähigen Inks erhalten Silber in Form von Nanopartikeln, welche nach dem Drucken durch photothermische Aushärtung in eine leitfähige Dickschicht (thick film) umgewandelt werden [Babar et al.2012].

Abbildung 27: Technologiereife der Substitutionsoptionen für RFID



Quelle: Eigene Darstellung

Die Möglichkeiten zur **materiellen Substitution** der Transponder richten sich nach den funktionalen Anforderungen des jeweiligen Anwendungszwecks. Verschiedene Transpondertypen unterscheiden sich erheblich hinsichtlich ihrer Größe und Leistungsfähigkeit. Kommerzielle RFID-Typen decken ein weites Spektrum technisch und ökonomisch sinnvoller Materialkombinationen ab. So existieren zwar zahlreiche Varianten zur Substitution der Antennenmaterialien (z. B. Aluminium statt Kupfer) aber die jeweils erforderlichen funktionellen Eigenschaften der RFID Transponder lassen in der Regel keine große Designfreiheit hinsichtlich Materialauswahl. Bei Anwendungen für den Massenmarkt ist außerdem die Optimierung der Transponderpreise ein kritischer Erfolgsfaktor für die kommerzielle Tragfähigkeit der jeweiligen RFID Systeme. Bei RFID-Transpondern für die Kennzeichnung der Verpackungen von Einzelhandelsgütern werden daher ein technologisch mögliches Minimum an Material- und Herstellungskosten angestrebt. Dies bedeutet, dass solche Smart Labels nur ein sehr geringes Potential zur Materialeinsparung aufweisen. Vor diesem Hintergrund sind der materiellen Substitution auf Transponderebene enge Grenzen gesetzt.

Die **technologische Substitution** der RFID Technologie für die Automatisierung der Stoffstromtrennung im Abfallrecycling kann durch andere technologischen Hilfsmitteln bewerkstelligt werden, die nicht auf RFID-Transponder angewiesen sind. Konventionelle Methoden stützen sich auf entsprechend trainierte Arbeitskräfte am Sortierband, traditionelle Methoden der mechanischen Verfahrenstechnik und physikalische Eigenschaften für die Trennung von Wertstoffen (Dichte, Magnetismus, Leitfähigkeit, Infrarot Reflektivität etc.). Solche Trennverfahren sind erprobter Stand der Technik und haben trotz gewisser Nachteile einen hohen Durchsatz. Moderne Verfahren beruhen auf automatisierter Objektidentifikation mittels Laserspektroskopie-Verfahren sowie kamera- und computer-unterstützter Bilderkennung. Diese Verfahren lassen sich zur ökonomisch vorteilhaften Trennung von PET Verpackungen einsetzen (Beispielsweise ging der Deutsche Umweltpreis 2014 an den Entwickler eines solchen Verfahrens). Allerdings könne einige Kunststoffsorten (z. B. schwarz pigmentiertes Plastik) nur **unzureichend** erkannt werden. Mit RFID gelingt es auch solche Kunststoffe im Abfall zu identifizieren, falls diese mit unbeschädigten smarten Labeln gekennzeichnet sind.

Die Notwendigkeit einer Identifikation wertstoffhaltiger Objekte im Abfallstrom lässt sich durch **funktionale Substitution** umgehen, wenn Wertstoffe gar nicht erst in den Abfall gelangen. Vermeidung von Abfallentstehung bzw. Abfall-trennung an der Quelle können dazu beitragen die Ziele der Kreislaufwirtschaft zu erreichen, ohne ein zusätzliches technisches System zu installieren, welches seinerseits auf energie- und ressourcenintensiven Komponenten beruht. Beispielsweise könnte die Ausweitung des existierenden Pfandsystems für PET-Flaschen auf andere Kunststoffverpackungen die gleiche Funktion (Identifikation und Getrenntsammlung wertstoffhaltiger Objekte) übernehmen. In diesem Fall wird die Identifikation und Separierung der Wertstoffe durch ökonomische Anreize (Pfand) geschaffen.

Fazit: Die Identifikation und Abtrennung von Wertstoffen im Recyclingprozess lässt sich mit konventionellen Methoden auch ohne RFID Technik bewerkstelligen. Die existierenden technischen Verfahren der Wertstofftrennung haben physikalisch oder ökonomisch bedingte Unzulänglichkeiten, welche durch Einsatz der RFID Technik umgangen werden könnten. Dazu wäre aber eine lückenlose Ausrüstung aller in Verkehr gebrachten Verpackungen mit RFID Transpondern notwendig. Die Erfolgsaussicht (d. h. Effizienzsteigerung der Wertstofftrennung) einer solchen Systemumstellung auf RFID ist bislang nicht erwiesen.

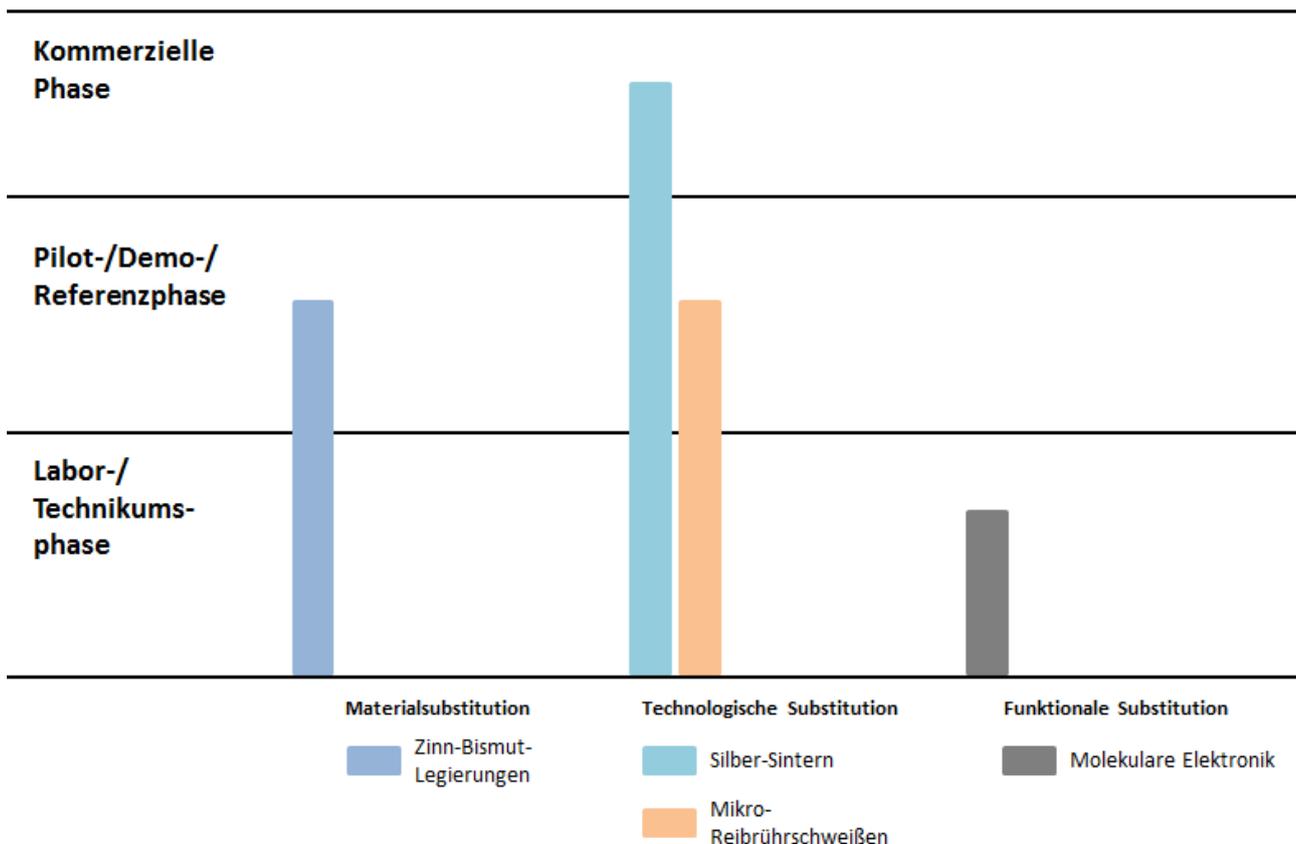
Vor diesem Hintergrund kann eine Kombination konventioneller Methoden als Substitution für die RFID Technologie eine erfolgversprechendere Strategie zur Effizienzsteigerung sein. Maßnahmen zur Abfallvermeidung durch Ökodesign von Verpackungsmaterialien können dazu beitragen, die Unzulänglichkeiten konventioneller Technologien zur Wertstofftrennung zu umschiffen. Beispielsweise ließe sich die Effizienz der Wertstofftrennung durch eine Vereinheitlichung der Verpackungsmaterialien auf wenige und gut identifizierbare Kunststoffsorten steigern. Noch höhere Effizienzpotentiale

liegen in der Abfalltrennung an der Quelle. Eine Ausweitung existierender Pfand- und Rücknahmesysteme auf weitere Verpackungstypen könnte die nachträgliche Identifikation und Abtrennung von Wertstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen von vornherein obsolet machen.

5.5.2 Bleifreie Lote

Bleifreie Lote dienen der Substitution bleihaltiger Lote und bestehen überwiegend aus Zinn mit Zusätzen von Kupfer und Nickel; teilweise kommt auch Silber zum Einsatz, außerhalb Europas wird ferner Bismut zugesetzt [BGR 2014]. Eine Darstellung der Zusammensetzung typischer Lote und ihres Marktanteils befindet sich in [Deubzer 2007]: Die größten Marktanteile sind demnach Lote aus SnAg3.7Cu0.8 (64 %) und SnCu0.7 (21 %).

Abbildung 28: Technologiereife der Substitutionsoptionen für die bleifreien Lote



Quelle: Eigene Darstellung

Zinn-Bismut-Legierungen stellen eine **materielle Substitution** zu den vorherrschenden Zinn-Kupfer- bzw. Zinn-Silber-Kupfer-Loten dar. Der Schmelzpunkt von Zinn-Bismut-Loten (z. B. Sn42Bi57Ag1) ist mit 138 °C sogar deutlich niedriger als der von bleihaltigen SnPb-Legierungen (183 °C), womit sich die thermische Belastung der Bauelemente verringern ließe [IPC 2009]. Allerdings können diese Lote angesichts der begrenzten Verfügbarkeit von Bismut (jährlich 15.000 t) nur für Nischen eingesetzt werden. Eine flächendeckende Umstellung auf Zinn-Bismut-Lote ist deshalb nicht möglich.

Einen Ansatz zur **technologischen Substitution** der bleifreien Löttechnik stellt das so genannte Silber-Sintern dar, welches insbesondere durch die zunehmende Miniaturisierung von elektronischen Schaltungsträgern begünstigt wird. Der große Vorteil der Verbindung mittels dünnen Silberschichten besteht darin, dass keine flüssige Phase entsteht. Andererseits lässt sich der Sinterprozess nicht für

Elektronikkomponenten mit konventionellem Design (z. B. SMD) einsetzen, so dass die Anwendbarkeit in der Massenproduktion von IKT und Unterhaltungselektronik sehr begrenzt ist.

Weitere Möglichkeiten bieten die Technologien „Transient Liquid Phase Bonding“ sowie „Mikro-Reibrührschweißen“, dessen Anwendungsbereich sich jedoch auf ultradünne Bleche und Spezialschaltungen reduziert. Auch diese Technologien eignen sich nicht ohne weiteres für die Anwendung in der Massenproduktion von IKT und Unterhaltungselektronik.

In Zukunft könnte die verstärkte Nutzung der Polymerer Elektronik die derzeit vorherrschende, auf Silizium basierende Elektronik substituieren. Aufgrund dieses Technologiewechsels würde sich folglich auch die Frage der Verbindung und Kontaktierung der einzelnen „Bauteile“ bzw. Bestandteile einer elektronischen Schaltung auf völlig anderer Ebene stellen und deshalb zumindest theoretisch die derzeit bestehende Löttechniken obsolet machen. Eine Marktreife der molekularen Elektronik wird erst in der fernen Zukunft erwartet, das gegenwärtige Entwicklungsstadium beschränkt sich auf die Laborebene [Ferdinand 2009]. Bei der molekularen Elektronik ist es angesichts der geringeren Technologiereife noch nicht möglich, belastbare Aussagen zu den Auswirkungen auf den Ressourcenbedarf kritischer Metalle zu machen. Allerdings ist absehbar, dass Polymerer Elektronik die Silizium Elektronik nicht ersetzen sondern eher ergänzen wird. Dadurch wird ein erhofftes Substitutionspotential eher gering ausfallen.

Fazit: Bezüglich der verschiedenen Substitutionsmöglichkeiten bei bleifreien Loten lässt sich zusammenfassend feststellen, dass kurzfristig v. a. Zinn-Bismut-Legierungen sowie das Silber-Sintern interessante Ansätze darstellen, welche das Stadium der Marktreife bereits erreicht haben oder sich unmittelbar davor befinden. Ob sich durch diese Ansätze alle Funktionalitäten und Einsatzbereiche abgedeckt werden können, welche die derzeit vorherrschenden bleifreien Lote ermöglichen, bedarf einer vertieften Untersuchung. Langfristig könnte durch die Entwicklung einer molekularen Elektronik einen interessanten Substitutionspfad darstellen; die Technologiereife dieser Option ist gegenwärtig aber noch sehr gering.

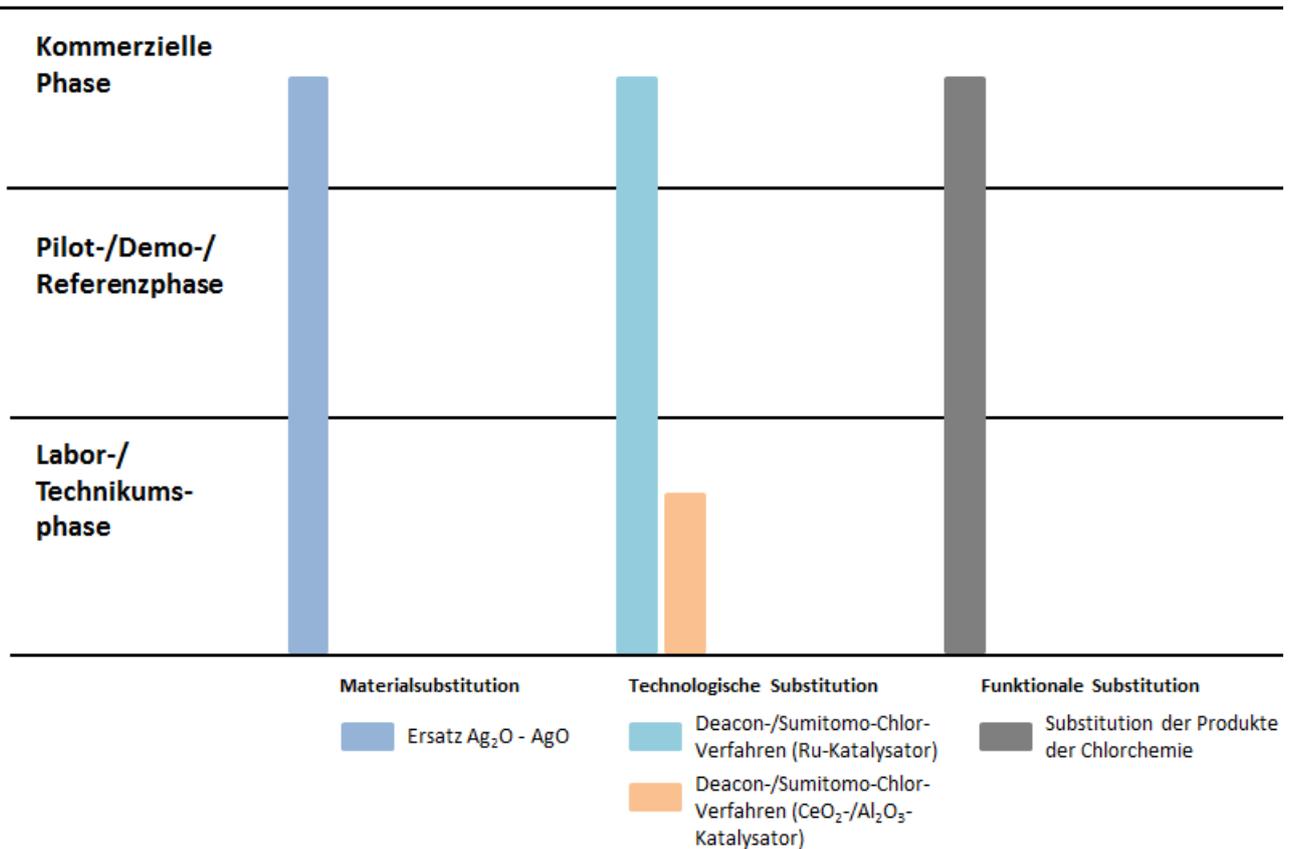
5.5.3 Membranelektrolyse

Für die Chlor-Alkali-Elektrolyse ist derzeit die Membranelektrolyse das Standardverfahren in der Industrie. Eine innovative und ökologisch vorteilhafte Umwelttechnologie stellt die Chlor-Alkali-Elektrolyse mit Sauerstoffverzehrkatode dar. Gegenüber dem bisherigen Membranverfahren können bei der Chlorherstellung 30 % der elektrischen Energie eingespart werden. Neben einer Anlage in Deutschland ist eine weitere Anlage in China seit 2015 Jahr in Betrieb. Da der Markt sehr konservativ ist und die Lebensdauern der Anlagen vergleichsweise groß, verläuft hier eine Marktdurchdringung neuer Technologien vergleichsweise langsam [Bulan 2016].

Eine Sauerstoffverzehrkatode (SVK) besteht aus komplexen Verbundmaterialien und enthält silberbasierte Katalysatoren, die in einer Polytetrafluorethylen (PTFE)-Matrix eingebettet sind. Bezüglich ihrer werkstofflichen Zusammensetzung besteht eine SVK in erster Linie aus Silber und Nickel: Der Silbergehalt der Elektrode liegt bei ca. 70 % und der Nickelgehalt beträgt ca. 25 %; die Polymerkomponente (v. a. PTFE) hat einen Anteil von nur ca. 5 % [Bulan 2015]. Bei den genannten Materialbedarfen ist zu beachten, dass sowohl Silber als auch Nickel während des Betriebs der SVK nicht verbraucht werden, sondern nach Ablauf der Standzeit der SVK (> 4a) abzüglich der Recyclingverluste nahezu vollständig zurückgewonnen werden können [Bulan 2015]. Da während des Betriebs ebenso wie in der Nachgebrauchsphase keine Dissipation der verwendeten Metalle stattfindet besteht auch kein relevanter Ressourcenverbrauch, sondern lediglich eine temporäre „Ressourcenfixierung“. Folglich besteht im Vergleich zu vielen anderen Umwelttechnologien ein deutlich geringerer Bedarf, nach Substitutionsmöglichkeiten zu suchen.

Alle bereits beschriebenen Substitutionsverfahren werden bereits kommerziell betrieben. Lediglich die Verwendung von edelmetalfreien Alternativen beim Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren befindet sich noch in der Forschungs- bzw. Demonstrationsphase (siehe Abbildung 30).

Abbildung 29: Technologiereife der Substitutionsoptionen für die Chlor-Alkali Membranelektrolyse



Quelle: Eigene Darstellung

Für die **materielle Substitution** der Elektrolyse mit Sauerstoffverzehrelektroden haben sich Silberkatalysatoren als besonders geeignet erwiesen. Bei der Herstellung von Sauerstoffverzehrelektroden mit Silber-Katalysator kann das Silber zumindest teilweise in Form von Silber(I)- oder Silber(II)-Oxiden eingebracht werden, welche dann zu metallischem Silber reduziert werden. Faktisch stellt dies aber keine Substitutionsmöglichkeit dar, da Silberoxide wie auch Silber dieselbe Rohstoffbasis haben. Weitere materielle Substitutionsmöglichkeiten sind nicht bekannt.

Für die **technologische Substitution** ist das „Deacon-Verfahren“ derzeit am weitesten entwickelt. Hierbei erfolgt eine Umsetzung von Salzsäure mit Sauerstoff zu Chlor und Wasser. Alkali wird dabei nicht erzeugt. Die Nutzung von Salzsäure als Edukt der Chlorsynthese gilt als wirtschaftlich sinnvoll, da bei vielen technischen Produktionsschritten, die den Einsatz von Chlor erforderlich machen, Salzsäure als Kuppelprodukt anfällt, das mittels des Deacon-Verfahrens zu Chlor rezykliert werden kann. Als Katalysator wird nach dem gegenwärtigen Stand der Technik Rutheniumdioxid (RuO₂) eingesetzt, welches auf einem Träger aus Titandioxid (TiO₂) aufgebracht ist. Kommerzialisiert wurde dieses Verfahren seit 2003 von der japanischen Firma Sumitomo Chemicals. Das Sumitomo-Chlor-Verfahren übertrifft die Chlor-Alkali-Elektrolyse in der Reinheit des gewonnenen Chlors und weist zudem einen „deutlich niedrigeren“ Energieverbrauch auf. [Trieu 2011].

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei einer Substitution der Chlor-Alkali-Elektrolyse durch das Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren Silber derzeit letztlich durch ein noch kritischeres Metall

(Ruthenium) substituiert wird. Andererseits wurden in einem BMBF-Projekt auch edelmetallfreie Alternativen für die **Ruthenium**-Katalysatoren entwickelt; diese bestehen aus Cer- und Aluminiumoxiden [Sawaryn 2011].

Eine **funktionale Substitution** ist grundsätzlich denkbar. Eine sehr weitreichende Substitutionsmöglichkeit der Sauerstoffverzehrkathode auf funktionaler bzw. systemischer Ebene wäre die Substitution der Produkte der Chlorchemie durch alternative (Werk-) Stoffe, z. B. Polyvinylchlorid durch andere Kunststoffe, welche kein Chlor enthalten. Aufgrund der Vielschichtigkeit dieses Marktsegments und den erheblichen Verflechtungen der Chlorchemie mit anderen Sektoren der chemischen Industrie stellt sich jedoch die Frage nach der Praktikabilität einer totalen Chlor-Substitution. Eine fundierte Beantwortung dieser Frage würde allerdings den Rahmen dieser Studie sprengen.

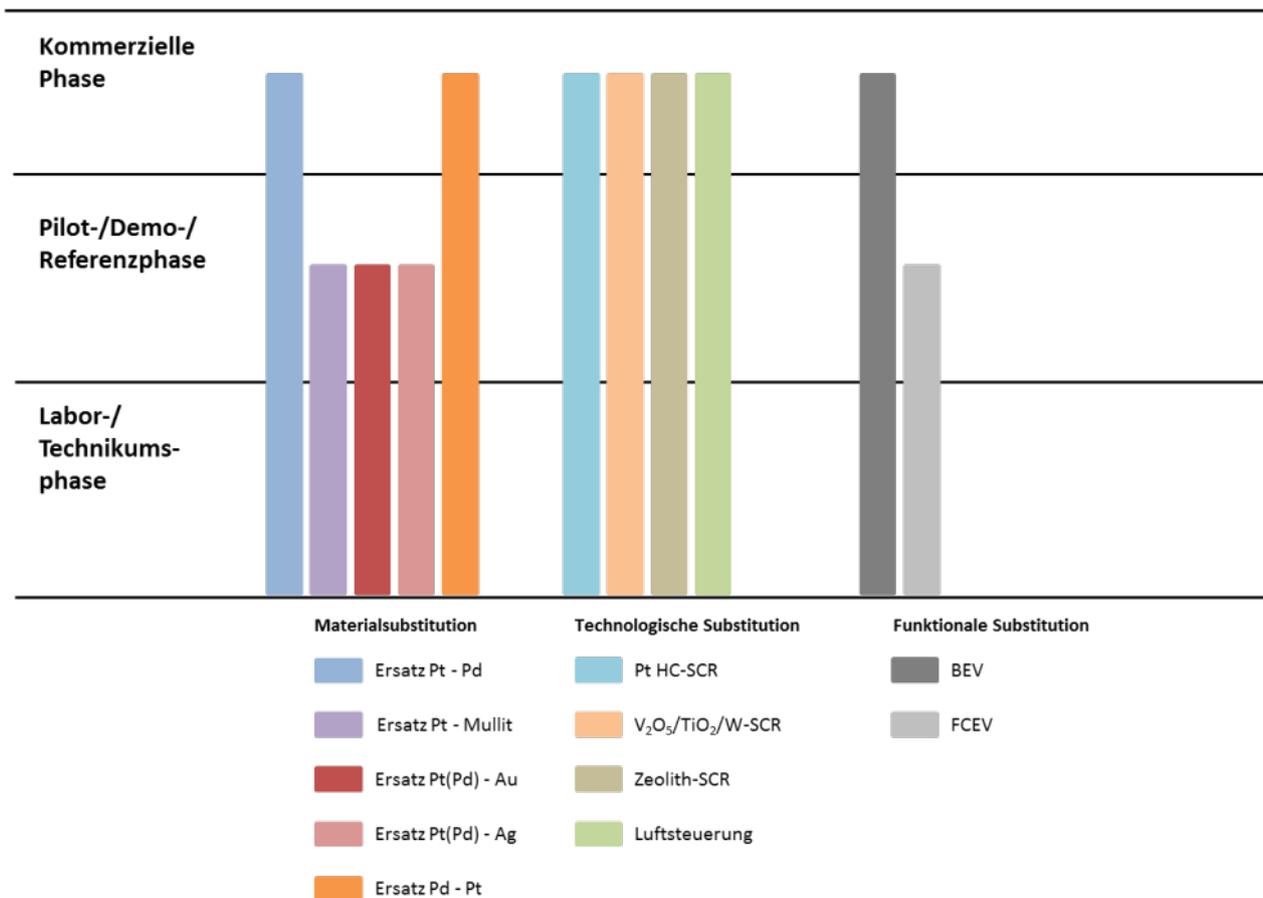
[Sawaryn 2011] beziffert für Deutschland das gesamte Energieeinsparpotential auf ca. 400 Mio. kWh/a, falls die Chlor-Alkali-Elektrolyse komplett durch das Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren substituiert wird. Dies wäre mit einer jährlichen Einsparung von Treibhausgasen in Höhe von 0,3 Mio. t CO₂ verbunden.

Fazit: Für die Sauerstoffverzehrkathode bestehen sowohl materialbezogene und technologische Alternativen, die bereits kommerzialisiert sind. Allerdings ist der Substitutionsbedarf bei der Technologie aufgrund der guten Rezyklierbarkeit der verwendeten Katalysatoren gering.

5.5.4 Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren

Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren haben die Aufgabe die Reaktionen der umwelt- und gesundheitsschädlichen Bestandteile (Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonooxid und Stickstoffoxide) der Motorabgase zu nicht gesundheitsschädlichen Verbindungen (Wasser, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff) zu beschleunigen und bei den im Katalysator gegebenen Bedingungen zu ermöglichen. In ihnen werden die Edelmetalle Palladium, Platin und Rhodium, sowie das Seltenerdmetall Cer eingesetzt, welche hier die kritische Rohstoffen darstellen. Die folgende Abbildung illustriert die Technologiereife der Substitutionsoptionen für Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren.

Abbildung 30: Technologiereife der Substitutionsoptionen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator



Quelle: Eigene Darstellung

Für eine **Materialsubstitution** müssen die relevanten Materialien betrachtet werden. Die beiden am häufigsten zum Einsatz kommenden Edelmetalle im Katalysator sind Platin und Palladium, welche die Oxidationsreaktionen katalysieren. Rhodium dient der Katalyse der Reduktionsreaktionen. Es nimmt nur rund ein Fünftel der eingesetzten Masse an Edelmetallen ein. Cer dient in Form von Cer(IV)-oxid der Speicherung von Sauerstoff um eine Oxidation von Kohlenstoffmonoxid in sauerstoffarmen Abgasgemischen zu ermöglichen.

Platin kann, wie es aus Kostengründen bereits partiell geschehen ist, durch Palladium ersetzt werden. In Dieselmotoren ist dies in beschränkter Form möglich, während eine weitgehende Substitution bei Benzinmotoren möglich ist. Eine Schwefelvergiftung und damit eine Verringerung der Standzeit kann hier allerdings die Folge sein. Aus dem Blickwinkel der Kritikalität ist diese Substitution aber kontraproduktiv. Eine weitere Möglichkeit Platin zumindest in Katalysatoren von Dieselfahrzeugen zu ersetzen ist Noxicat, ein Mineralkatalysator auf Mullitbasis. 2012 ist die Forschung zum Katalysator in Science publiziert worden, allerdings gab es danach keine Meldungen mehr von der Entwicklerfirma Nanostellar, weshalb ein Einsatz in der Praxis bisher fraglich ist. Eine letzte Substitutionsmöglichkeit für Platin im Katalysator ist Gold. Nanostellar hat bereits Tests durchgeführt, allerdings handelte es sich hierbei auch nur um eine Teilsubstitution, so dass Platin und Palladium immer noch notwendig sind. Es ist unsicher, ob Gold einen Stabilitätstest über 100.000 Meilen schaffen könnte ohne seinen Effekt durch Versinterung oder Vergiftung zu verlieren. Platin kann in Dieselpartikelfiltern durch Silber substituiert werden, allerdings müsste diese Einsparung im Filter wieder im Katalysator eingebaut werden, da Silber ein schlechter Oxidationskatalysator ist.

Palladium kann durch Platin ersetzt werden. Der heutige Palladiumanteil im Katalysator ist erst später hinzugefügt worden, als Palladium deutlich günstiger erhältlich war als Platin. Dies würde zwar ein kritisches Material durch ein anderes substituieren, aber Platin ist weniger kritisch als Palladium. Für Palladium gelten die gleichen Substitutionsmöglichkeiten durch Gold sowie Silber, wie sie bei Platin beschrieben sind.

Als **technologische Substitution** bietet sich bei Rhodium die selektive katalytische Reduktion (SCR) an. Hierbei kann eine Kohlenwasserstoff(HC)-SCR mit Platin oder ein Vanadiumpentoxid-/Titandioxid/Wolfram-Katalysator mit Ammoniak eingesetzt werden. Die HC-SCR wird nicht (mehr) eingesetzt, da es hier zu einem Treibstoffmehrverbrauch kommt und Lachgasemissionen entstehen, zudem führt die Alterung des Katalysator dazu, dass höhere Reaktionstemperaturen benötigt werden. Alternativ können Zeolithkatalysatoren mit Kupfer oder Eisen eingesetzt werden, die allerdings eine hohe Temperatur benötigen um zu funktionieren. Bei Dieselfahrzeugen sind die Temperaturen im regulären Betrieb nur schwer zu erreichen und auch bei Benzinfahrzeugen muss die Betriebstemperatur erst erreicht werden bevor der Katalysator richtig arbeitet. Abgesehen von der HC-SCR ist für die vorgeschlagenen Optionen stets eine Zufuhr von Ammoniak notwendig, was in der Praxis durch eine wässrige Harnstoff-Lösung (deutscher Handelsname AdBlue) geschieht.

Der Cerbedarf für den Sauerstoffspeicher könnte durch eine andere Luftsteuerung (sauerstoffreiches Luftgemisch) vermindert werden, führt aber zu anderen Problemen z. B. Reduktion von NO_x mit normalem Katalysator nicht möglich, da die Reduktionsmittel im Abgas wie Kohlenwasserstoffe oder Kohlenstoffmonoxid durch den höheren Sauerstoffanteil vollständig verbrennen und nicht mehr zur NO_x-Reduktion zur Verfügung stehen. Der Einbau einer weiteren Katalysatorkomponente und die bessere Steuerung der Luftzahl können den Cerbedarf minimieren, aber nicht auf null bringen.

Als **funktionale Substitution** bietet sich der Einsatz von anderen Antriebstechnologien wie Elektromotoren, angetrieben über Akkumulatoren (BEV) oder Brennstoffzellen (FCEV), an. Allerdings sind für diese Technologien andere kritische Metalle wie Lithium oder Neodym notwendig.

Fazit: Die am Markt verfügbaren Materialsubstitutionen verringern die Kritikalität nur marginal oder erhöhen sie sogar (Palladium ersetzt Platin). Die übrigen Materialsubstitutionen sind noch in der Entwicklung und ein Marktdurchbruch ist nicht absehbar. Bei den technologischen Substitutionen ist eine Einführung in die Praxis möglich, aber eine deutliche Einsparung an kritischen Metallen ist hier nur für Cer möglich, da bei den übrigen Substitutionsoptionen nur geringe Mengen eingespart werden und zusätzlich andere Metalle eingesetzt werden (z. B. Vanadium). Die funktionale Substitution durch andere Antriebstechnologien benötigt im Fall der Elektrofahrzeuge mit Batterien andere kritische Metalle wie Lithium oder Neodym, kann aber eine vollständige Einsparung des Katalysators und dessen Metalle realisieren.

5.6 Technologien ohne Substitutionsanalyse

Aus den 20 ausgewählten Umwelttechnologien wurden sechs Technologien nicht weiter in der Kritikalitätsauswirkung betrachtet. In den folgenden Unterkapiteln erfolgen eine Kurzbeschreibung der jeweiligen Technologie und eine kurze Begründung, warum diese sechs Technologien nicht weiter im Substitutionsszenario betrachtet wurden.

5.6.1 Grüne Rechenzentren

Rechenzentren bestehen aus einer Vielzahl von Produkteinheiten oder Einzelkomponenten, wie Server, Storage und Netzwerktechnik (IT-Technik) sowie unterbrechungsfreie Stromversorgung, Kühl- und Klimatisierungssysteme und sonstige Infrastruktur wie Brandschutzeinrichtungen, Beleuchtung etc. Je nach Aufbau und Zweck kann die Ausstattung und Konfiguration der Rechenzentren sehr unterschiedlich sein. Als spezifische Einheit wurde die Referenz-Server-Einheit (ASU; Average Server Unit)

definiert, womit unterschiedliche Konfiguration und Spezifikationen der Rechenzentren durchschnittlich abgebildet werden können.

Rechenzentren enthalten sehr viele Metalle, darunter auch solche, die aus Kritikalitätssicht relevant sind. Es wurden 9 kritische Rohstoffe identifiziert: Gallium, Gold, Kupfer, Neodym, Palladium, Platin, Ruthenium, Silber und Zinn. Die Edelmetalle Palladium, Ruthenium und Platin sowie das Halbmetall Gallium gehören zu den Rohstoffen mit hoher Kritikalität. Allerdings ist die Datengrundlage für die Materialinventare von modernen Rechenzentren unzureichend und vorhandene Daten sind teilweise veraltet.

Substitutionsmöglichkeiten auf materieller Ebene sind bei den meisten Elektronikkomponenten schwierig umsetzbar weil die Substitution eines kritischen Metalls meist nur durch andere kritische Metalle möglich ist. Zumeist würde eine Materialsubstitution zu Einbußen in der Leistungsfähigkeit der Rechenzentren führen.

Eine technologische Substitution ist bei Rechenzentren besser realisierbar, zumal fortschreitende technische Innovation bei den meisten Elektronikkomponenten ohnehin eine periodische technische Substitution erforderlich macht. Allerdings sind Ressourceneinspareffekte neuer Technologien nicht per se gegeben, weil moderne Elektronikkomponenten meist ebenfalls kritische Rohstoffe enthalten. Dieser Zielkonflikt besteht auch hinsichtlich der angestrebten Steigerung der Energieeffizienz der Rechenzentren, da energieeffiziente Elektronikkomponenten zumeist ein komplexeres Materialinventar enthalten.

Aus diesem Grund kommen für die Verringerung des Rohstoffbedarfs der Rechenzentren vor allem funktionale Substitutionen in Frage, welche die Steigerung der Funktion (Rechenleistung) pro eingesetzter Material-/Energieeinheit zum Ziel haben:

- ▶ Steigerung der IT-Auslastung durch Virtualisierung
- ▶ Vermeidung von Überdimensionierung/ Redundanz der Infrastruktur
- ▶ Miniaturisierung der integrierten Schaltkreise

Steigerung der IT-Auslastung

IT-Auslastung ist die Prozesslast der IT-Technik im Verhältnis zur maximalen Kapazität der IT-Technik. Mit abnehmender IT-Auslastung sinkt die Effizienz der IT-Technik. Beispielsweise nutzen Server immer noch 30 bis 60 % ihrer maximalen Leistungsaufnahme, auch wenn sie unter 10 % ausgelastet sind [NRDC 2014]. Eine geringe Auslastung bedeutet, dass mehr Server, Storage und Netzwerk bereitgestellt werden müssen, wobei die gleichen Aufgaben und Transaktionen mit deutlich weniger Hardware gestemmt werden könnten. Neben dem höheren Energieverbrauch wird dadurch auch ein Mehrverbrauch von Hardware und somit von Rohstoffen verursacht.

Die Server könnten bei höherer Auslastung für die gleiche Energie deutlich mehr Transaktionen und Aufgaben durchführen als auf niedrigerer Auslastung. Ein hohes Potential für Energie- sowie Materialeinsparung bietet die Virtualisierung und Konsolidierung der IT-Technik. Bei der Virtualisierung von Servern beherbergt ein physischer Server mehrere virtuelle Server, die sich jeweils für den Kunden oder den darauf laufenden Diensten wie eigenständige Server verhalten. Dadurch kann eine deutlich bessere Auslastung der Prozessoren und der Speicher erreicht werden, während gleichzeitig weniger Server bereitgestellt werden müssen. Durch die Konsolidierung von Lasten auf weniger physische Hardware kann der Energie- und Materialverbrauch sowie der Aufwand für die Kühlung erheblich reduziert werden [Prakash et al. 2012]. Je nach der erreichten Verbesserung Auslastung hätte die Virtualisierung der IT-Technik das Potential, den Materialbedarf sowie den Bedarf an kritischen Rohstoffen um 1/3 bzw. ¼ zu reduzieren.

Vermeidung von Überdimensionierung/Redundanz

Eine anforderungsgerechte Dimensionierung der Rechenzentrumsinfrastruktur spielt eine wichtige Rolle für den Materialbedarf. Rechenzentren werden oft deutlich (teilweise um das Zehnfache) größer konzipiert, um möglichen Schwankungen der maximalen Ist-Last aufzufangen. Damit soll eine hohe Verfügbarkeit der Rechenleistung garantiert werden. Die Technologie Cloud Computing bietet enorme Chancen, die Ressourcen in den Rechenzentren effizienter zu nutzen. Mit dem Einsatz neuer Technologien und Bau einer effizienten IT-Infrastruktur, bei der ein Teil der Daten und Prozesse über die Cloud und ein anderer Teil On-Premise oder über Server-Housing verarbeitet werden, könnte eine Auslastung von etwa 70 Prozent erreicht werden. Dadurch könnten Rechenzentren für eine durchschnittliche jährliche Auslastung dimensioniert werden. Bedarfsspitzen für Applikationen lassen sich über eine Public Cloud oder Virtual Private Cloud abdecken.

Miniaturisierung der integrierten Schaltkreise

Durch die zunehmende Miniaturisierung der IT-Komponenten, insbesondere der integrierten Schaltkreise, kommt es zu einer immer stärkeren Verdichtung von Rechenleistung. Dadurch lässt sich nicht nur Halbleitermaterial (Silizium) einsparen, sondern auch Rohstoffe in anderen Elektronikkomponenten. Laut [Stobbe et al. 2015] sind schon heute Serverkonzepte verfügbar, bei denen in einem einzigen Serverschrank 150 oder mehr Server mit je zwei Prozessoren untergebracht sind. Bei speziellen Serverarchitekturen werden sogar bis zu 600 Server pro Rack erreicht. Allerdings könnte die mittels Strukturverkleinerung der integrierten Schaltkreise erzielbare Miniaturisierung ab etwa 2023 an physikalische Grenzen stoßen.

5.6.2 Industriekatalysatoren

Katalysatoren und ihre Anwendung haben eine lange Geschichte die bis zur Antike zurückreicht. In der Neuzeit wurden Katalysatoren dann durch Ostwald definiert. Der erste industrielle Katalysator war das Stickstoffdioxid welches im Bleikammerverfahren zur Herstellung von Schwefelsäure genutzt wurde. Seitdem wurden zahlreiche verschiedene Katalysatoren entdeckt und entwickelt. Aus Kritikalitätssicht sind vor allem Katalysatoren aus den Platingruppenmetallen Rhodium, Palladium, Ruthenium, Iridium und Platin genauer zu betrachten, ebenso wie Silber.

Fazit: Industriekatalysatoren sind sehr spezifisch was ihre Aktivität bezüglich einer Reaktion angeht und es gibt eine große Vielzahl an Reaktionen und Katalysatoren. Dies erschwert eine Substitution immens. Da Industriekatalysatoren aber aus Kostengründen, abgesehen von Ausnahmefällen (Herstellung von Silikon), fast vollständig recycelt werden, würde eine Substitution nur geringe Auswirkungen auf die Kritikalität haben.

5.6.3 Pedelec-Motoren

Ein Pedelec (Pedal Electric Cycle) ist mit einem elektromotorischen Antrieb von bis zu 250 Watt ausgestattet, der beim Anfahren oder am Berg den Fahrer unterstützt. Für die Umwelttechnologie Pedelec wird sowohl die Traktionsbatterie als auch der Elektromotor berücksichtigt. Die Batterie wurde hinsichtlich der Substitutionsalternative untersucht und ist in Kapitel 5.2. beschrieben. Die Pedelec-Motoren besitzen die besondere Anforderung, möglichst leicht und kompakt gebaut zu sein. Somit werden die Motoren eingesetzt, die die höchste Energieeffizienz aufweisen. Dies ist aus heutiger Sicht nur mit einem NdFeB-Permanentmagnet-Motor zu erreichen. Die Fachleute des Fachgesprächs (Oktober 2016) haben dieser Einschätzung zugestimmt. Daher ist der Einsatz einer Substitutionsalternative nicht absehbar.

5.6.4 Synchron-/Asynchron-Generatoren WKA

Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen (WKA) sind Generatoren zur Stromproduktion mit Läufer, die mit dem durch die Netzfrequenz vorgegebenen Drehfeld synchron umlaufen. An dieser Stelle werden ausschließlich fremderregte Synchron-Generatoren betrachtet. An Stelle eines Permanentmagneten erzeugt eine stromführende Spule das Magnetfeld des Läufers. Dies bedingt den Einsatz von Schleifkontakten, was die Lebensdauer des Generators senkt. Zudem sinkt der Gesamtwirkungsgrad aufgrund der Verluste durch den Widerstand der Läuferwicklung. Da die vom Synchron-Generator abgegebene Leistung vom Antrieb abhängt und somit nicht konstant ist, muss sie von einem Umrichter in Spannung und Frequenz an die Anforderungen des Netzes angepasst werden. Der Rotor der Anlage kann daher mit einer variablen Frequenz drehen und so bei jeder Windgeschwindigkeit die optimale aerodynamische Leistung aufnehmen.

Asynchron-Generatoren unterscheiden sich von Synchron-Generatoren durch die Konstruktion des Läufers. Er besteht im Wesentlichen aus einer Reihe an Kupfer- oder Aluminiumstäben, die an ihrem Ende kurzgeschlossen sind, und einem Eisenpaket. Der Läufer benötigt keine Stromzuführung, da das Wechselfeld des Stators eine Spannung in die Stäbe des Käfigs induziert. Es baut sich ein Stromfluss auf und damit ein Magnetfeld. Dafür wird jedoch ein Blindstrom in den Statorwicklungen benötigt. Im Netzbetrieb wird die dafür benötigte Blindleistung vom Netz bezogen. Für WKA mit Asynchron-Generator bedeutet das: Wenn die Windstärke hoch genug ist, wird der Generator als Motor genutzt, um den Läufer (und damit die Rotorblätter der WKA) anzutreiben. Wenn die Synchrondrehzahl erreicht ist, wird in den Generatorbetrieb umgeschaltet. Der Wind beschleunigt den Läufer nun weiter, so dass dieser sich schneller dreht als das mit Netzfrequenz umlaufende Magnetfeld des Stators. Dadurch wird wieder ein Stromfluss in die Läuferstäbe induziert, der seinerseits ein elektromagnetisches Feld aufbaut und so Energie an die Statorwicklungen und damit das Netz abgibt. Asynchron-Generatoren sind sehr robust und günstig. Im Vergleich zu Synchron-Generatoren haben sie jedoch niedrigere Wirkungsgrade.

Fremderregte Synchron- und Asynchron-Generatoren enthalten als kritischen Rohstoff Kupfer. Dieses wird zwar in bedeutendem Maße eingesetzt; auf Grund der konzentrierten Verwendung wird es zum Lebensende der Anlagen jedoch praktisch vollständig wiederverwertet. Daher werden fremderregte Generatoren unter Ressourcengesichtspunkten eher als Substitutionsmöglichkeit für permanenterregte Generatoren (die generell bessere Wirkungsgrade haben) gesehen. Da Windkraftanlagen auf Generatoren angewiesen sind und fremderregte Synchron- und Asynchron-Generatoren hier die im Hinblick auf die eingesetzten Ressourcen unkritischste Lösung bilden (und sich zudem keine möglichen (Teil-) Substitutionen abzeichnen), werden diese Technologien hier nicht weiter betrachtet.

5.6.5 Kraftwerke GuD/Gas

GuD-Kraftwerke (Gas- und Dampf-Kombikraftwerke) nutzen Erdgas zur Erzeugung von Strom. Wesentlich ist die Kombination einer Gas- und einer Dampfturbine – die Gasturbine wird neben der Stromerzeugung als Wärmequelle für einen nachgeschalteten Dampfkreislauf genutzt. Der Wirkungsgrad von GuD-Kraftwerken wird durch die Güte seiner Einzelkomponenten bestimmt. Siemens hat zum Beispiel eine Kombination von Gas- und Dampfturbine gebaut, die einen Wirkungsgrad-Rekord von 60 % (netto) erreicht. Die erzeugte Abwärme kann zur Nah- oder Prozesswärmeversorgung genutzt werden; der elektrische Wirkungsgrad sinkt dabei, der Gesamtwirkungsgrad jedoch wird weiter erhöht. GuD-Kraftwerke können sehr flexibel gesteuert werden. In einem Energieversorgungssystem mit hohem Anteil regenerativer Energien können sie die Residuallast und Regelleistung bereitstellen und der Frequenzunterstützung dienen. Wichtig ist hierbei die Schwarzstartfähigkeit (darunter versteht man die Fähigkeit eines Kraftwerks(blocks), unabhängig vom Stromnetz vom abgeschalteten Zustand ausgehend hochzufahren). Zudem weisen sie sehr geringe Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen auf. Ein Faktor, der wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad hat, ist die Eintrittstemperatur an der Gasturbine. Diese liegen heute üblicherweise bei ca. 1300 °C, und damit höher als die ma-

ximal zulässigen Materialgrenztemperaturen. Nur durch optimierte Kühlkonzepte können solche Temperaturen gefahren werden. Das am häufigsten eingesetzte Kühlmedium ist dabei Luft, auch eine Dampfkühlung wird vereinzelt realisiert.

Die kritischen Rohstoffe, die in GuD-Kraftwerken eingesetzt werden, finden sich entweder als Kupfer in Stromleitern oder als Legierungselemente. Da Kupfer hier nicht-dissipativ eingesetzt wird, ist eine praktisch vollständige Wiederverwertung zu erwarten. Eine Substitution wird in der Praxis nicht diskutiert. Die eingesetzten Legierungselemente stellen (global betrachtet) einen sehr geringen Anteil der insgesamt genutzten Menge an diesen Rohstoffen dar.

5.7 Fazit des Substitutionspotentialscreenings

Das Substitutionspotentialscreening und die Diskussion mit Fachleuten im Rahmen eines Fachgesprächs haben gezeigt, dass das Substitutionspotential bei den betrachteten Umwelttechnologien unterschiedlich ausfällt. Bei einigen Technologien sind Substitute bereits auf dem Markt vorhanden, wodurch die kritischen Rohstoffe vollständig ersetzt werden können. Hierzu zählt zum Beispiel der Elektroantriebsmotor der vollelektrischen Fahrzeuge (BEV), der durch den Seltene-Erden-freien Asynchronmotor substituiert werden kann. Bei anderen Technologien konnten keine Substitutionsalternativen identifiziert werden, wie zum Beispiel bei den Industriekatalysatoren. Die 20 untersuchten Umwelttechnologien können hinsichtlich ihres Substitutionspotentials in vier Gruppen geclustert werden:

- a) Umwelttechnologien, für die bereits heute Substitutionsalternativen auf den Markt vorhanden sind und kritische Metalle substituiert werden. Hierunter fallen die bleifreien Lote, Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren, Elektroantriebsmotoren in BEV, Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie, Dünnschicht-Solarzellen, Tandemzellen, CSP-Technologie und RFID.
- b) Umwelttechnologien, die marktreife Alternativen besitzen mit deutlicher Reduzierung des Einsatzes der als kritisch identifizierten Metalle. Dazu zählen die Umwelttechnologien der Pedelec-Batterien, Hybridmotoren, Elektroantriebsmotoren der PHEV, Lithium-Ionen-Stromspeicher und Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge
- c) Umwelttechnologien, die Substitutionsoptionen besitzen, welche 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. Darunter fallen die weiße LED sowie Permanentmagnet-Generatoren für WKA.
- d) Umwelttechnologien, für die keine Substitutionsmöglichkeiten im Rahmen des Projektes identifiziert werden konnten. Dazu zählen grüne Rechenzentren, Industriekatalysatoren, Pedelec-Motoren, Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen, Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen und Kraftwerke GuD/Gas.

6 Auswirkungen eines Substitutionsszenarios auf die Rohstoffkritikalität im Bereich Umwelttechnologien

Mit Hilfe eines Substitutionsszenarios sollen die Auswirkungen auf die Kritikalität der Rohstoffe im Vergleich zum Green Economy-Szenario ermittelt werden. Hierfür wird zunächst ein Substitutionsszenario abgestimmt, in dem für die 14 Umwelttechnologien mit identifiziertem Substitutionspotential das Marktpotential der jeweiligen Substitutionsalternativen abgeschätzt wurde. Eine detailliertere Ausführung zu dieser Analyse ist in Arbeitsbericht 5 dargestellt.

6.1 Erklärung des Substitutionsszenarios am Beispiel von Elektroantriebsmotoren in PKW

Am Beispiel der Elektroantriebsmotoren für den vollelektrischen Pkw (BEV) und Plug-in-Hybrid (PHEV) wird das Substitutionsszenario erklärt. Die Ursprungstechnologie des Elektroantriebsmotors in einem BEV und PHEV ist der NdFeB-Permanentmagnet. Im Green Economy-Szenario wird davon ausgegangen, dass 100 % der Elektroantriebsmotoren mit dem NdFeB-Permanentmagnet ausgestattet sind.

Für die in Kapitel 5 ausgeführten Substitutionsoptionen werden im Folgenden Marktpotentiale in 2025 und 2050 im Vergleich zum Green Economy-Szenario abgeschätzt. Die Marktanteile für den BEV sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 29: Substitutionsszenario des Elektroantriebsmotors für BEV

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Asynchronmotor	10 %	15 %
Asynchronmotor mit hoher Drehzahl	0 %	5 %
Extern erregte Synchronmotor	10 %	20 %
Sonstige Permanentmagnete	0 %	5 %
geschalteter Reluktanzmotor	0 %	5 %
Reduzierter SEE-Gehalt	50 %	35 %
Gesamt	70 %	85 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Es zeichnet sich bereits heute ab, dass es bis 2050 einen Mix an verschiedenen Motorentypen in voll-elektrischen Pkw geben wird. Die Einschätzungen des Marktanteils der Substitutionsalternativen der NdFeB-Permanentmagnete in BEV basieren auf den folgenden Annahmen:

- ▶ Der Asynchronmotor ist bereits heute im Markt verbreitet (Tesla S). Daher wird angenommen, dass der Einsatz dieser Technologie einen gewissen Marktanteil einnimmt mit 10 % in 2025 und 15 % in 2050.
- ▶ Der extern erregte Synchronmotor (EESM) ist ebenso schon heute im Markt vertreten (Renault Zoe). Daher wird angenommen, dass in 2025 etwa 10 % der Ursprungstechnologie und 2050 etwa 20 % durch den EESM substituiert werden können.
- ▶ Die Motorentypen Asynchronmotor mit hoher Drehzahl, geschalteter Reluktanzmotoren und sonstige Permanentmagnete befinden sich heute noch nicht im Markt und sind daher mit einem Markteintritt in 2050 mit 5 % eingegangen.
- ▶ Das größte Potential wird in der Steigerung der Materialeffizienz gesehen. NdFeB-Permanentmagneten in Elektroantriebsmotoren der BEV mit einem reduzierten Seltenen Er-

den-Gehalt ist bereits heute verbaut (BMW i3). Daher ist ein Marktanteil der Ursprungstechnologie in 2025 von 50 % und 2050 von 35 % angenommen.

Das Substitutionsszenario für den Elektroantriebsmotor der vollelektrischen Pkw zeigt ein großes Potential der Substitutionsalternativen.

Das Substitutionsszenario des NdFeB-Permanentmagneten in PHEV weicht vom BEV dahingehend ab, dass die Substitutionsalternativen ein niedrigeres Marktpotential aufweisen. Dies liegt daran, dass in einem PHEV der Druck auf den Bauraum durch den Einsatz von einem Verbrennungs- und einem Elektromotor deutlich größer ist. Im vollelektrischen Pkw ist nur der Elektromotor verbaut ohne weiteren konventionellen Motor, was mehr Bauraum für den Elektromotor zulässt.

Das Substitutionsszenario für den PHEV wird wie folgt abgeschätzt.

Tabelle 30: Substitutionsszenario des Elektroantriebsmotors für PHEV

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Asynchronmotor	5 %	15 %
Asynchronmotor mit hoher Drehzahl	0 %	5 %
Extern erregte Synchronmotor	0 %	5 %
Sonstige Permanentmagnete	0 %	5 %
geschalteter Reluktanzmotor	0 %	5 %
Reduzierter SEE-Gehalt	50 %	50 %
Gesamt	55 %	85 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Auch für den Elektroantriebsmotor im PHEV wird davon ausgegangen, dass es einen Mix an Technologien in 2050 geben wird. Die Einschätzungen des Marktpotentials der Substitutionsalternativen zum NdFeB-Permanentmagneten in PHEV basieren auf folgenden Annahmen:

- ▶ Der Asynchronmotor befindet sich heute im Pilotstadium. Es wird ein Marktpotential an PHEV in 2025 von 5 % angenommen und in 2050 von 15 %. Da dieser Motorentyp im BEV heute schon im Einsatz ist, wird hier die höchste Durchdringung im Vergleich zu den anderen SEE-freien Motoren im Pilotstadium angenommen. Da in PHEV sowohl konventioneller wie auch E-Motor benötigt wird, ist hier der Raumbedarf der Motoren von besonderer Bedeutung.
- ▶ Die Motorentypen Asynchronmotor mit hoher Drehzahl, geschalteter Reluktanzmotor und sonstige Permanentmagnete (z. B. Ferritmagnete) befinden sich heute noch nicht im Markt und sind daher mit einem Markteintritt in 2050 mit 5 % in das Substitutionsszenario eingegangen.
- ▶ Auch beim PHEV wird das größte Potential in der Materialeffizienz erwartet. Der reduzierte SEE-Gehalt ohne schwere SEE ist bereits heute im Einsatz (Honda). In 2025 und 2050 wird angenommen, dass jedes zweite PHEV mit diesem Motor ausgestattet ist. Im PHEV ist sowohl ein konventioneller wie auch ein E-Motor eingebaut. Daher sind hier der Raumbedarf der Motoren und die Leistungsdichte der Motoren von besonderer Bedeutung. Es wird davon angenommen, dass die Mehrzahl der PHEV auch in 2050 mit NdFeB-Permanentmagnet-Motoren ausgestattet sein wird und die Mehrzahl davon mit reduziertem SEE-Gehalt.

Auch das Substitutionsszenario für den Elektroantriebsmotor der Plug-in-Hybriden Pkw zeigt bis 2050 ein deutliches Substitutionspotential von 85 % der Ursprungstechnologie.

6.2 Wesentliche Änderungen des Rohstoffbedarfs auf Technologieebene am Beispiel von Elektroantriebsmotoren in PKW

Auf Basis des Substitutionsszenarios wird der Rohstoffbedarf der einzelnen Umwelttechnologien für das Substitutionsszenario ermittelt und dem Green Economy-Szenario gegenübergestellt. Die Betrachtung der eingesetzten Rohstoffe ist wichtig, um einen möglichen Mehrbedarf an anderen Rohstoffen für die Substitutionsalternativen zu erfassen.

Für die Elektroantriebsmotoren der BEV und PHEV ist im Substitutionsszenario eine deutliche Reduzierung des Bedarfs an den kritischen Seltenen Erden sowie an Gallium in 2025 aber vor allem in 2050 zu verzeichnen. Die Seltenen Erden Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium weisen in 2050 mit über 60 % einen deutlich niedrigeren Bedarf im Substitutionsszenario auf. Auch der Galliumbedarf sinkt in 2050 um fast die Hälfte. Dieser verminderte Bedarf geht zum einen auf Substitutionstechnologien zurück, die keine Permanentmagnete mit Seltenen Erden einsetzen, wie der Asynchronmotor, der Extern erregte Synchronmotor oder die sonstigen Permanentmagnete. Die SEE-Permanentmagnete mit reduziertem Seltenen Erden-Gehalt dämpfen ebenfalls den Bedarf nach Seltenen Erden deutlich (bis zu 50 % in 2050). Somit können die Bedarfe der kritischen Seltenen Erden durch den Einsatz von Substitutionsalternativen deutlich reduziert werden.

Das Substitutionsszenario geht aber auch einher mit einem erhöhten Kupferbedarf in 2025 und 2050. Der Kupferbedarf steigt in 2050 um ca. 50 %. Dies ist auf die Substitutionstechnologien ohne Seltenelemente zurückzuführen, die aufgrund der niedrigeren Effizienz und Leistungsdichte einen erhöhten Bauraumbedarf und somit erhöhten Kupferbedarf aufweisen.

Tabelle 31: Globale Rohstoffbedarf UT Nr. 38 (Elektromotoren: BEV und PHEV) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green Economy (in Tonnen)

	Substitutionsszenario		Green Economy	
	2025	2050	2025	2050
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

Quelle: Eigene Zusammenstellung

6.3 Wesentliche Änderungen des Rohstoffbedarfs aus Rohstoffperspektive

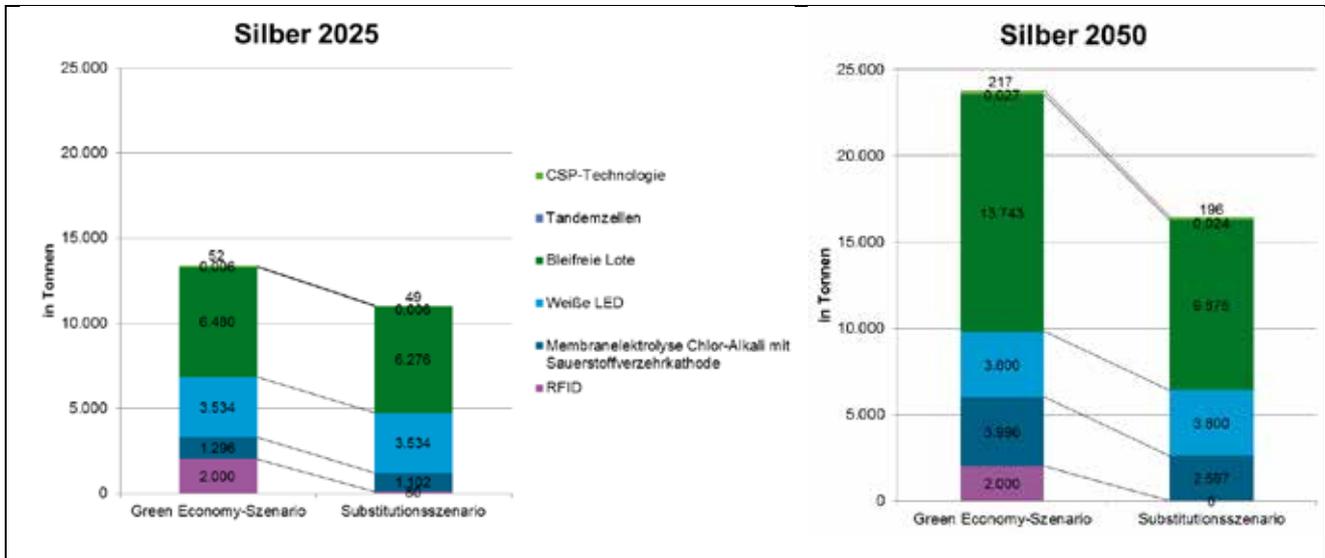
Wesentliche Änderungen des Rohstoffbedarfs der untersuchten Umwelttechnologien im Substitutionsszenario gegenüber dem Green Economy-Szenario ergeben sich bei den im Folgenden beschriebenen Rohstoffen. Dabei ist v. a. eine Reduktion des Rohstoffbedarfs im Substitutionsszenario zu verzeichnen. Nur bei Platin kommt es zu einer Zunahme des Rohstoffbedarfs.

6.3.1 Silber

Der Bedarf von Silber kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 gegenüber dem Green Economy-Szenario reduziert werden. In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 17 % bzw. 2.300 Tonnen (siehe folgende Abbildung links). Die größten Einsparungen können bei den RFIDs erzielt werden (-1.920 t). In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario

bei über 30 % bzw. knapp 7.300 Tonnen (siehe folgende Abbildung rechts). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei den bleifreien Loten mit ca. 3.900 Tonnen und RFID mit 2.000 Tonnen.

Abbildung 31: Silberbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



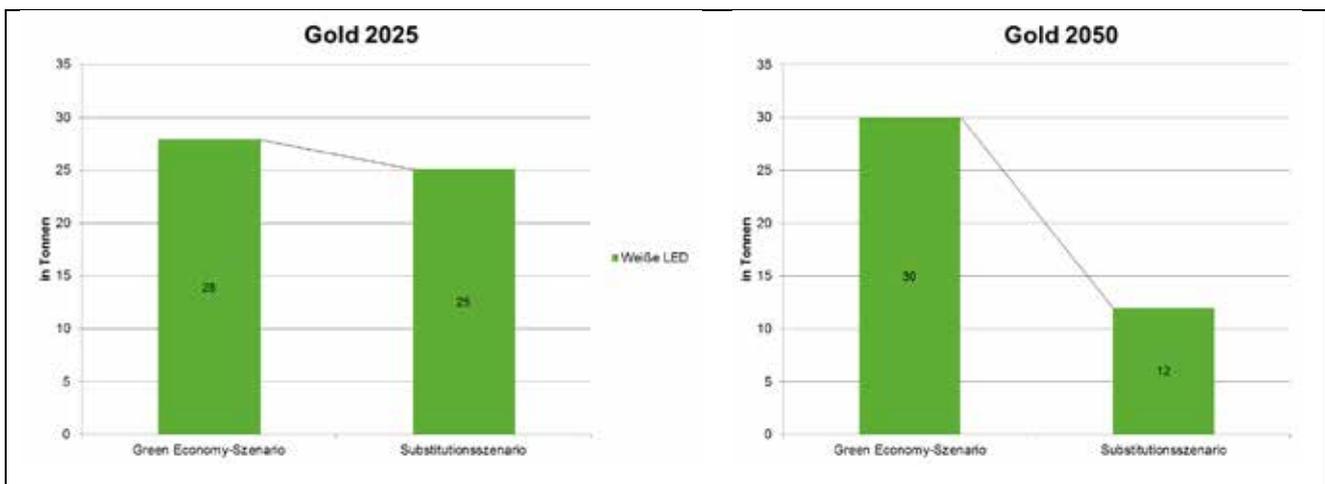
Quelle: Eigene Darstellung

6.3.2 Gold

Gold wird in den betrachteten Umwelttechnologien bezüglich der Substitutionsmöglichkeiten nur bei den weißen LED eingesetzt. Der Bedarf von Gold kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 durch den Einsatz von OLEDs reduziert werden.

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 10 % bzw. 3 Tonnen und in 2050 bei 60 % bzw. 18 Tonnen (siehe Abbildung unten).

Abbildung 32: Goldbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)

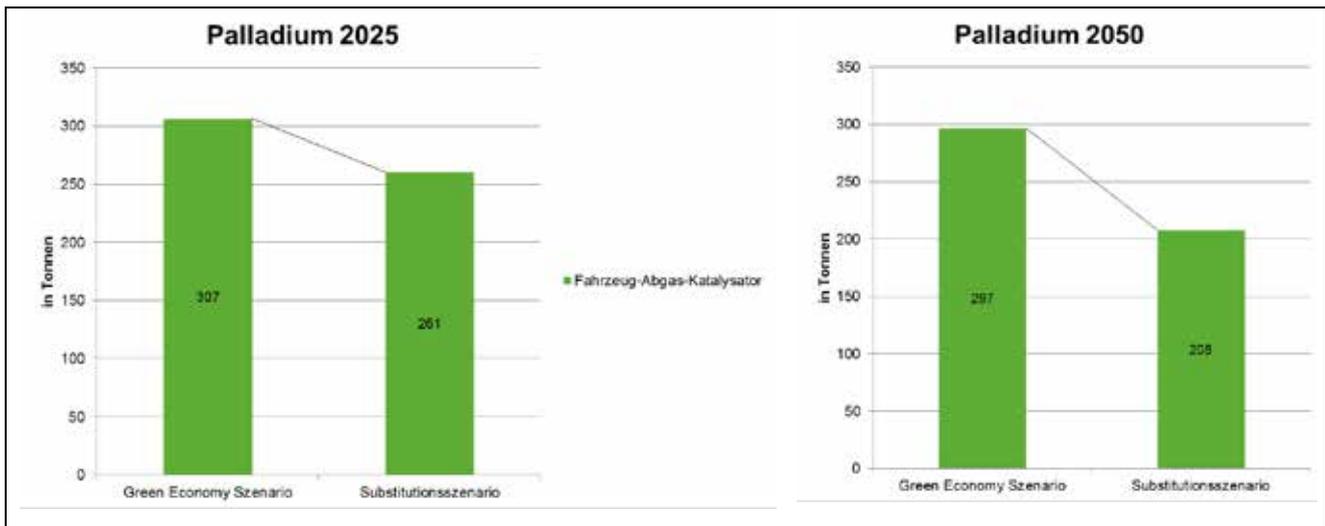


Quelle: Eigene Darstellung

6.3.3 Palladium

Palladium wird in den betrachteten Umwelttechnologien bezüglich der Substitutionsmöglichkeiten nur im Auto-Abgas-Katalysator eingesetzt. Der Bedarf von Palladium kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 durch die Substitution mit Platin reduziert werden. In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario gegenüber dem Green Economy-Szenario bei 15 % bzw. 46 Tonnen und in 2050 bei 30 % bzw. 89 Tonnen (siehe Abbildung unten).

Abbildung 33: Palladiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

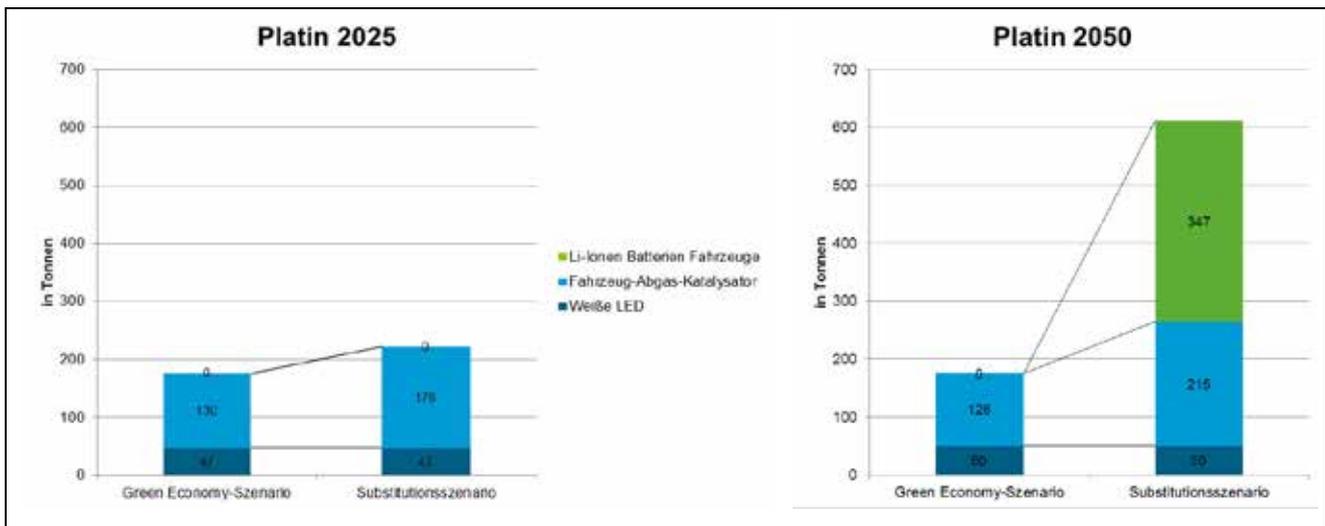
6.3.4 Platin

Der Bedarf von Platin steigt im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 im Vergleich zum Green Economy-Szenario.

In 2025 liegt der Mehrbedarf im Substitutionsszenario bei 26 % bzw. 46 Tonnen (siehe Abbildung unten links). Dieser zusätzliche Bedarf generiert sich aus den Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren, wo Palladium teilweise durch Platin ersetzt wird.

2050 liegt der Mehrbedarf an Platin im Substitutionsszenario bei knapp 250 % bzw. 436 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Der zusätzliche Bedarf beruht ebenso auf den Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren mit 89 Tonnen (Palladium wird teilweise durch Platin ersetzt). Der größte Mehrbedarf in 2050 stammt aber von den Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge aufgrund der Substitution von Lithium-Ionen-Batterien mit Brennstoffzellen (knapp 350 Tonnen).

Abbildung 34: Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



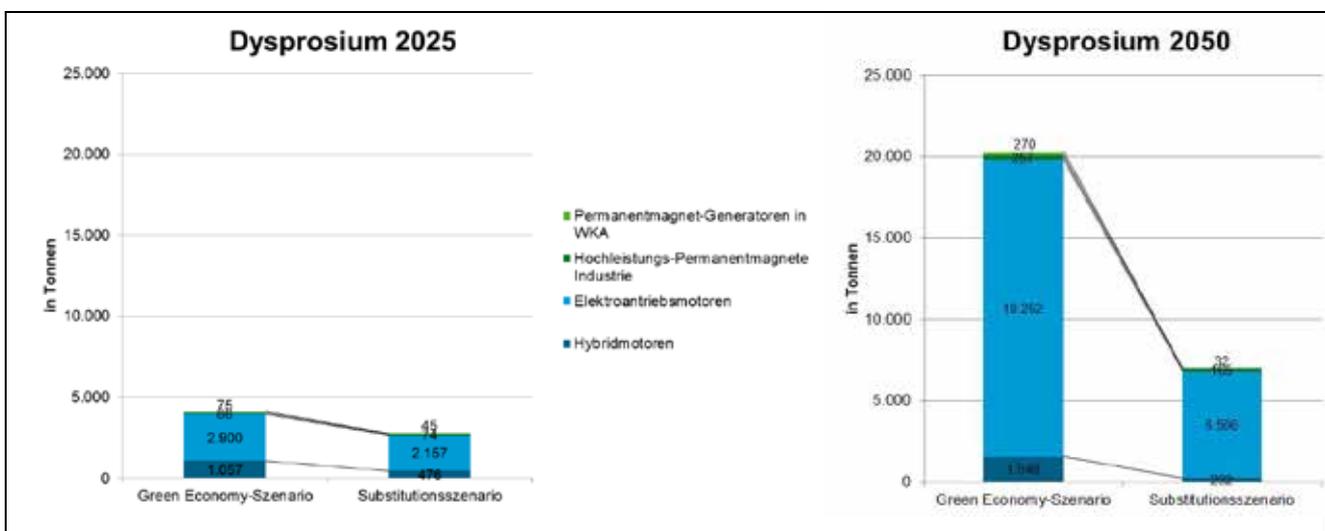
Quelle: Eigene Darstellung

6.3.5 Seltenerdelemente: Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym

Die Seltenen Erden Dysprosium, Terbium, Neodym und Praseodym werden in den Motoren- und Generatoren-Technologien eingesetzt. Ihr Reduktionspotential im Substitutionsszenario im Vergleich zum Green Economy-Szenario liegt bei allen vier Seltenen Erden in 2050 bei knapp über 60 %. Hier können deutliche Einsparungen durch Materialeffizienz oder andere technologische Substitutionsalternativen erreicht werden.

Das Einsparpotential für **Dysprosium** liegt in 2025 bei 33 % bzw. knapp 1.300 Tonnen (siehe Abbildung unten links). Dabei können die größten Einsparungen bei den Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV mit 742 Tonnen und bei den Hybridmotoren mit 50 Tonnen erzielt werden. In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 66 % bzw. 13.300 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Die größten Einsparpotentiale liegen auch in 2050 bei den Elektroantriebsmotoren mit 11.700 Tonnen und bei den Hybridmotoren mit 1.300 Tonnen.

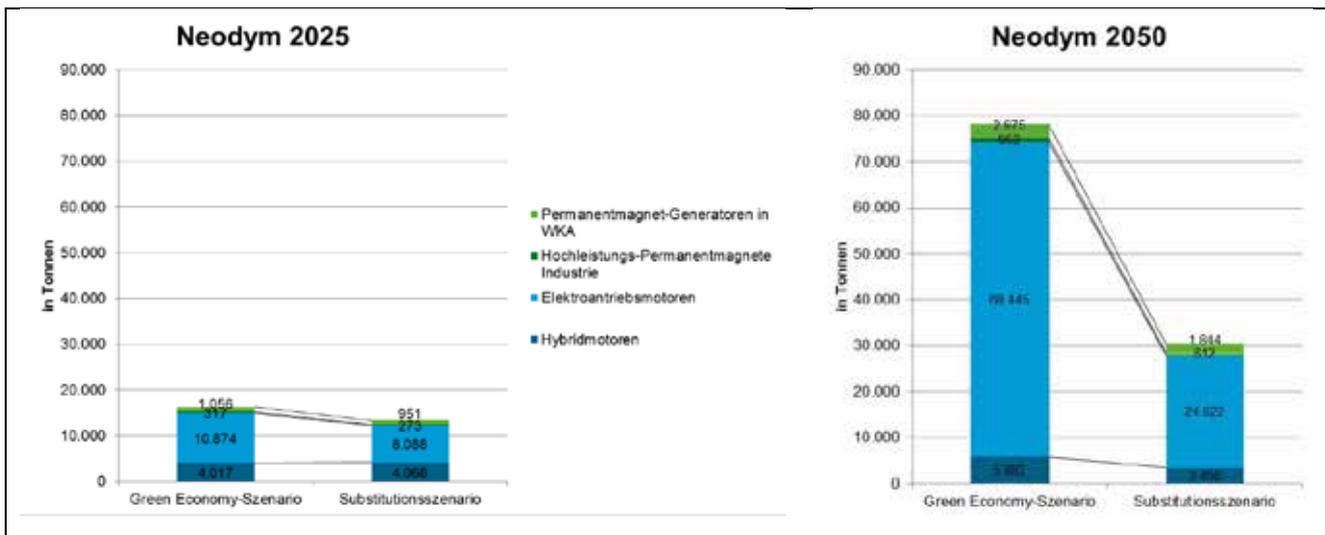
Abbildung 35: Dysprosbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

Bei **Neodym** liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario in 2025 bei 18 % bzw. knapp 2.900 Tonnen (siehe Abbildung unten links). Die größten Einsparungen können dabei bei den Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV mit 2.800 Tonnen erzielt werden. In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 61 % bzw. knapp 48.000 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei den Elektroantriebsmotoren mit 43.800 Tonnen, den Hybridmotoren mit 2.400 Tonnen und Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen mit 1.100 Tonnen.

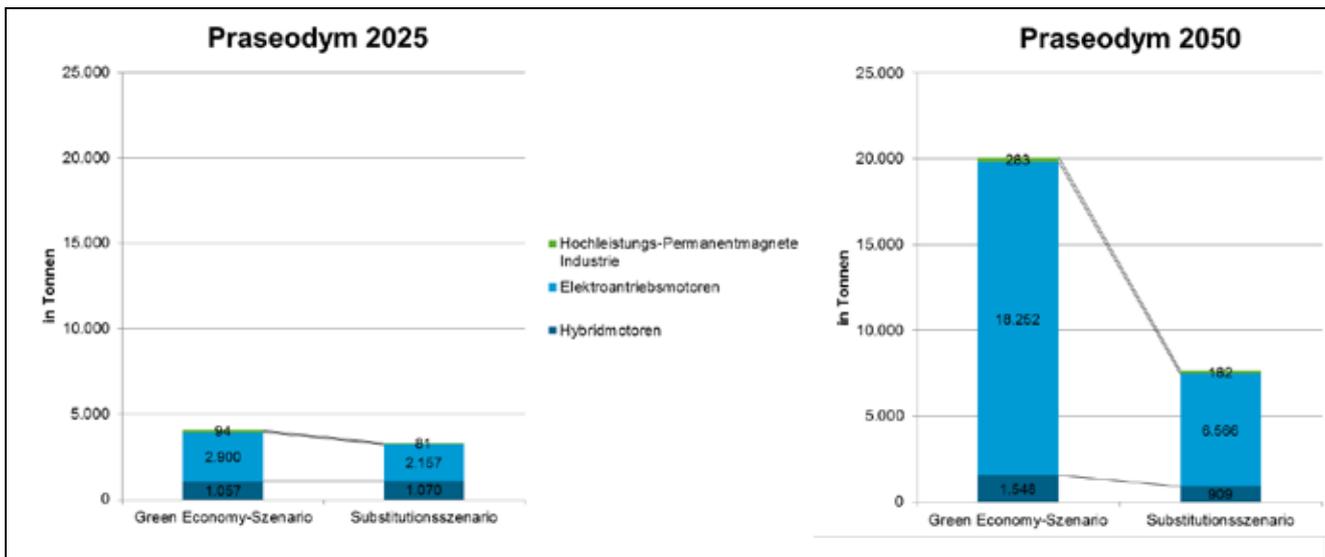
Abbildung 36: Neodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

Für **Praseodym** liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario in 2025 bei 18 % bzw. 740 t (siehe Abbildung unten rechts). Die größten Einsparungen können dabei bei den Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV mit 740 Tonnen erzielt werden. Die Einsparung von 13 Tonnen bei den Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie heben sich mit dem Mehrbedarf von 13 Tonnen bei den Hybridmotoren wieder auf. In 2050 liegt das Praseodym-Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 62 % bzw. knapp 12.500 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 ebenfalls bei den Elektroantriebsmotoren mit knapp 12.000 Tonnen.

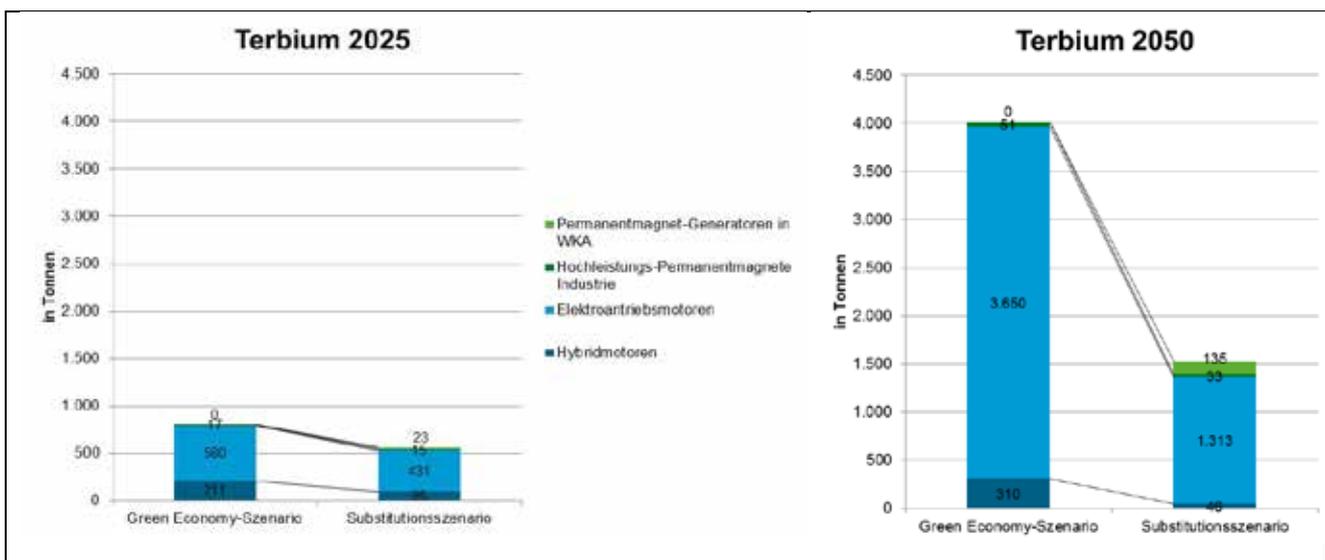
Abbildung 37: Praseodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

Bei **Terbium** ist das Einsparpotential im Substitutionsszenario in 2025 mit 30 % bzw. 245 Tonnen beziffert (siehe Abbildung unten links). Die größten Einsparungen können bei ebenfalls bei den Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV mit knapp 150 Tonnen und den Hybridmotoren mit 116 Tonnen erzielt werden. Ein Mehrbedarf an Terbium von 23 Tonnen ist bei den Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen zu verzeichnen. In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 62 % bzw. knapp 2.500 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 wiederum bei den Elektroantriebsmotoren mit 2.300 Tonnen.

Abbildung 38: Terbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)

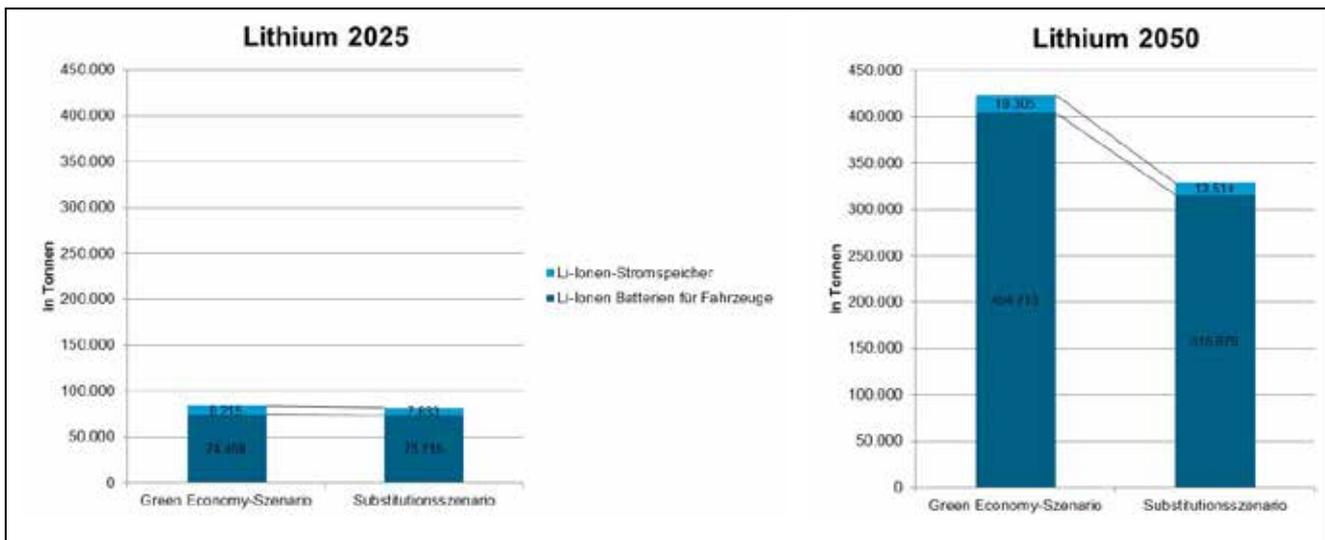


Quelle: Eigene Darstellung

6.3.6 Lithium

Der Lithiumbedarf kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 reduziert werden. In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 3 % bzw. 2.100 Tonnen und in 2050 bei 22 % bzw. knapp 95.000 Tonnen (siehe Abbildung unten links). Die größten Einsparungen in 2025 können bei den Lithium-Ionen-Stromspeichern mit knapp 1.400 Tonnen erzielt werden. In 2050 liegt das größte Einsparpotential bei den Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen mit 89.000 Tonnen.

Abbildung 39: Lithiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)

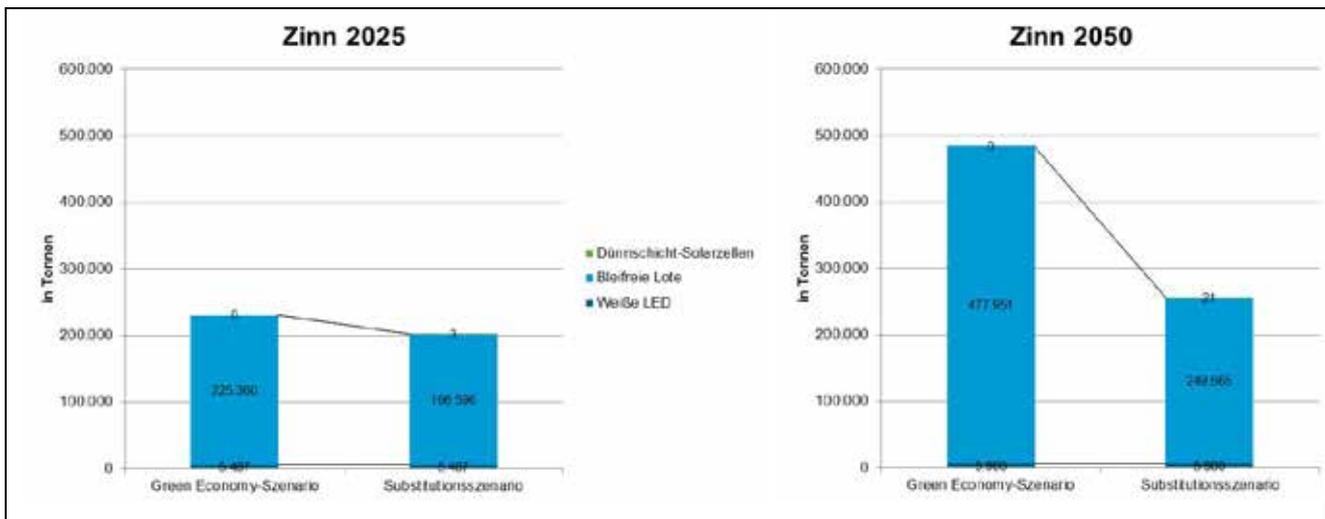


Quelle: Eigene Darstellung

6.3.7 Zinn

Der Zinnbedarf kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 reduziert werden. In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 12 % bzw. knapp 29.000 Tonnen und in 2050 bei 47 % bzw. knapp 230.000 Tonnen (siehe Abbildung unten). Die Einsparung in 2025 ist ausschließlich auf Substitutionsalternativen bei den bleifreien Loten mit knapp 29.000 Tonnen zurückzuführen. Hier benötigt die Substitutionsalternative „Silber-Sintern“ kein Zinn mehr und die Alternative „Zinn-Bismut-Legierung“ deutlich weniger Zinn als in der ursprünglichen Technologie. Der Zinnbedarf bei den weißen LED ist in beiden Szenarien unverändert. Dünnschicht-Solarzellen zeigen einen zusätzlichen Zinnbedarf im Substitutionsszenario durch den Einsatz von CZTS-Zellen. In 2050 liegt das Zinn-Einsparpotential ebenso nur bei den bleifreien Loten mit knapp 230.000 Tonnen. Durch die weitere Marktdurchdringung der Substitutionsalternativen liegt das Einsparpotential deutlich höher.

Abbildung 40: Zinnbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)

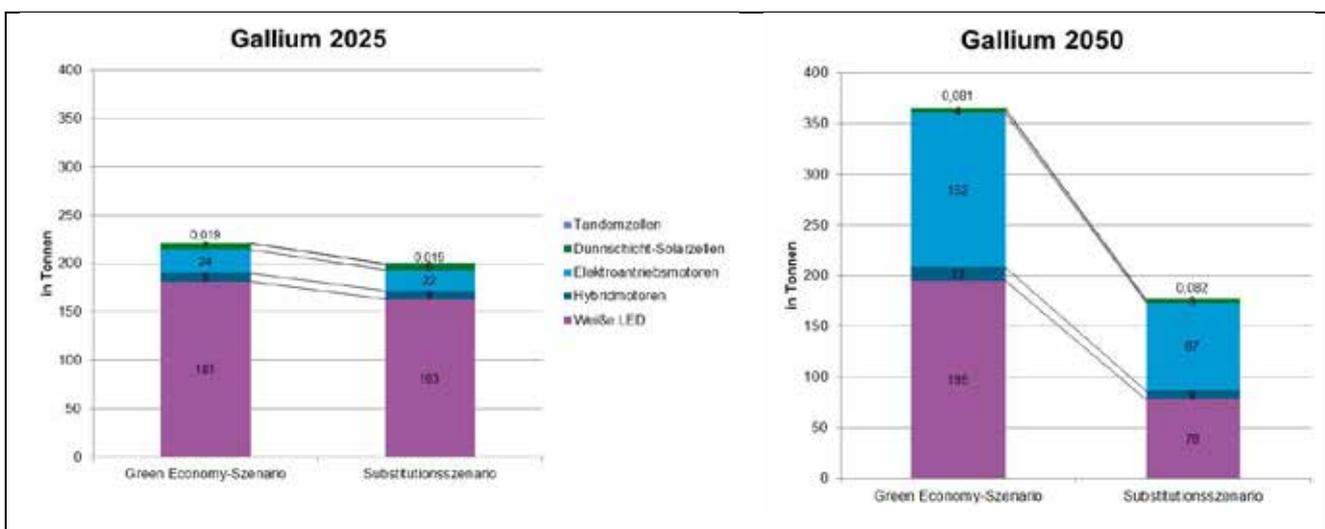


Quelle: Eigene Darstellung

6.3.8 Gallium

Auch der Bedarf von Gallium kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 reduziert werden. In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 10 % bzw. 21 Tonnen (siehe Abbildung unten links). Diese Einsparungen können v. a. bei den weißen LED mit 18 Tonnen erzielt werden. In 2050 liegt das Gallium-Einsparpotential im Substitutionsszenario bei über 50 % bzw. 188 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 neben den weißen LED mit 117 Tonnen bei den Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV mit 65 Tonnen.

Abbildung 41: Galliumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



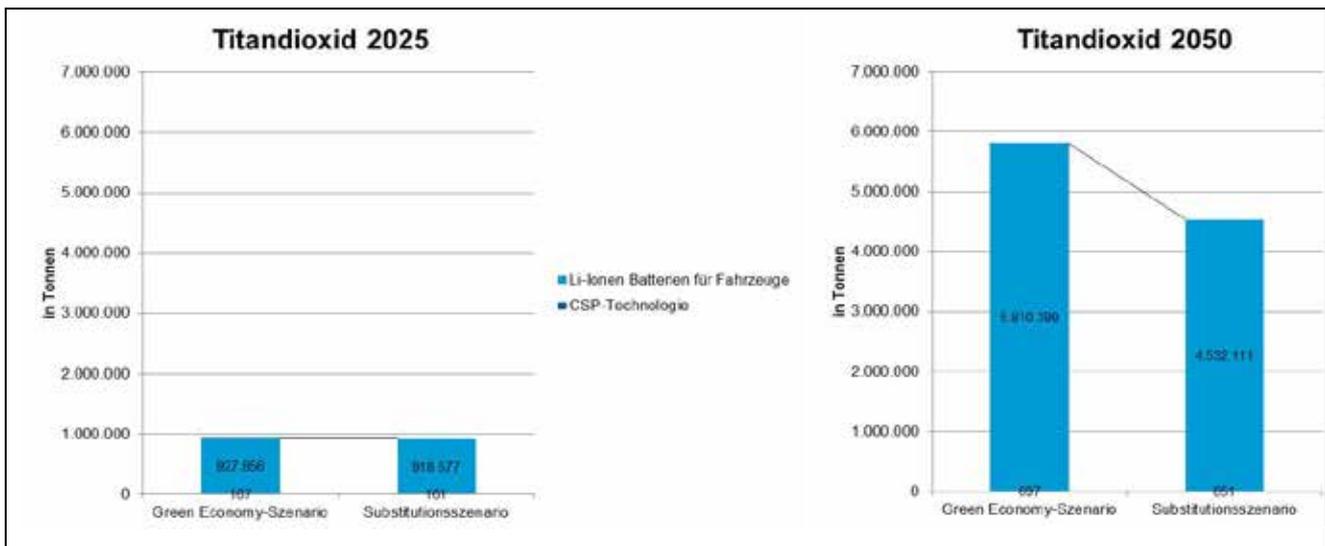
Quelle: Eigene Darstellung

6.3.9 Titandioxid

Der Bedarf an Titandioxid kann im Substitutionsszenario in 2025 und 2050 reduziert werden. In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 1 % bzw. rund 9.000 Tonnen. Die Abnahme des

TiO₂-Bedarfs im Substitutionsszenario ist v. a. bei den Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen mit knapp 9.300 Tonnen (bzw. 1 %) möglich (siehe Abbildung unten links). In 2050 liegt das Einsparpotential an TiO₂ im Substitutionsszenario bei 22 % bzw. rund 1.300.000 Tonnen (siehe Abbildung unten rechts). Diese Einsparungen beruhen ebenfalls auf dem Einsatz von Substitutionsalternativen bei Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge mit Brennstoffzellen oder dem Einsatz von Doppelschichtkondensatoren. Das Einsparpotential liegt in Summe in 2050 bei rund 1.300.000 Tonnen Titandioxid.

Abbildung 42: Titandioxidbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)

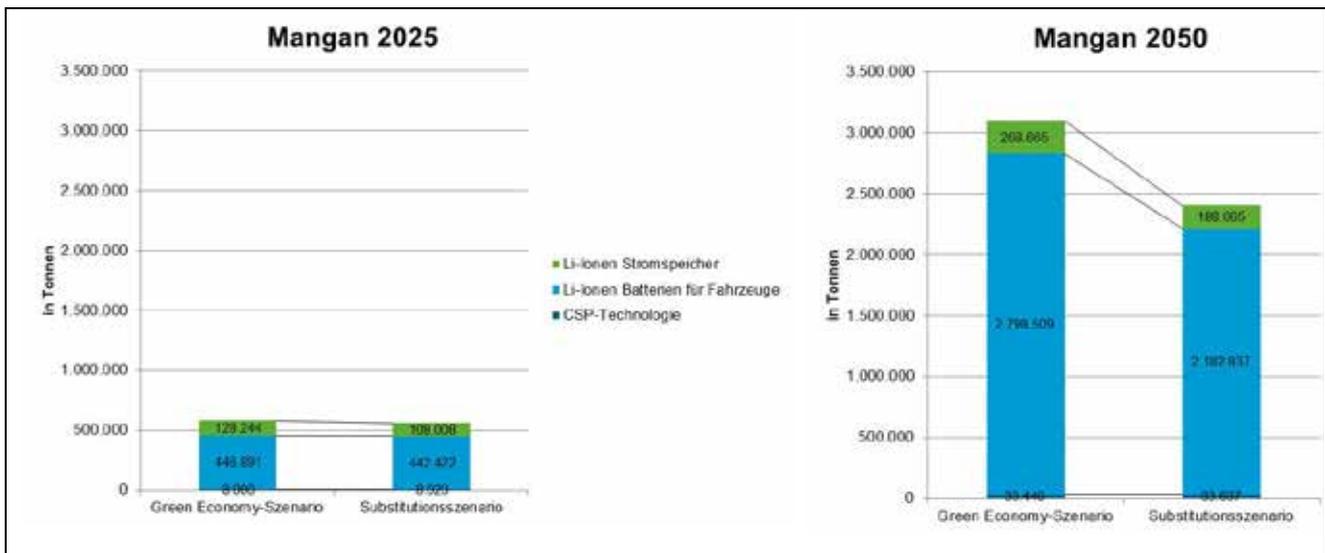


Quelle: Eigene Darstellung

6.3.10 Mangan

Der Manganbedarf kann im Substitutionsszenario in 2025 und 2050 reduziert werden. In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 4 % bzw. knapp 24.000 Tonnen. In 2025 ist eine Abnahme des Manganbedarfs im Substitutionsszenario v. a. bei den Lithium-Ionen-Stromspeichern mit rund 19.000 Tonnen möglich (siehe Abbildung unten links). In 2050 ist ein Einsparpotential von 22 % bzw. rund 700.000 Tonnen zu verzeichnen (siehe Abbildung unten rechts). Hier liegt das größte Einsparpotential an Mangan bei den Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen mit 615.000 Tonnen.

Abbildung 43: Manganbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario in 2025 (links) und 2050 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

6.3.11 Sonstige Rohstoffe

Bei folgenden Rohstoffen ist die Veränderung des Rohstoffbedarfs über die untersuchten Umwelttechnologien deutlich geringer ausgeprägt.

Bei **Kupfer** reduziert sich der Bedarf über die 14 untersuchten Umwelttechnologien um 6 % in 2025 und 7 % in 2050. Bei RFID kann der Kupferbedarf in 2050 komplett eingespart werden. Weitere deutliche Reduzierungspotentiale in 2050 sind bei den bleifreien Loten (-50 %) und Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge (-59 %) zu verzeichnen. Auch bei Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen (-30 %) und Li-Ionen-Stromspeichern (-25 %) liegt der Kupferbedarf im Substitutionsszenario niedriger als im Green Economy-Szenario. Wohingegen das Substitutionsszenario bei den Hybridmotoren (+30 %) und Elektroantriebsmotoren (+47 %) mit einem steigenden Kupferbedarf in 2050 einhergeht.

Rhodium findet nur Anwendung in den Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren. Das Substitutionsszenario zeigt nur eine geringfügige Reduzierung des Rhodiumbedarfs in 2025 (-2 %) und in 2050 (-3 %).

Das Seltenerdelemente Element **Cer** wird eingesetzt in den weißen LED und Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren. In beiden Technologien können Einsparungen im Substitutionsszenario erzielt werden. Bei den Li-Ionen Stromspeichern ist ein geringer zusätzlicher Bedarf durch das Substitut der Wasserstoff-Brennstoffzelle zu verzeichnen. In Summe liegt kommt es zu einer geringfügigen Cer-Einsparung im Substitutionsszenario von 1 % in 2025 und 2 % in 2050.

Der **Indium**bedarf im Substitutionsszenario liegt in 2025 unter dem Bedarf im Green Economy-Szenario (-1 %), steigt aber in 2050 um 5 % im Vergleich zum Green Economy-Szenario. Einsparungen können sowohl in 225 als auch 2050 bei den Dünnschicht-Solarzellen und Tandemzellen erreicht werden. Das Substitutionsszenario der weißen LED geht einher mit einer Zunahme des Indiumbedarfs (+1 % in 2025 und +6 % in 2050 im Vergleich zum Green Economy-Szenario).

Magnesium wird im Rahmen dieser Analyse nur in der CSP-Technologie eingesetzt. Für das Substitutionsszenario ist eine geringfügige Bedarfszunahme an Magnesium im Vergleich zum Green Economy-Szenario zu verzeichnen (+0,2 % in 2025; +0,5 % in 2050)

Silizium wird eingesetzt in den Technologien RFID, Dünnschicht-Solarzellen und Tandemzellen. Der Siliziumbedarf zeigt ebenfalls nur eine geringfügige Änderung im Substitutionsszenario im Vergleich zum Green Economy-Szenario von +0,2 % in 2025 und +0,5 % in 2050. Diese Änderung des Siliziumbedarfs ist auf die Substitutionsalternativen der Tandemzellen zurückzuführen.

6.4 Auswirkungen auf die Kritikalität

Die Auswirkungen der Substitutionen auf die Kritikalität werden mittels eines Gesamtscores abgebildet. Der Gesamtscore trifft eine Gesamtaussage über die Kritikalität der relevanten Rohstoffe in den 40 Umwelttechnologien, welche bewertet wurden. 20 UTs wurden als besonders relevant betrachtet und für das Substitutionsszenario ausgewählt. Für die übrigen 20 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 dem globalen Substitutionsszenario einen Bedarf in 2025 aufweisen, der mehr als 3 Prozent der globalen Primärförderung in 2013 entspricht. Im Substitutionsszenario sind im Vergleich zum Green-Economy-Szenario zwei zusätzliche Rohstoffe als relevant eingestuft: Cobalt und Vanadium. Daher liegen in der folgenden Analyse 23 Rohstoffe im Fokus.

Die Herleitung des Gesamtscores ist in Kapitel 2.5 beschrieben. An dieser Stelle soll nur kurz erwähnt werden, dass sowohl das Versorgungsrisiko als auch das ökologische Schadenspotential und die strategische Bedeutung in den Gesamtscore eingehen. Da das Versorgungsrisiko und das ökologische Schadenspotential im Green-Economy- und dem Substitutionsszenario unverändert bleiben, visualisiert der Gesamtscore v. a. die Veränderung der strategischen Bedeutung der relevanten Rohstoffe, was einer Veränderung der Rohstoffbedarfe entspricht.

In der folgenden Tabelle sind die absoluten und prozentualen Veränderungen der Kritikalität der einzelnen Rohstoffe zwischen Green Economy-Szenario und Substitutionsszenario für 2025 und 2050 ausgewiesen. In den Gesamtscores der beiden Szenarien wird ersichtlich, dass eine leichte Reduktion der Kritikalität durch das Substitutionsszenario möglich ist - in 2025 um 3 % und in 2050 um 11 %. Dieser Vergleich zeigt auf den ersten Blick, dass nach dem heutigen Stand die Kritikalität der relevanten Rohstoffe für die ausgewählten Umwelttechnologien nur begrenzt reduziert werden kann. Dies ist allerdings nur deshalb der Fall, weil neben sich positiv auswirkenden Substitutionen wie bei Dysprosium und Terbium auch Substitutionen existieren, welche eine negative Auswirkung auf die Kritikalität haben. Letzteres ist bei Platin der Fall. Sie sind in der Tabelle grün (positiv) bzw. rot (negativ) hinterlegt. Bei Dysprosium und Terbium wirken sich vor allem die Substitution des Elektroantriebsmotors und bis 2025 auch des Hybridmotors aus. Bei Platin ist es vor allem die Substitution der Lithium-Ionen-Batterien durch Brennstoffzellen in Fahrzeugen, welche erst maßgebliche 2050 Auswirkungen haben, und des Fahrzeug-Abgas-Katalysators.

Tabelle 32: Absolute und prozentuale Veränderung der Kritikalität der einzelnen Rohstoffe im Substitutionsszenario versus Green-Economy-Szenario

	Delta Substitution - Green Economy (absolut)		Delta Substitution - Green Economy (in Prozent)	
	2025	2050	2025	2050
Cer	-0,01	-0,01	-2 %	-2 %
Dysprosium	-8,23	-80,28	-33 %	-65 %
Gallium	-0,75	-6,62	-10 %	-51 %
Gold	-0,03	-0,22	-3 %	-18 %
Indium	-0,06	0,16	-1 %	5 %
Iridium	0	0	0 %	0 %
Kobalt	0,18	0,43	1800 %	1075 %

	Delta Substitution - Green Economy (absolut)		Delta Substitution - Green Economy (in Prozent)	
	2025	2050	2025	2050
Kupfer	-0,03	-0,12	-4 %	-5 %
Lithium	-0,08	-3,57	-3 %	-22 %
Magnesium	0	0	0 %	0 %
Mangan	0	-0,02	0 %	-22 %
Neodym	-0,48	-7,95	-17 %	-58 %
Palladium	-8,94	-17,3	-5 %	-6 %
Platin	9,57	90,62	16 %	123 %
Praseodym	-0,44	-7,34	-18 %	-59 %
Rhodium	-1,22	-2,35	-1 %	-1 %
Ruthenium	0	0	0 %	0 %
Silber	-1,77	-5,55	-15 %	-28 %
Silizium (Metall)	0	0	0 %	0 %
Terbium	-11,35	-115,22	-30 %	-62 %
Vanadium	1,2	5,04		
Zinn	-0,57	-4,5	-12 %	-46 %
Titan als TiO ₂	0	-0,19	0 %	-23 %
GESAMTSCORE	-23	-155	-3 %	-11 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Weitere Informationen zum Gesamtscore der Kritikalität der jeweiligen Rohstoffe finden sich im 5. Arbeitsbericht.

6.5 Datenüberblick der Ergebnisse

In folgender Tabelle werden die Rohstoffbedarfe der einzelnen Umwelttechnologien und Rohstoffe in den beiden Szenarien (Green Economy und Substitution) in 2025 und 2050 aufgelistet. Die Rohstoffbedarfe sind nach alphabetischer Reihenfolge der Elementsymbole angegeben. Aus Platzgründen sind die Umwelttechnologien mit ihrer UT-Nummer angegeben. Die Nummerierung ergibt sich aus der ursprünglichen Liste von 115 Umwelttechnologien (siehe Anhang).

Tabelle 33: Rohstoffbedarf im Substitutionsszenario und Green Economy-Szenario

		Rohstoffbedarfe in den Szenarien in 2025 und 2050				Veränderung Substitution zu Green Economy			
		Substitution		Green Economy		In Prozent		absolut	
		2025	2050	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Ag	UT Nr. 5	80	0	2.000	2.000	-96%	-100%	-1.920	-2.000
	UT Nr. 13	1.102	2.597	1.296	3.996	-15%	-35%	-194	-1.399

		Rohstoffbedarfe in den Szenarien in 2025 und 2050				Veränderung Substitution zu Green Economy			
		Substitution		Green Economy		In Prozent		absolut	
Ag	UT Nr. 5	80	0	2.000	2.000	-96%	-100%	-1.920	-2.000
	UT Nr. 13	1.102	2.597	1.296	3.996	-15%	-35%	-194	-1.399
	UT Nr. 27	3.534	3.800	3.534	3.800	0%	0%	0	0
	UT Nr. 56	6.276	9.875	6.480	13.743	-3%	-28%	-204	-3.868
	UT Nr. 90	0	0	0	0	-5%	-10%	0	0
	UT Nr. 93	49	196	52	217	-5%	-10%	-3	-22
	Gesamt Ag	11.041	16.468	13.362	23.756	-17%	-31%	-2.321	-7.289
Au	UT Nr. 27	25	12	28	30	-10%	-60%	-2,79	-18
Ce	UT Nr. 27	4	1	11	12	-60%	-90%	-7	-11
	UT Nr. 43	7588	7269	7665	7417	-1%	-2%	-77	-148
	UT Nr. 100	0,00	1	0,00	0,00			0,00	0,56
	Gesamt Ce	7592	7271	7676	7429	-1%	-2%	-83	-159
Cu	UT Nr. 5	180	0	4.500	4.500	-96%	-100%	-4.320	-4.500
	UT Nr. 27	130.200	140.000	130.200	140.000	0%	0%	0	0
	UT Nr. 37	155.413	284.012	148.012	216.721	5%	31%	7.401	67.292
	UT Nr. 38	348.251	2.820.218	304.482	1.916.466	14%	47%	43.769	903.752
	UT Nr. 56	1.224	1.527	1.440	3.054	-15%	-50%	-216	-1.527
	UT Nr. 60	36.015	36.015	12.005	36.015	200%	0%	24.010	0
	UT Nr. 93	12.832	53.772	12.800	53.504	0%	0%	32	268
	UT Nr. 98	239.653	803.632	340.428	1.978.031	-30%	-59%	-100.775	-1.174.399

		Rohstoffbedarfe in den Szenarien in 2025 und 2050				Veränderung Substitution zu Green Economy			
		Substitution		Green Economy		In Prozent		absolut	
	UT Nr. 100	108.125	212.358	135.156	283.144	-20%	-25%	-27.031	-70.786
	UT Nr. 106	72.032	132.107	79.227	189.299	-9%	-30%	-7.195	-57.192
	Gesamt Cu	1.103.924	4.483.640	1.168.249	4.820.733	-6%	-7%	-64.325	-337.094
DY	UT Nr. 37	476	232	1.057	1.548	-55%	-85%	-581	-1.316
	UT Nr. 38	2.157	6.566	2.900	18.252	-26%	-64%	-743	-11.686
	UT Nr. 60	74	165	86	257	-14%	-36%	-12	-92
	UT Nr. 106	45	32	75	270	-40%	-88%	-30	-238
	Gesamt Dy	2.752	6.996	4.118	20.328	-33%	-66%	-1.367	-13.332
Ga	UT Nr. 27	163	78	181	195	-10%	-60%	-18	-117
	UT Nr. 37	9	9	9	13	-5%	-35%	0	-5
	UT Nr. 38	22	87	24	152	-11%	-43%	-3	-65
	UT Nr. 87	6	3	7	4	-5%	-20%	0	-1
	UT Nr. 90	0,02	0,08	0,02	0,08	0%	1%	0,000	0,000
	Gesamt Ga	200	177	221	364	-10%	-52%	-21	-188
In	UT Nr. 27	163	184	162	174	1%	6%	2	10
	UT Nr. 87	87	8	92	10	-5%	-20%	-5	-2
	UT Nr. 90	0,005	0,014	0,006	0,027	-25%	-50%	0,00	-0,01
	Gesamt In	251	192	254	184	-1%	5%	-3	9

		Rohstoffbedarfe in den Szenarien in 2025 und 2050				Veränderung Substitution zu Green Economy			
		Substitution		Green Economy		In Prozent		absolut	
Mg	UT Nr. 93	12.030	50.411	12.000	50.160	0%	1%	30	251
Mn	UT Nr. 93	8.020	33.607	8.000	33.440	0,2%	0,5%	20	167
	UT Nr. 98	442.422	2.182.837	446.891	2.798.509	-1,0%	-22%	-4.469	-615.672
	UT Nr. 100	109.008	188.065	128.244	268.665	-15%	-30%	-19.237	-80.599
	Gesamt Mn	559.449	2.404.510	583.135	3.100.614	-4,1%	-22%	-23.686	-696.104
Nd	UT Nr. 37	4.068	3.456	4.017	5.882	1,3%	-41%	50	-2.426
	UT Nr. 38	8.088	24.622	10.874	68.445	-25,6%	-64%	-2.787	-43.823
	UT Nr. 60	273	612	317	952	-14,0%	-36%	-44	-340
	UT Nr. 106	951	1.844	1.056	2.975	-10,0%	-38%	-106	-1.130
	Gesamt Nd	13.379	30.534	16.265	78.254	-17,7%	-61%	-2.886	-47.720
Pd	UT Nr. 43	261	208	307	297	-15%	-30%	-46	-89
Pr	UT Nr. 37	1.070	909	1.057	1.548	1,3%	-41%	13	-639
	UT Nr. 38	2.157	6.566	2.900	18.252	-25,6%	-64%	-743	-11.686
	UT Nr. 60	81	182	94	283	-14,0%	-36%	-13	-101
	Gesamt Pr	3.308	7.657	4.051	20.083	-18,3%	-62%	-743	-12.426
Pt	UT Nr. 27	47	50	47	50	0%	0%	0	0
	UT Nr. 43	176	215	130	126	35%	71%	46	89
	UT Nr. 98	0	347	0	0			0	347
	Gesamt Pt	222	611	176	176	26%	248%	46	436

		Rohstoffbedarfe in den Szenarien in 2025 und 2050				Veränderung Substitution zu Green Economy			
		Substitution		Green Economy		In Prozent		absolut	
Rh	UT Nr. 43	35	33	35	34	-1,7%	-3%	-0,6	-1,1
	UT Nr. 5	100	100	100	100	0,0%	0%	0	0
Si	UT Nr. 87	36	61	36	61	0,1%	0%	0	0
	UT Nr. 90	475	2.010	474	2.000	0,2%	1%	1	10
	Gesamt Si	610	2.171	609	2.161	0,2%	0%	1	10
Sn	UT Nr. 27	5.487	5.900	5.487	5.900	0%	0%	0	0
	UT Nr. 56	196.596	249.665	225.360	477.951	-13%	-48%	-28.764	-228.287
	UT Nr. 87	3	21	0	0			3	21
	Gesamt Sn	202.086	255.585	230.847	483.851	-12%	-47%	-28.761	-228.266
Tb	UT Nr. 37	95	46	211	310	-55%	-85%	-116	-263
	UT Nr. 38	431	1.313	580	3.650	-26%	-64%	-149	-2.337
	UT Nr. 60	15	33	17	51	-14%	-36%	-2	-18
	UT Nr. 106	23	135	0	0			23	135
	Gesamt Tb	564	1.528	809	4.011	-30%	-62%	-245	-2.484
TiO2	UT Nr. 93	161	651	167	697	-3,4%	-7%	-6	-47
	UT Nr. 98	918.577	4.532.111	927.856	5.810.399	-1,0%	-22%	-9.279	-1.278.288
	Gesamt TiO2	918.738	4.532.762	928.023	5.811.097	-1,0%	-22%	-9.284	-1.278.335

Quelle: Eigene Zusammenstellung

7 Roadmap für die Substitution bei Umwelttechnologien

Das Substitutionsszenario hat gezeigt, dass eine Minderung der Kritikalität der Rohstoffe für Umwelttechnologien durch Substitutionen erreicht werden kann. Die nun folgende Roadmap zeigt den Handlungsbedarf für die einzelnen Umwelttechnologien auf, um die identifizierten Substitutionspotentiale zu erschließen. Dieser Handlungsbedarf wird dazu in konkrete Maßnahmen übersetzt, für die gezielte **Anstrengungen** der Akteure im Innovationssystem, sowohl auf der Seite der Politik und Forschungseinrichtungen, als auch auf Seiten der Wirtschaft und Verbände erforderlich sind. In die Roadmap fließen nationale, europäische und internationale Aktivitäten von Politik und Wirtschaft, die Fragen der Substitutionen von kritischen Rohstoffen aufgreifen. Vor dem Hintergrund, dass die Unsicherheiten bis zum Zeithorizont 2050 deutlich zunehmen, wird der Fokus auf Handlungsempfehlungen bis 2025 gelegt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Maßnahmen in ihre zentralen Handlungsfelder für die Erschließung der identifizierten Substitutionspotentiale untergliedert.²² Zur Visualisierung der Handlungsfelder wurden zusätzlich verschiedene Farben gewählt. Die Handlungsfelder sind Technologieentwicklung (**rot**), Markteinführung (**grün**) und Schaffung von geeigneten Formaten für Qualifizierung, Austausch und Monitoring von Substitutionsmöglichkeiten (**blau**). Neben der Forschungs-, Innovations- und Diffusionsförderung sind politisch-rechtliche Anreize relevant (**grau**). In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Maßnahmen erläutert und am Ende jedes Kapitels zusammenfassend visualisiert.

7.1 Technologieentwicklung

Forschung und Entwicklung sind vor allem bei den Substitutionsoptionen notwendig, deren Potentialschließung die Überwindung einer Reihe von Nachteilen und Hemmnissen erfordert. Für eine Substitution müssen vielfach die noch heute bestehenden technischen Nachteile (z. B. niedrigere Leistungsdichte, höhere Kosten) überwunden werden, um wettbewerbsfähig zu sein. Die F&E-Bemühungen bewegen sich von grundlegender Materialforschung bis hin zu Optimierungen einer großtechnischen Fertigung. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht bei Substitutionsoptionen

- ▶ für Solartechnologien (CZTS-Zellen für Dünnschicht-PV, Substitution von Indium aus ITO bei Tandemzellen),
- ▶ für Speichertechnologien (Doppelschichtkondensator für Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen),
- ▶ für Redox-Flow-Batterien und für Natrium-Schwefel-Batterien für stationäre Li-Ionen-Stromspeicher,
- ▶ für Motoren und Generatoren (Asynchronmotor für Elektromotoren in Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeugen),
- ▶ für HTS-Generatoren und für FeCo-, FeNi-Magnete für Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen,
- ▶ für weiße LED (cadmiumfreie Quantum Dots und glasbasierte wOLED),
- ▶ für RFID (Zinn-Bismut-Lote, Silber-Sintern, Mikro-Reibrührschweißen),
- ▶ für Membranelektrolyse (Deacon-Verfahren)
- ▶ sowie für Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren (Vanadiumpentoxid, Zeolith-SCR, Luftsteuerung).

Da die Technologieentwicklungen sehr technologiespezifisch sind, werden die Maßnahmen im Bereich F&E je Technologie kurz vorgestellt.

²² Im Arbeitsbericht 6 sind die Maßnahmen je Umwelttechnologie über alle Handlungsfelder dargestellt.

Solartechnologien

Bei den Solartechnologien sind Technologieentwicklungen bei **CZTS-Zellen** (als Substitution der Dünnschicht-PV) notwendig, da diese aktuell noch nicht wettbewerbsfähig sind. Die bisher erreichten Wirkungsgrade sind mit 12,6 % vergleichsweise niedrig. Weitere Forschungsanstrengungen sind daher nötig, um den Wirkungsgrad zu verbessern. Zudem müssen die erreichten Laborwirkungsgrade in kommerziellen Anlagen umgesetzt werden. Einen Forschungsrahmen bieten große Forschungseinrichtungen, wie u. a. das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB). Die Forschungsergebnisse müssten weiterhin in Entwicklungsprojekte umgesetzt werden. Hier können Förderungen für die Errichtung von Demonstrationsanlagen die Erschließung von Substitutionspotentialen unterstützen. Die F&E-Bemühungen sollten schnellstmöglich beginnen, um eine Markteinführung ab 2022 zu erreichen. Voraussetzung wären Investitionsanreize auf staatlicher Ebene (z. B. über die KfW) um einen Marktanteil von ungefähr 5 % im Jahr 2025 zu erreichen.

Bei **indiumfreien TCOs** (als Substitution von Indium in ITOs in der Tandemzelle) geht es darum, Probleme bei der großtechnischen Fertigung zu verringern. In einigen PV-Linien werden indiumfreie TCOs (transparente leitfähige Oxide) schon heute eingesetzt. Es wird erwartet, dass sie sich auch in Anlagen der konzentrierenden Photovoltaik zukünftig durchsetzen, ohne dass dedizierte Maßnahmen ergriffen werden müssten. Zusätzliche Fördermaßnahmen könnten dennoch helfen, die Probleme bei der großtechnischen Fertigung zu verringern und die Markteinführung beschleunigen. So benötigt beispielsweise die direkte Gasphasenabscheidung (CVD) von FTO eine Abscheidetemperatur > 350 °C; auch die direkte Applikation auf Polymerfolien ist noch nicht Stand der Technik. Eine Förderung könnte die Entwicklung von Prozessen, das Sammeln von Erfahrung und den Aufbau einer großtechnischen (und damit günstigeren) Fertigung unterstützen. Einen Förderrahmen bieten u. a. die Fraunhofer-Gesellschaft sowie die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF). Mit den F&E-Bemühungen sollte umgehend begonnen werden und sie sollten bis ca. 2022 andauern.

Speichertechnologien

Für die Substitution von Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen durch **Doppelschichtkondensatoren** sind F&E-Anstrengungen zur Erhöhung der Energiedichte, sowie einer Optimierung der Elektroden, Elektrolyte und Separatoren anzustreben. Die Doppelschichtkondensatoren sind bereits seit Jahren Stand der Technik im Bereich der mobilen Anwendungen. Sie kommen diesbezüglich als Energiespeicher für sekundäre Systeme (z. B. Servolenkung, Airbag-Auslösesysteme, Katalysatorvorwärmung) zum Einsatz. Darüber hinaus sind Doppelschichtkondensatoren vielversprechend für Anwendungen, die sehr kurze und hohe Leistungen beanspruchen bzw. Leistungen zum Einspeichern bereitstellen, so z. B. bei der Rekuperation von Bremsenergie und der Beschleunigung. Lithium-Ionen-Batterien könnten somit zukünftig in Elektrofahrzeugen durch Doppelschichtkondensatoren entlastet und möglicherweise auch kleiner dimensioniert werden. Eine Hemmschwelle für die weitere Verbreitung ist ihre vergleichsweise geringe Energiedichte, was zu hohen Investitionen bei größeren Doppelschichtkondensatoren führt. Zentrale Forschungs- und Entwicklungsanforderungen liegen dahingehend in der Erhöhung der Energiedichte durch verbesserte Elektroden und der Optimierung des Batteriemangements. Wichtiger Bestandteil hierbei ist die Materialforschung. Die Mehrheit der Forschungsanstrengungen zu Doppelschichtkondensatoren findet heute in Asien statt. In Deutschland sollte die Forschung umgehend beginnen. Wesentliche Akteure sind Forschungseinrichtungen (wie die Fraunhofer Gesellschaft) und das BMBF mit entsprechenden Forschungsförderungsprogrammen.

Die Substitution von stationären Lithium-Ionen-Speichern durch **Redox-Flow-Batteriesysteme** wird auf Basis der vorhandenen Informationen und Annahmen bis 2025 zu ca. 10 % möglich sein. Um dieses Ziel zu erreichen, sind sofortige F&E-Anstrengungen hinsichtlich der Optimierung von Elektrolyten, Lösungen und Membranen sowie der Senkung von Investitions- und Betriebskosten notwendig.

Die Redox-Flow-Technologie wird bereits in einigen Systemen und Anwendungsfällen weltweit genutzt und hat auch in Einzelfällen den kommerziellen Reifegrad erreicht. Um zukünftig jedoch zu einer weiteren Verbreitung beizutragen, ist es notwendig, die spezifischen Investitionskosten von Redox-Flow-Systemen zu verringern.

Hierzu stehen mehrere Entwicklungspfade zur Verfügung. Die Materialkosten der Elektrolyte sind zu verringern und auch das Konzentrationsverhältnis der Elektrolyte ist zu verbessern, um hierdurch die benötigte Menge an Elektrolyt zu verringern und folglich die Kosten zu senken. Einer Optimierung bedarf auch die Zusammenführung von mehreren Zellen zu Stacks, die zum einen kostengünstig, aber auch möglichst langlebig sein müssen. Des Weiteren bedarf es einer Optimierung der Elektroden, die in den meisten Fällen aus diversen Kohlenstoffverbindungen (häufig Graphitfilme) bestehen. Ein anderer Aspekt ist die Verringerung der Umweltrisiken durch die verwendeten Elektrolytlösungen, die bisher vorrangig organische bzw. anorganische Säuren als Lösungsmittel verwenden. Durch die Verringerung der Umweltrisiken können ebenfalls Kosten beim Batteriemanagementsystem eingespart werden. Insgesamt werden der Redox-Flow-Technologie in den nächsten 5 - 10 Jahren ein erhöhtes Entwicklungspotential und eine erhöhte Wettbewerbsfähigkeit vorhergesagt. Wesentliche Akteure im Bereich der Technologieentwicklung sind zum einen Forschungseinrichtungen (wie z. B. die Fraunhofer Gesellschaft oder Universitäten). Zum anderen sollten Forschungsgelder von BMBF und BMWi zur Verfügung gestellt werden. Hinsichtlich der Kostensenkungspotentiale sollten die Beteiligten (Chemieunternehmen, Engineering) entlang der Wertschöpfungskette daher eng kooperieren.

Das Substitutionspotential von stationären Lithium-Ionen-Stromspeichern durch **Natrium-Schwefel-Batterien** wird auf einen Marktanteil von rund 5 % in 2025 geschätzt. Eine der zentralen Herausforderungen bei der Weiterentwicklung und Verbreitung von Natrium-Schwefel-Batterien (NaS-Batterien) ist die Reduktion der Betriebstemperatur, die mit über 300 °C vergleichsweise hoch ist und daher insbesondere in Ruhephasen einer Wärmezufuhr bedarf. Während des Betriebs kann die Batterie hingegen durch die internen Reaktionen besonders hohe Temperaturen erreichen, so dass die Batterie aktiv gekühlt werden muss. Durch die Reduktion der Betriebstemperatur können zum einen die Risiken für Mensch und Umwelt reduziert als auch die Investitions- und Betriebskosten (Batteriemanagementsystem, Strom- und Wärmebedarf) verringert werden, welche zentrale Kriterien für die Steigerung der Marktdurchdringung darstellen.

Durch die verringerte Betriebstemperatur können dann auch neue Märkte, u. a. der Markt der privaten Nutzer, erschlossen werden, was zu einem erhöhten Absatz und voraussichtlich zu einer weiteren Kostendegression führt. Um die Weiterentwicklung von NaS-Batterien voran zu bringen, wäre eine gezielte Erforschung der NaS-Batterie-Technologie, die durch den Bund bzw. die einzelnen Ministerien (BMBF, BMWi) gefördert wird, notwendig. Vorreiter in der NaS-Forschung sind asiatische Firmen, hier insbesondere die Firma NGK Insulators zusammen mit TEPCO (Tokyo Electric Power Co.) aus Japan. In Deutschland sind Forschungseinrichtungen (wie z. B. Universitäten, Fraunhofer Gesellschaft) entscheidende Akteure. Die Weiterentwicklung von NaS-Batterien mit Betriebstemperaturen im zweistelligen Celsius-Bereich (Raumtemperatur) findet vorrangig in Asien und den USA statt. Erste Pilotprojekte haben Niedertemperatur-NaS-Batterien entwickelt, die 2015 jedoch noch nicht den kommerziellen Reifegrad erreicht hatten. Eine Analyse von Patenten zeigt beispielsweise, dass Europa und insbesondere Deutschland sich nur in vergleichsweise geringem Umfang an der Erforschung und Weiterentwicklung von NaS-Batterien beteiligt. In einzelnen Märkten (z. B. Japan, USA) und Anwendungsgebieten (Netzstabilität und Lastausgleich) haben NaS-Batteriesysteme bereits einen gewissen Stellenwert erreicht. Es wird angenommen, dass die Markteinführung von Niedertemperatur-NaS-Batterien voraussichtlich ab 2020 erfolgt.

Motoren

Das Substitutionspotential des Elektromotors mit Seltenen Erden in Hybridfahrzeugen und Plug-in-Hybridfahrzeugen durch einen **Asynchronmotor ohne Seltenerdelemente** wird in 2025 auf jeweils 5 % Marktanteil geschätzt. Für eine Substitution müssen zunächst die noch heute bestehenden technischen Nachteile (niedrigere Leistungsdichte) überwunden werden, um wettbewerbsfähig zu sein. Derzeit befindet sich der Asynchronmotor für Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge im Pilotstadium, so dass diese Technologieoptimierung umgehend begonnen und bis 2023 erreicht werden sollte. Entscheidende Akteure sind dabei Motorenentwickler und -hersteller selbst, aber auch die Bundesregierung (BMBF), die Forschungsprogramme anstoßen sollte. Weitere Akteure sind Forschungsinstitute. Neben Forschungsprogrammen in Deutschland sind auch F&E-Anstrengungen in der EU z. B. im Rahmen von Forschungsrahmenprogrammen („Horizon 2020“) anzustoßen.

Bei Permanentmagnet-Generatoren für Windkraftanlagen gibt es ebenso Forschungsbedarf. Dies gilt zum einen für Generatoren für Windkraftanlagen auf Basis von **Hochtemperatur-Supraleitern (HTS)**. Es handelt sich um eine vergleichsweise junge Technologielinie, die es potentiell erlaubt, für hohe Leistungsbereiche sehr hohe Wirkungsgrade bei geringem Gondelgewicht zu realisieren. Zwar gibt es einige Demonstrationsprojekte, jedoch ist noch nicht abzusehen, wann HTS-Generatoren in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen könnten. Wichtig wäre zunächst eine Verbesserung der Wirkungsgrade sowie der Zuverlässigkeit der Anlagen insgesamt.

Für letzteres sind Entwicklungsanstrengungen nötig, die durch öffentlich geförderte F&E-Programme unterstützt werden müssen, beispielweise mit Blick auf die Errichtung von Pilotanlagen. Eine Problematik beim Einsatz von HTS-Generatoren stellt die benötigte Kühlung dar. Forschungsanstrengungen zielen auf die Entwicklung von Materialien, die auch bei Temperaturen, die mit flüssigem Stickstoff realisiert werden können, supraleitende Eigenschaften aufweisen. Momentan werden hier Yttrium-Barium-Kupferoxid-Gruppen untersucht. Diese Anstrengungen erfolgen auf der Ebene der Materialforschung. Mit nationalen (BMBF) und europäischen Forschungsprogrammen sollte zügig begonnen werden. Einer erfolgreichen Supraleiter-Forschung können konkrete Produktentwicklungen abgeschlossen werden.

Eine weitere Substitutionsoption des Permanentmagnet-Generators in Windkraftanlagen liegt in der Entwicklung von **FeCo- oder FeNi-basierten Materialien**. Diese Magnete ohne Seltenerdelemente befinden sich noch im Labormaßstab, auch mittelfristig scheinen die Energiedichten von marktüblichen Permanentmagneten nicht erreicht zu werden. Dementsprechend ist die Forschung momentan auf die Suche nach einer Verbesserungen ihrer magnetischen Eigenschaften und Energiedichten auszurichten. Die Fortschritte werden nicht plötzlich, sondern kontinuierlich erfolgen, so dass sich mögliche Anwendungsgebiete nach und nach erschließen könnten. Akteure sind im Wesentlichen Universitäten und größere Forschungseinrichtungen, deren Forschung durch nationale (BMBF etc.) und internationale Institutionen (EU Horizon 2020 etc.) gefördert werden muss.

Beleuchtung

Bei den Substitutionsoptionen der weißen LEDs geht es in erster Linie um die Verringerung der momentan für die Lumineszenzkonversion genutzten Seltenerdoxide in der Phosphorschicht. Es ist davon auszugehen, dass bis 2025 vor allem technologische Substitutionen umsetzbar sein werden. Demzufolge werden rund 50 % der am Markt befindlichen wLED-Leuchtmittel mit einer Phosphorschicht aus **cadmiumfreien Quantum Dots** ausgestattet sein. Weitere 10 % der Beleuchtungskörper werden **glasbasierte wOLEDs** anstelle von wLEDs enthalten.

Die Substitution von Seltenerdoxid für die Lumineszenzkonversion von blauem Licht zu einem weißen Mischspektrum erfordert mittelfristig eine Hochskalierung der Produktionskapazitäten für Cd-freie Quantum Dots. Da diese Technologie sich bereits auf einem relativ hohen Technologiereifegrad

befindet, ist diese Maßnahme vor allem durch industriepolitische Instrumente möglich. Diese Substitutionsoption ist ohne tiefgreifende Eingriffe in die etablierten Wertschöpfungsketten und Produktionssysteme für wLED Leuchtmittel umsetzbar (Voraussetzung für eine Umsetzung ist, dass die Patente zur Verfügung stehen). Die Innovation sollte allerdings durch begleitende Erforschung der Umweltaspekte und gesundheitlicher Auswirkungen von Cd-freien Quantum Dots flankiert werden, insbesondere in Hinblick auf die Herstellungsphase der Quantum Dots und die sichere Entsorgung bzw. das Recycling der Leuchtmittel.

Die langfristige Umstellung der Beleuchtungstechnik auf wOLED wird gegenüber den Cd-freien Quantum Dots relativ tiefgreifende Auswirkungen auf die Wertschöpfungsketten haben. Außerdem wird die Nutzung von flächigen (anstelle punktförmiger) Lichtquellen zu Problemen mit der Kompatibilität zu Beleuchtungskonzepten im Gebäudebestand führen. Hierzu bedarf es der Entwicklung völlig neuer Beleuchtungskonzepte für den Indoor- als auch Outdoor-Einsatz. Kurz- bis mittelfristig geht es jedoch zunächst um die Verbesserung der physikalischen und technischen Eigenschaften der wOLEDs. Diese haben eine für den Praxiseinsatz noch zu geringe Lebensdauer und stehen auch in puncto Energieeffizienz noch hinter den wLEDs zurück. Weitere Forschung und Entwicklung ist erforderlich, um anwendungsreife und kostengünstige wOLED für die Anwendung in Produkten für den Konsumentenmarkt zu etablieren. Um die avisierten 10 % Marktdurchdringung zu erreichen, sind industrielle Upscalingmaßnahmen unabdingbar. Für glasbasierte wOLEDs ist ein solches Upscaling als ambitioniert einzustufen, weil hierfür zunächst ein entsprechend großes Marktvolumen für die hochpräzisen und derzeit noch kostenintensiven Flachgläser erforderlich ist.

Weitere Technologien

Eine Substitution von Silber und Kupfer in **RFID**-Tags ist aus technischen und anwendungspraktischen Gründen schwierig. Die Substitution von Silber und Kupfer in RFID-Tags muss noch weiter optimiert werden, um eine Marktdurchdringung der Technologie im Anwendungsbereich Verpackungskennzeichnung zu erreichen. Für die Erreichung anwendungssicherer Produkte sind weitere Entwicklungen unter Einbezug der RFID-Hersteller (bzw. Hersteller der RFID-Herstellungsausrüstung), Einzelhandel, Recyclingwirtschaft und Verbraucher notwendig. Im Zuge eines solchen Multi-Stakeholder-Innovationsprozesses sollte auch die Frage nach der, aus wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Sichtweise, vorteilhaftesten Strategie zu Wertstoffen (Substitution oder Vermeidung) diskutiert und entschieden werden.

Es wird angenommen, dass die Umwelttechnologie Bleifreie Lote in 2025 in geringem Umfang auf drei RohS-konforme Substitutionsoptionen zurückgreifen kann. **Zinn-Bismut-Lote, Silber-Sintern und Mikro-Reibrührschweißen**. Die Nutzung alternativer Legierungen zur Substitution silberhaltiger Lote wird in der Industrie seit einigen Jahren getestet. Zinn-Bismut-Lote können helfen, den Bedarf an den Rohstoffen Zinn und Silber zu senken. Allerdings ist eine breite Anwendung dieser Substitution aufgrund der unzureichenden technischen Eigenschaften (Verarbeitungstemperatur, Sprödigkeit) nicht absehbar. Forschungsbedarf besteht daher in der Weiterentwicklung und dem Erreichen der industriellen Anwendungsreife. Außerdem ist die Rohstoffverfügbarkeit von Bismut (ein Koppelprodukt der Bleiförderung) viel zu gering, um eine flächendeckende Umstellung auf Zinn-Bismut-Lote zu ermöglichen. Bis 2025 und darüber hinaus werden deshalb lediglich 5 % der klassischen bleifreien Lote durch Zinn-Bismut-Lote ersetzt werden können.

Die beiden anderen genannten Substitutionsmöglichkeiten basieren auf fundamental anderen Verbindungstechnologien (Sintern und Schweißen) und kommen deshalb ohne Lote aus. Allerdings sind diese Verfahren aus technologischen Gründen schwierig in die bisher etablierten elektronischen Fertigungsprozesse zu integrieren, weil sie den Einsatz speziell dafür optimierter Elektronikkomponenten erfordern (Materialauswahl der Kontakte, mechanische und thermische Stabilität der Substrate) sowie Geometrie der Kontaktstellen. Insbesondere das Silber-Sintern erfordert die Anwendung lokal höherer

Temperaturen als das Löten und kann deshalb nicht ohne weiteres in bestehende Fertigungslinien integriert werden. Mikro-Reibrührschweißen erfolgt im Gegensatz dazu ohne thermische Energiezufuhr, sondern durch punktuelle mechanische Krafteinwirkung. Dieses Verfahren erfordert den Einsatz geometrisch angepasster und mechanisch entsprechend robuster Elektronikbauteile. Außerdem ist die Kontaktierung hunderter oder tausender Kontaktpunkte auf einer elektronischen Leiterplatte mittels eines seriellen Prozesses viel zu langsam für die Ansprüche einer wirtschaftlich sinnvollen Fertigung. Die Anwendung dieses Verfahrens als Substitution für das Löten würde demzufolge eine massive Parallelisierung erfordern. Maßnahmen zur technologischen Innovation sind demzufolge unabdingbar, um diese genannten Technologien als Alternative zum Löten nutzbar zu machen. Außerdem sind Innovationen zur Prozessautomation und -integration auf Ebene der gesamten Wertschöpfungskette in der Elektronikindustrie erforderlich.

Für den industriellen Einsatz der Membranelektrolyse im Prozess der Chlorerzeugung wird das Deacon-Verfahren als Substitutionsoption in 2025 angenommen. Da das Deacon-Verfahren als Ausgangsstoff Chlorwasserstoff verwendet, ist keine weitgehende Substitution möglich. HCl ist als Nebenprodukt nur begrenzt verfügbar und ist wiederum ein Folgeprodukt der ursprünglichen Chlor-Alkalielektrolyse mittels Membranelektrolyse. Dennoch sind technologische und wirtschaftliche Optimierungspotentiale vorhanden, welche die industrielle Anwendbarkeit des Deacon-Verfahrens verbessern könnten. Dazu gehören die Entwicklung edelmetallfreier Alternativen für Katalysatoren als auch Maßnahmen zur Hochskalierung der Technologie auf einen großindustriellen Maßstab.

Für drei Substitutionsoptionen der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren besteht F&E-Bedarf. Die beiden SCR²³-Technologien (Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR bzw. Zeolith) an sich sind sehr ausgereift. Optimierungspotentiale werden hier nur für eine höhere Schwefelresistenz gesehen, welche für den deutschen Markt und dessen Kraftstoffe nicht notwendig sind. Auch eine Kostenreduktion durch höhere Produktionsmengen wäre eine Möglichkeit, vor allem im Falle der Zeolith-SCR. Allerdings sind die maximal notwendigen Produktionsmengen für Zeolith für diese Technologie zu gering, um hier mit Investitionsanreizen höhere Produktionskapazitäten zu schaffen. Allerdings ist es notwendig, an einer anderen Stelle einzugreifen. Zur effektiveren Implementierung der beiden SCR-Technologien wird eine bessere Ammoniakzuführung als Harnstofflösung benötigt, da sich Harnstoff erst ab 190 – 200 °C zu Ammoniak zersetzt, die manche Motor-/Abgasstrangkonfigurationen nicht realisieren können. Hier gibt es die Möglichkeiten, andere Speicherverbindungen zu nutzen wie $\text{Sr}(\text{NH}_3)_8\text{Cl}_2$ oder die Zersetzungstemperaturen über einen Bypass zu realisieren, um nur das Ammoniak und nicht die Harnstofflösung selbst in den Abgasstrang zu dosieren. Es gibt bereits praxisrelevante Entwicklungen, aber eine Optimierung dieser Entwicklungen ist notwendig. Eine gut implementierbare Praxislösung zur Eindosierung von Ammoniak muss bis ca. 2021 entwickelt werden. Hier sind sowohl die Automobilkonzerne und ihre Zulieferer gefragt als auch die Bundesregierung mit ihren Ministerien, die Pilotprojekte fördern können. Auf EU-Ebene könnte eine Förderung über Horizon 2020-Ausschreibungen oder das European Institute of Innovation and Technology (EIT Raw Materials) erfolgen.

Eine verbesserte Luftsteuerung ist zur Reduktion von Cer im Katalysatorsystem notwendig. Hierzu muss die eingesetzte Sensorik verbessert bzw. ausgetauscht werden. Es gibt bereits vielversprechende Ergebnisse zur hochfrequenzgestützten Beladungserkennung in Katalysatorsystemen. Diese sind im Labor bereits ausgereift und sollten bis ca. 2021 mithilfe von Pilotprojekten in Fahrzeugen eingebaut und getestet werden, um die Laborentwicklungen auf die Straße zu bringen und so den optimalen Einbau sowie die optimalen Betriebsparameter zu finden. Hier sind sowohl die Automobilkonzerne und ihre Zulieferer gefragt als auch die Bundesregierung mit ihren Ministerien, die Pilotprojekte fördern

²³ Selective Catalytic Reduction: selektive katalytische Reduktion. Bei diesem Prozess wird NO_x mit NH_3 zu N_2 reduziert.

können. Auf EU-Ebene könnte eine Förderung über Horizon 2020-Ausschreibungen oder das EIT erfolgen.

Abbildung 44: Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen in der Technologieentwicklung

	2017	2020	2025	2030	2030+
Dünnschicht-PV					
CZTS-Zellen		Erhöhung der Wirkungsgrade			
Tandemzellen					
Substitution von In in ITO		Verbesserte großtechnische Umsetzung			
Lithium-Ionen-Batterie Fahrzeuge					
Doppelschichtkondensator		Materialforschung, anwendungsorientierte Forschung			
Lithium-Ionen-Stromspeicher					
Redox-Flow-Batterie		Optimierung			
Natrium-Schwefel-Batterie		Entwicklung Niedertemperatur-NaS-Batterien			
Hybridmotoren					
Asynchronmotor		Steigerung Leistungsdichte			
Elektroantriebsmotoren (PHEV)					
Asynchronmotor		Steigerung Leistungsdichte			
Permanentmagnet-Generatoren Windkraft					
HTS-Generatoren		Materialforschung		Demonstrationsanlagen	
FeCo-, FeNi-Magnete		Grundlagenforschung, angewandte Forschung			
Weißer LED					
Cadmiumfreie Quantum Dots		Verbesserung der Quanteneffizienz bei Quantum Dots			
wOLED glasbasiert		Reduktion der Nutzung von ITO für transparente Elektroden Substitution von Iridium / Platinmetallen in der aktiven Leuchtschicht Verlängerung der Lebensdauer von OLED Elementen Verbesserung der flächigen Leuchthomogenität Verbesserung der Quanteneffizienz und internen Reflexion, Auskopplungsverluste, Interferenzen etc.			
RFID					
Aluminium-basierte RFID-Antennen		Kostengünstigere Druckverfahren			
Bleifreie Lote					
Silber-Sintern		Prozessentwicklung und -automation Upscaling			
Zinn-Bismut-Lote		Weiterentwicklung und Upscaling			
Mikro-Reibrührschweißen		Prozessentwicklung und -automation Upscaling			
Membranelektrolyse					
Deacon-Verfahren		Entwicklung edelmetallfreier Alternativen für Katalysatoren für die Elektrolyse		Erhöhung der industriellen Anwendungsreife	
Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren					
Vanadiumpentoxid / etc.		Entwicklung besserer Ammoniakzuführung			
Zeolith-SCR		Entwicklung besserer Ammoniakzuführung			
Luftsteuerung		Implementierung von hochfrequenzgestützter Beladungserkennung			
<i>Zeitschiene</i>	2017	2020	2025	2030	2030+

Quelle: Eigene Darstellung

Fazit: Es sind F&E-Anstrengungen in verschiedenen Bereichen und von unterschiedlichen Akteuren notwendig.

Eine Materialforschung (Verbesserung Wirkungsgrad, Effizienz, Energiedichte, Elektrolyt) ist bei fast allen genannten Substitutionsoptionen notwendig. Hierunter fallen CZTS-Zellen, Doppelschicht-

kondensatoren, Redox-Flow-Batterien, Natrium-Schwefel-Batterien, Asynchronmotoren für Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge, HTS-Generatoren, FeCo-, FeNi-basierte Magnete, Cd-freie Quantum Dots, wOLEDs, Zinn-Bismut-Lote, Silber-Sintern, SCR-Technologien und die Luftsteuerung.

Der Bedarf nach Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen liegt bei den Substitutionstechnologien CZTS-Zellen, HTS-Generatoren, SCR-Technologien und der Luftsteuerung.

Untersuchungen bezüglich einer großtechnischen Fertigung sollen bei den Substitutionstechnologien indiumfreie TCOs und wOLEDs durchgeführt werden.

Relevante Akteure finden sich in der Industrie, Forschungsinstituten, Bundesministerien sowie auf EU-Ebene. Bei folgenden Substitutionsoptionen sollte sich die Industrie in der Technologieentwicklung einbringen: Asynchronmotoren für Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge, Cd-freie Quantum Dots, wOLEDs, RFID, Zinn-Bismut-Lote, Silber-Sintern, SCR-Technologien und Luftsteuerung.

Forschungsinstitute sind bei allen Technologieentwicklungen relevante Akteure: CZTS-Zellen, Indiumfreie TCOs, Doppelschichtkondensatoren, Redox-Flow-Batterien, Natrium-Schwefel-Batterien, Asynchronmotoren für Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge, HTS-Generatoren, FeCo-, FeNi-basierte Magnete, Cd-freie Quantum Dots, wOLEDs, RFID, Silber-Sintern, Deacon-Verfahren, SCR-Technologien und Luftsteuerung.

Für die F&E-Anstrengungen sollten Forschungsprogramme der Bundesregierung gestartet werden zu Doppelschichtkondensatoren, Redox-Flow-Batterien, Natrium-Schwefel-Batterien, Asynchronmotoren für Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge, HTS-Generatoren, FeCo-, FeNi-basierte Magnete, RFID, Zinn-Bismut-Lote, Silber-Sintern, SCR-Technologien und der Luftsteuerung.

Auf EU-Ebene sollten ebenso Programme (Horizon 2020-Programme, EIT) zu Asynchronmotoren für Hybrid und Plug-in-Hybridfahrzeuge, FeCo-, FeNi-basierte Magnete, Silber-Sintern, SCR-Technologien und der Luftsteuerung aufgesetzt werden.

7.2 Markteinführung

Das Handlungsfeld Markteinführung betrachtet Maßnahmen, die einen Markteintritt von Technologien unterstützen wie z. B. Investitionsanreize. Hier geht es im Wesentlichen um die Beschleunigung der Marktdurchdringung.

Viele Substitutionsoptionen sind in der Entwicklung schon sehr weit fortgeschritten, aber erst in Nischenmärkten vertreten. Dies gilt z. B. für Substitutionen von weißen LEDs. Aber auch Markteinführungsmaßnahmen für zukünftige marktreife Substitutionstechnologien fallen in diese Kategorie wie beispielweise eine Investmentförderung der HTS-Generatoren nach 2025. Für Letztere muss mit hohen Investitionskosten und auch –risiken (Konkurrenz gegen großtechnisch bereits im Markt etablierte andere Windkrafttechnologien) gerechnet werden. Daher wären hier gezielte Investmentförderungen durch die öffentliche Hand besonders wichtig zur Markteinführung.

Zur Marktdurchdringung müssen bei einigen Substitutionsoptionen außerdem die Produktionskosten gesenkt werden. Hier bedarf es der Unterstützung u. a. bei der Skalierung von Demonstrations- und Pilotanlagen. Eine Unterstützung der Markteinführung, zum Beispiel durch Investitionsanreize von staatlicher Ebene, soll die Substitutionspotentiale bei CZTS-Zellen ab 2022 heben. Ebenso sollten Demonstrationsanlagen für Natrium-Schwefel-Batterien ab 2020 errichtet werden.

Für das Upscaling und der damit verbundenen Reduzierung des Herstellerpreises durch Economies of scale bzw. einer Verbesserung der Prozesskonformität sind Maßnahmen bei den cadmiumfreien Quantum Dots ab sofort, den glasbasierten weißen OLEDs ab 2020, dem Silber-Sintern ab 2020 und dem Mikro-Reibrührschweißen ab 2022 erforderlich. Eine Förderung könnte die Entwicklung von Prozessen, das Sammeln von Erfahrungen und den Aufbau einer großtechnischen und damit günstigeren Fertigung unterstützen.

Abbildung 45: Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen in der Markteinführung



Quelle: Eigene Darstellung

7.3 Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch

Die Erschließung von Substitutionspotentialen kann bei vielen Optionen durch Qualifizierung ausgewählter Akteursgruppen und gezieltem Austausch von Informationen unterstützt werden. Dies betrifft Substitutionsoptionen, die bereits marktreif sind und deren Marktdurchdringung unterstützt und beschleunigt werden soll.

Vor allem im Bereich der Motoren bzw. der NdFeB-Permanentmagnete sind bereits heute Substitutionsoptionen auf dem Markt. Dies liegt an dem starken Preisanstieg und Versorgungsengpass an Seltenen Erden in 2011, wodurch Substitutionsforschung bezüglich der Seltenen Erden angestoßen wurde. So sind bereits heute Elektromotoren mit einem reduzierten Gehalt an Seltenen Erden für Hybrid-, Plug-in-Hybrid- und vollelektrische Fahrzeuge, aber auch für Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie, auf dem Markt. Für den NdFeB-Permanentmagnet mit reduziertem SEE-Gehalt wird daher eine starke Durchdringung des Marktes bis 2025 angenommen: Für Elektromotoren in Hybridfahrzeugen, Plug-in-Hybridfahrzeugen und vollelektrischen Fahrzeugen jeweils 50 % und in den Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie 60 %. Weiterhin fahren vollelektrische Fahrzeugen ohne Seltenerdelemente mit Asynchronmotoren und extern erregten Synchronmotoren schon heute auf der Straße. Für diese Substitution wird ein Marktanteil in 2025 von jeweils 10 % erwartet. Der Niederspannungsmotor ohne Seltenerdelemente kann bereits heute in Nischenanwendungen den Motor mit Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie substituieren. Das Potential für 2025 wird mit 5 % angenommen, da das große Bauvolumen die möglichen Anwendungsbereiche einschränkt.

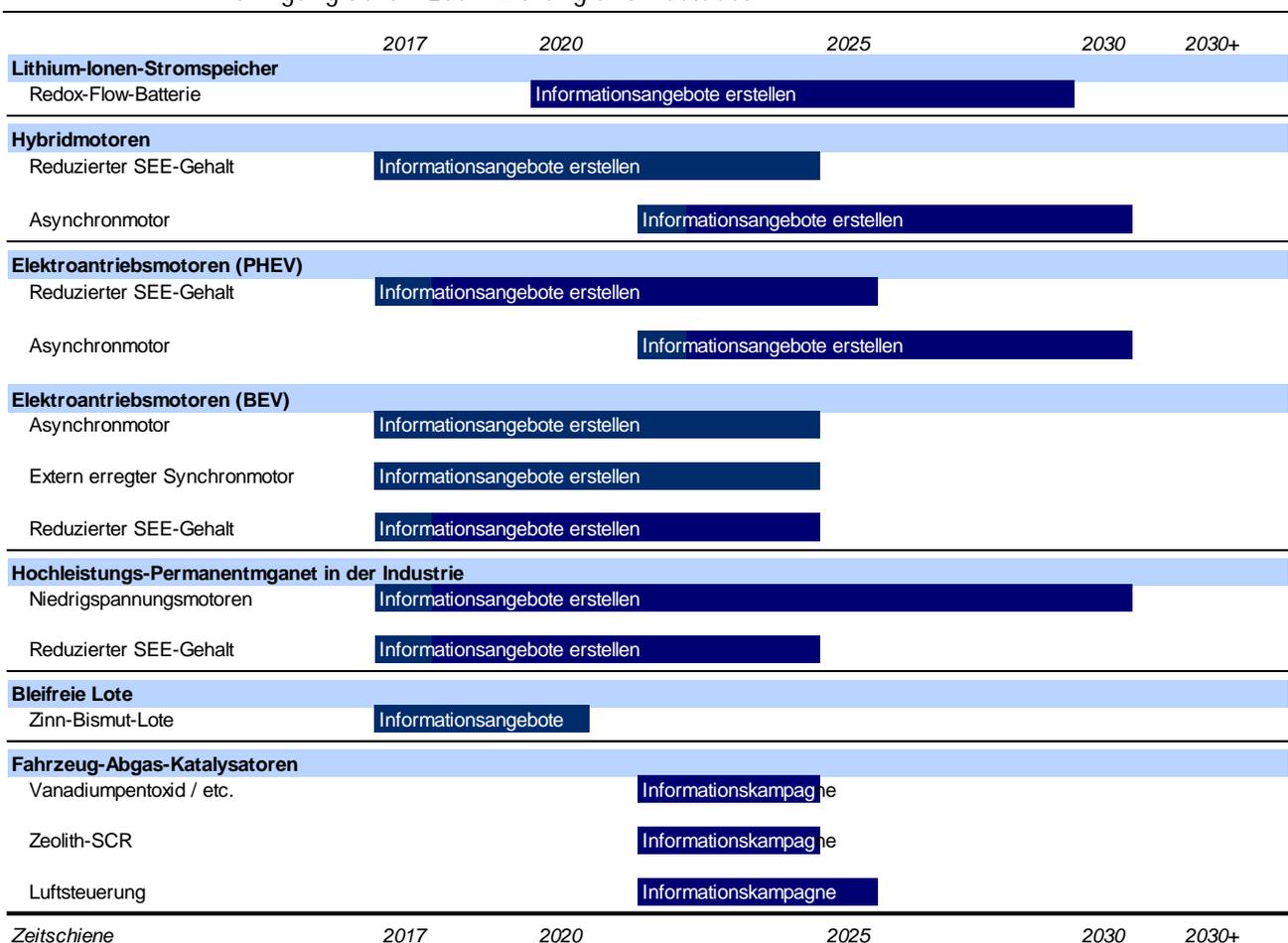
Die weitere Marktdurchdringung sollte durch bewusstseinsbildende und vertrauensschaffende Maßnahmen unterstützt werden. Hierbei besitzen v. a. die Motoren- wie auch Magnethersteller selbst ein Interesse ihr Produkt auf dem Markt zu etablieren. Daher sollten in diesen Unternehmen zunächst die eigenen Vertriebsleute umfassend qualifiziert werden, um die Kunden von den Vorteilen der innovativen Elektromotoren zu überzeugen. Wichtige Zielgruppen für gut aufbereitete Informationen (Schwerpunkt Energieeffizienz, geringere Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen) sind hier vor allem Kunden aus der Automobilindustrie sowie aus allen Industriebranchen, die ein weites Einsatzspektrum an Elektromotoren aufweisen.

Weiterhin sollten auch Anstrengungen der Bundesregierung (z. B. BMUB, BMWi), von Netzwerken und Verbänden (z. B. VDMA, VDA, ZVEI, VDI ZRE) und der EU (z. B. JRC, Horizon 2020) zur Schaffung von

Informationsangeboten zur Substitution des NdFeB-Permanentmagneten in Elektromotoren auf den Weg gebracht werden. Mit dieser Informationsoffensive sollte umgehend begonnen werden.

Auch bei anderen Umwelttechnologien sind zielgruppenspezifische Informationsangebote notwendig. Dies ist beispielsweise bei den SCR-Technologien (Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR bzw. Zeolith) der Fall. Hier gibt es bereits praxisrelevante Entwicklungen, aber eine Optimierung der Entwicklungen und eine Informationskampagne der Katalysatorhersteller mit Unterstützung der Unternehmen im Bereich Steuerungselektronik zur Marktdurchdringung sind für das Erreichen der jeweils für möglich erachteten Marktanteile (5 %) der SCR-Technologien notwendig. Zielgruppe der Informationskampagne sind letztlich die Automobilhersteller, die von den Vorzügen der optimierten Abgasreinigungstechniken im Fahrzeugbereich überzeugt werden müssen. Auch Umweltverbände, die sich in ihren Aktivitäten dem Bereich Schadstoffminimierung aus dem Kraftfahrzeugbereich schwerpunktmäßig widmen (Stichwort: Luftreinhaltung in besonders belasteten Städten), sind wichtige Adressaten entsprechender Informationskampagnen.

Abbildung 46: Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen zur Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch

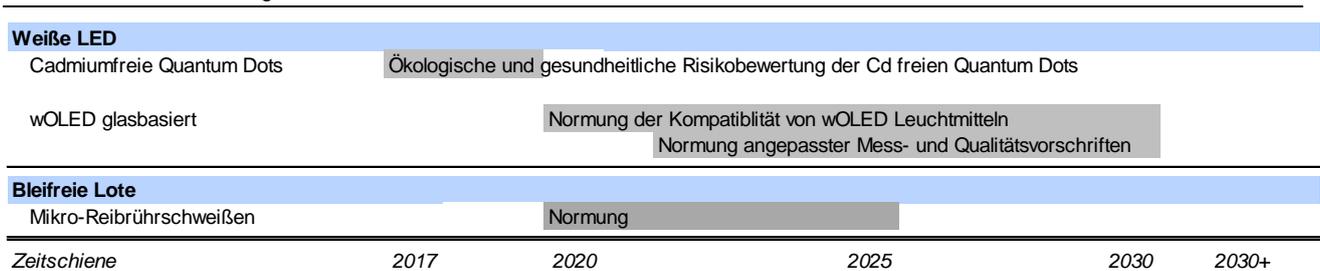


Quelle: Eigene Darstellung

7.4 Rechtlich-regulatorischer Rahmen

- ▶ Neben der Technologieentwicklung, der Marktdurchdringung, der Qualifizierung und dem Austausch sind auch Maßnahmen im rechtlich-regulatorischen Rahmen von Bedeutung (z. B. bei den glasbasierten weißen OLED).
- ▶ Der rechtlich-regulatorische Rahmen bezieht sich zum einen auf die Normungsebene, wodurch die Erschließung von Substitutionspotentialen unterstützt werden soll. Bei den glasbasierten weißen OLEDs soll die Normung die Anwendbarkeit im Alltag verbessern. Inbegriffen sind zum einen die Normung der Kompatibilität von weißen OLED Leuchtmitteln und zum anderen die Normung angepasster Mess- und Qualitätsvorschriften. Relevante Akteure im Bereich der Normung sind Designer und die Industrieunternehmen selbst, aber auch das Deutsche Institut für Normung (DIN) sowie das europäische Komitee für Normung (CEN).
- ▶ Ebenso sollten die Innovationen durch begleitende Erforschung der Umweltaspekte und gesundheitlicher Auswirkungen von Cd-freien Quantum Dots flankiert werden, insbesondere in Hinblick auf die Herstellungsphase der Quantum Dots und die sichere Entsorgung und das Recycling der Leuchtmittel. Diese Bewertung fällt in den Aufgabenbereich von Universitäten und Forschungsinstituten und könnte mit öffentlichen Forschungsgeldern vom Bund (BMU) finanziert werden.

Abbildung 47: Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit Maßnahmen zum rechtlich-regulatorischen Rahmen



Quelle: Eigene Darstellung

7.5 Prioritäten der Substitutionsoptionen nach erwartetem Marktanteil in 2025

Die Maßnahmen zum Heben der Substitutionspotentiale der einzelnen Umwelttechnologien werden zusätzlich nach ihrem erwarteten Marktanteil in 2025 strukturiert. Hierfür wird abgeschätzt, wie hoch der Marktanteil der Substitutionstechnologie in 2025 sein könnte, der die Ursprungstechnologie ersetzt. Die Substitutionsoptionen werden in drei Gruppen untergliedert.

- ▶ Marktanteil der Substitutionsoption in 2025 > 15 %
- ▶ Marktanteil der Substitutionsoption in 2025 > 5 % - 15 %
- ▶ Marktanteil der Substitutionsoption in 2025 ≤ 5 %

Die Substitutionsoptionen mit einem erwarteten Marktanteil von über 15 % in 2025 werden als sehr aussichtsreich in ihrer Umsetzung angesehen. Daher wird an dieser Stelle der Fokus auf diese Substitutionsoptionen gelegt werden. Die potentiellen Marktanteile der Substitutionsoptionen für 2050 sind in Kapitel 6.1. ausgewiesen.

Bei den Tandemzellen wird ein Marktpotential für die **Substitution von Indium in ITO** in 2025 mit 50 % angenommen. Um dieses Substitutionspotential in 2025 zu erreichen, muss die Prozessentwicklung gefördert werden. Die Technologieentwicklung Richtung verbesserte großtechnische Umsetzung sollte direkt in Forschungseinrichtungen (z. B. Fraunhofer Gesellschaft, Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen(AiF)) angestoßen werden.

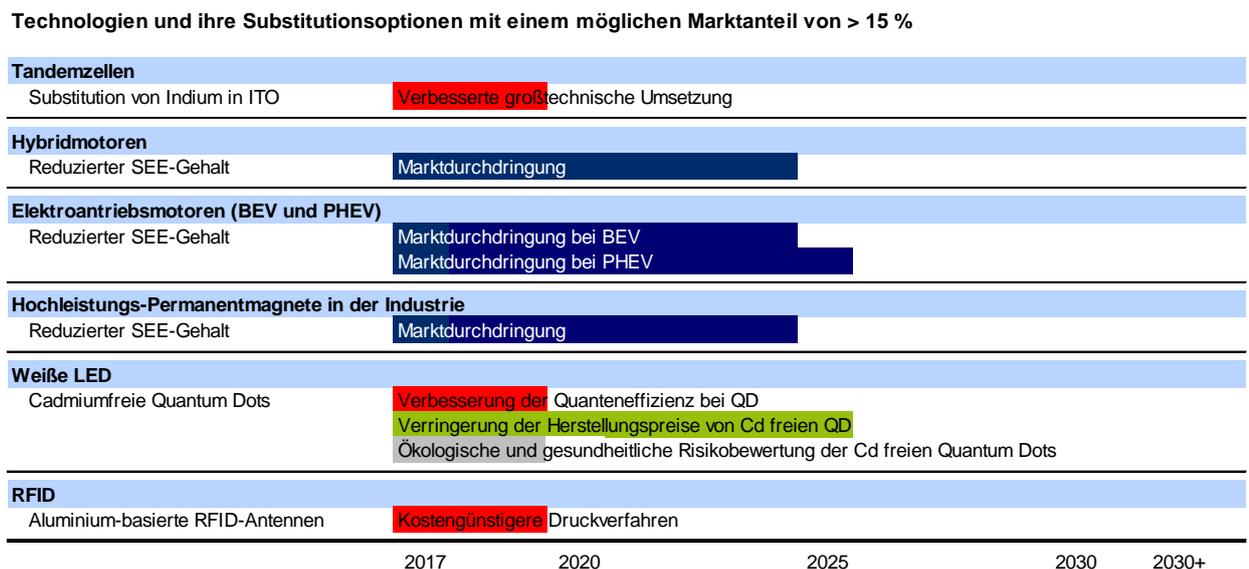
Bei den NdFeB-Permanentmagneten in Motoren sind bereits heute Substitutionsoptionen für Elektromotoren in Hybrid-, Plug-in-Hybrid- und vollelektrischen Fahrzeugen aber auch bei Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie in Form von **NdFeB-Permanentmagneten mit reduziertem Seltenen Erden-Gehalt** auf dem Markt. Für den NdFeB-Permanentmagnet mit reduziertem SEE-Gehalt wird eine starke **Marktdurchdringung** bis 2025 angenommen: Für Elektromotoren in Hybridfahrzeugen, Plug-in-Hybridfahrzeugen und vollelektrischen Fahrzeugen jeweils 50 % und in den Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie 60 %. Hauptakteure sind v. a. die Motoren- wie auch Magnethersteller selbst mit dem Interesse ihr Produkt auf dem Markt zu etablieren.

Für die Substitution weißer LEDs durch **cadmiumfreie Quantum Dots** wird ein Marktpotential von 50 % in 2025 angenommen. Zur Erreichung des Substitutionspotentials sind Maßnahmen in den Handlungsfeldern Technologieentwicklung, Markteinführung und im rechtlich-regulatorischen Rahmen notwendig. Die F&E-Anstrengungen hinsichtlich einer Verbesserung der Quanteneffizienz bei den Quantum Dots sollte umgehend bei Universitäten und der Fraunhofer Gesellschaft Forschungseinrichtungen beginnen. Finanziert werden sollte diese F&E-Maßnahme durch eine öffentliche Förderung durch den Bund (BMBF). Für die Markteinführung steht die Verringerung des Herstellungspreises von cadmiumfreien Quantum Dots im Fokus. Bis 2025 sollte mit Hilfe der Industrie und europäischen Forschungsrahmenprogrammen zum Upscaling der industriellen Produktion die Marktdurchdringung erzielt werden. Weiterhin sind im rechtlich-regulatorischen Rahmen ökologische und gesundheitliche Risikobewertungen der cadmiumfreien Quantum Dots anzustoßen. Universitäten und Forschungsinstitute sollten mit Hilfe öffentlicher Förderung (BMU) umgehend tätig werden.

Ebenso besitzt die Substitution von RFID durch **Aluminium-basierte RFID-Antennen** großes Marktpotential. Es wird angenommen, dass 96 % der Ursprungstechnologie durch die Aluminium-basierte Antennen substituiert werden können. Um dieses Potential zu heben, sind aber noch F&E-Maßnahmen anzustoßen. Die F&E-Anstrengungen zielen auf die Entwicklung kostengünstiger Druckverfahren für die Herstellung robuster Aluminium-Tags auf Verpackungskunststoffen. Sowohl die Industrie wie auch die Fraunhofer Gesellschaft sollten mit der Forschung umgehend beginnen. Auch nationale Forschungsprogramme vom BMBF könnten die Forschung unterstützen.

In der folgenden Abbildung sind die Umwelttechnologien mit den Substitutionsoptionen mit einem potentiellen Marktanteil über 15 % und den jeweiligen Maßnahmen in einer Zeitschiene illustriert.

Abbildung 48: Umwelttechnologien und ihre Substitutionsoptionen mit einem möglichen Marktanteil > 15 % in 2025



Quelle: Eigene Darstellung

Weitere vier Umwelttechnologien weisen Substitutionsalternativen mit einem Marktpotential von > 5 % bis 15 % in 2025 auf.

- ▶ Die glasbasierten OLEDs könnten weiße LED in 2025 zu 10 % substituieren. Um dieses Potential zu heben, sind zum einen F&E-Anstrengungen hinsichtlich Verlängerung der Lebensdauer und technischer Verbesserungen umgehend anzustoßen. Ab 2020 müssen zusätzlich Maßnahmen in der Markteinführung wie der Verringerung des Herstellungspreises sowie der Normung hinsichtlich der Kompatibilität durchgeführt werden.
- ▶ Für den **Elektroantriebsmotor** in vollelektrischen Fahrzeugen mit NdFeB-Permanentmagneten sind bereits heute Substitutionsalternativen ohne Seltenerdelemente auf dem Markt. Der **Asynchronmotoren** und der extern erregter Synchronmotoren besitzen jeweils 10 % Marktpotential in 2025 zur Substitution der NdFeB-Permanentmagnete. Da beide Substitutionsoptionen bereits auf dem Markt sind, liegt der Maßnahmenfokus auf Informationsangeboten zur Bewusstseins- und Vertrauensbildung, um die angeführte Marktdurchdringung zu erreichen. Hauptakteure sind dabei Motorenhersteller selbst aber auch der VDMA sowie weitere nationale Verbände, die Bundesregierung und europäische Akteure (Joint Research Center, EIT Raw Materials, Forschungsprogramme). Sie sollten die Erstellung von Informationsmaterial umgehend anstoßen.
- ▶ Die bleifreien Lote besitzen mit dem **Silber-Sintern** eine Substitutionsoption mit einem Marktpotential von 10 % in 2025. Um dieses Potential zu heben sind F&E-Anstrengungen (Prozessentwicklung, Prozessautomation, Upscaling) anzustoßen und Verbesserungen in der Prozesskonformität zu erreichen.
- ▶ Für das **Redox-Flow-Batteriesystem** als Substitution für stationäre Lithium-Ionen-Stromspeicher wird ein Marktpotential von 10 % in 2025 angenommen. Für eine Markteinführung müssen zunächst Elektrolyte, Lösungen und Membranen optimiert werden. Diese Technologieentwicklung sollte möglichst schnell mit Hilfe von Forschungseinrichtungen unter Finanzierung vom Bund (BMW, BMBF) erfolgen. Weiterhin müssen zur Marktdurchdringung Informationsangebote zur Bewusstseins- und Vertrauensbildung von den zuständigen Verbänden erstellt und verteilt werden.

Es wurden ebenso Substitutionsoptionen mit einem geringen potentiellen Marktanteil von $\leq 5\%$ in 2025 untersucht. Hierzu zählen:

- Die **Asynchronmotoren** ohne Seltenerdelemente können die Elektromotoren mit NdFeB-Permanentmagneten in Hybridfahrzeugen und Plug-in-Hybridfahrzeugen substituieren. Um die derzeit noch bestehenden Nachteile in der Leistungsdichte zu heben, sind zeitnah F&E-Anstrengungen anzustoßen.
- Das **Deacon-Verfahren** kann die Membranelektrolyse substituieren. Auch hier ist eine Technologieentwicklung (edelmetallfreie Alternativen für Katalysatoren für die Elektrolyse) für einen Markteintritt zu heben.
- Bei den **Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren** sind **SCR-Technologien** (Vanadiumpentoxid /Titandioxid/Wolfram-SCR bzw. Zeolith) und die **Luftsteuerung** als Substitution möglich, die aber Technologieentwicklungen benötigen, um in den Markt eintreten zu können. Zur effektiveren Implementierung der SCR-Technologien wird zum Beispiel eine bessere Ammoniakzuführung mittels Harnstofflösung benötigt. Eine verbesserte Luftsteuerung ist zur Reduktion des Cerbedarfs im Katalysatorsystem notwendig. Hierzu muss die eingesetzte Sensorik verbessert bzw. ausgetauscht werden. Bei beiden Substitutionsoptionen sind sowohl die Automobilkonzerne und ihre Zulieferer gefragt als auch die Bundesregierung mit ihren Ministerien, die Pilotprojekte fördern können. Auf EU-Ebene könnte eine Förderung über Horizon 2020-Ausschreibungen oder das EIT erfolgen.

- ▶ Substitutionsalternativen mit geringem Marktpotential bei bleifreien Loten sind **Zinn-Bismut-Lote** und das **Mikro-Reibrührschweißen**. Zinn-Bismut-Lote können helfen, den Bedarf an den Rohstoffen Zinn und Silber zu senken. Forschungsbedarf besteht daher in der Weiterentwicklung der technischen Eigenschaften (Sprödigkeit, Verarbeitungstemperatur) und dem Erreichen der industriellen Anwendungsreife. Das Mikro-Reibrührschweißen basiert auf fundamental anderen Verbindungstechnologien und kommt ohne Lote aus. Es sind Innovationen zur Prozessautomation und -integration auf Ebene der gesamten Wertschöpfungskette in der Elektronikindustrie erforderlich.
- ▶ Im Bereich der Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie sind ebenso **NdFeB-Permanentmagnete** im Einsatz. Der **Niedrigspannungsmotor** kommt ohne die kritischen Seltenen Erden aus und ist bereits heute in Nischenbereich als Substitutionstechnologie einsetzbar. Informationsmaterial für Bewusstseins- und Vertrauensbildung muss erstellt werden, um ein Marktpotential von 5 % in 2025 zu erreichen.
- ▶ **CZTS-Zellen** sind eine potentielle Substitutionsoption für die Dünnschicht-PV. Die bisher erreichten Wirkungsgrade von 12,6 % sind noch zu gering, um wettbewerbsfähig zu sein. Daher sind weitere Forschungsanstrengungen nötig, um den Wirkungsgrad zu verbessern. Weiterhin müssen vielversprechende Forschungsergebnisse in Entwicklungsprojekte umgesetzt werden. Hier können Förderungen für die Errichtung von Demonstrationsanlagen die Erschließung von Substitutionspotentialen unterstützen.
- ▶ **Doppelschichtkondensatoren** können die herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen entlasten und dass diese kleiner dimensioniert werden können. Heute ist die **Energiedichte** noch vergleichsweise gering. Daher liegt liegen die zentralen Forschungs- und Entwicklungsanforderungen in der Erhöhung der Energiedichte durch verbesserte Elektroden und der Optimierung des Batteriemangements. Ein wichtiger Bestandteil ist hierbei die **Materialforschung**.
- ▶ Eine Substitutionsoption der stationären Lithium-Ionen-Stromspeicher liegt in **Natrium-Schwefel-Batterien**. Eine der zentralen Herausforderungen bei der Weiterentwicklung und Verbreitung von Natrium-Schwefel-Batterien ist die Reduktion der Betriebstemperatur, die mit über 300 °C vergleichsweise hoch ist (Hochtemperatur-Batterie) und daher insbesondere in Ruhephasen einer Wärmezufuhr bedarf. Durch eine deutliche Verringerung der Betriebstemperatur könnten dann auch neue Märkte, u. a. der Markt der privaten Nutzer, erschlossen werden, was zu einem erhöhten Absatz und voraussichtlich zu einer weiteren Kostendegression führt. Um die Weiterentwicklung von Natrium-Schwefel-Batterien voran zu bringen, wäre eine gezielte Erforschung dieser Batterie-Technologie, die durch den Bund bzw. die einzelnen Ministerien (BMBF, BMWi) geleistet wird, notwendig.
- ▶ Geringe Marktpotentiale besitzen auch Substitutionsalternativen für den Permanentmagnet-Generator in Windkraftanlagen. **HTS-Generatoren** und **FeCo-, FeNi-basierte Magnete** besitzen Marktpotentiale von jeweils 5 % in 2025. Hier sind F&E-Maßnahmen erforderlich, um Wirkungsgrade und die Zuverlässigkeit weiterzuentwickeln. Generatoren auf Basis von **Hochtemperatur-Supraleitern (HTS)** sind eine vergleichsweise junge Technologielinie, die es potentiell erlaubt, für hohe Leistungsbereiche sehr hohe Wirkungsgrade bei geringem Gondelgewicht zu realisieren. Zwar gibt es einige Demonstrationsprojekte, jedoch ist noch nicht abzusehen, wann HTS-Generatoren in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen könnten. Forschungsanstrengungen zielen auf die Entwicklung von Materialien, die auch bei Temperaturen, die mit flüssigem Stickstoff realisiert werden können, supraleitende Eigenschaften aufweisen. Diese Anstrengungen erfolgen auf der Ebene der Materialforschung. Permanentmagnete lassen sich auch ohne Seltenerdelemente fertigen. Bisher liegen jedoch die erreichbaren Energiedichten deutlich unter denen von NdFeB-basierten Magneten. Vielversprechende Ansätze liegen in der Entwicklung von FeCo- oder FeNi-basierten Materialien. Die Forschung sollte auf die Suche nach aussichtsreichen Materialkombinationen und der Verbesserungen ihrer magnetischen Eigenschaften

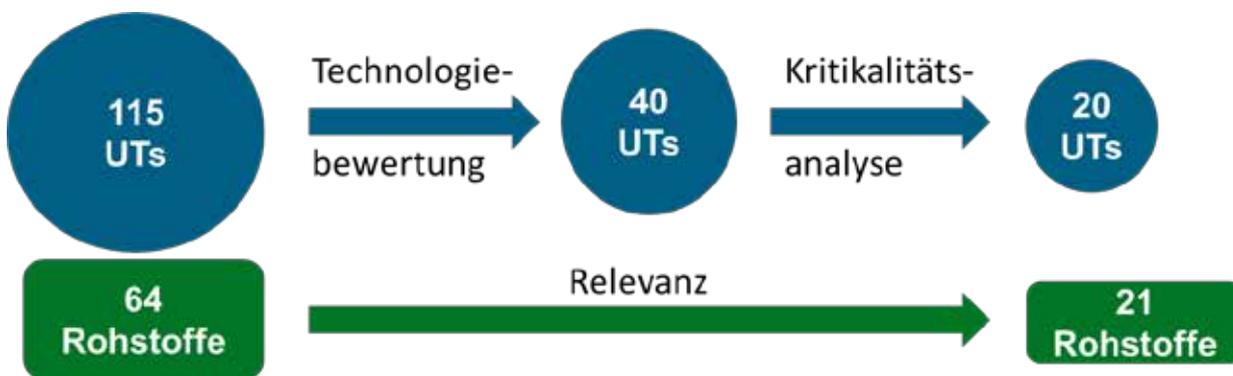
ten ausgerichtet werden. Akteure sind im Wesentlichen Universitäten und größere Forschungseinrichtungen, deren Forschung durch nationale und internationale Institutionen (z. B. EIT Raw Materials) gefördert werden müssten.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Substitution ist in der europäischen wie auch nationalen Rohstoffstrategie ein zentraler Pfeiler neben dem Recycling, der Materialeffizienz und der nachhaltigen Primärrohstoffversorgung.

Die im Projekt entwickelte und erstmals angewendete Methodik des systematischen Screenings, Monitorings und der Prioritätensetzung von Umwelttechnologien und Substitutionsalternativen hat sich sehr bewährt und ein entsprechendes positives Feedback von externen Akteuren im Rahmen von Fachworkshops erhalten. In einem ersten Schritt wurde ein ausführliches Screening von 115 Umwelttechnologien durchgeführt. Auf Basis einer ersten Technologiebewertung wurden 40 Umwelttechnologien ausgewählt (Siehe Kapitel 2.1 bzw. Arbeitsbericht 1 und 2). Anschließend wurden mit Hilfe einer Kritikalitätsanalyse inklusive einer quantitativen Analyse 20 prioritäre Umwelttechnologien und 21 besonders relevante Rohstoffe identifiziert (siehe Arbeitsbericht 3).

Abbildung 49: Fokussierung der Umwelttechnologien und Rohstoffe



Quelle: Eigene Darstellung

Die 20 prioritären Umwelttechnologien wurden auf Substitutionsalternativen untersucht (siehe Kapitel 5 bzw. Arbeitsbericht 4). Relevante Substitutionsalternativen liegen vor allem in den Technologiefeldern Elektromotoren, Solarenergie, Beleuchtung und Speichertechnologien.

In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass Themen von hoher industriepolitischer Bedeutung autonom hinsichtlich Effizienzsteigerungen und Substitutionsmöglichkeiten angetrieben werden.

Bei den Elektromotoren ist der Seltenerdelemente-Permanentmagnetmotor die grundlegende Technologie. Aufgrund der drastischen Preissteigerung der Seltenen Erden in 2010/2011 wurden Entwicklungen in der Substitutionsforschung der Seltenerdelemente-Permanentmagnetmotoren in den vergangenen Jahren bereits angestoßen. Hier sind folglich Substitutionsoptionen bereits heute auf dem Markt vorhanden. Für andere Technologien sind parallele Entwicklungen in naher Zukunft zu erwarten, wie etwa bei Speichertechnologien. Dieser Technologiegruppe wird aktuell schon viel Aufmerksamkeit zuteil (Bsp.: Nationale Plattform Elektromobilität, Energiespeicher-Roadmap [Fraunhofer ISI 2017]). Allerdings sind diese Substitutionsoptionen nicht so weit fortgeschritten wie bei den Elektromotoren. Bei anderen Technologiefeldern sind die Substitutionsoptionen bislang weniger im Fokus und daher kaum ausgereift.

Das breite Spektrum an Maßnahmen sowie die Ressourcen, die zu ihrer Umsetzung notwendig sind, machen deutlich, dass die Realisierung der Roadmap nur in einer konzertierten Aktion von Herstellern, Anwendern, Politik und Wissenschaft gelingen kann. Die Roadmap macht deutlich, dass die Erschließung der aufgezeigten Substitutionspotentiale gezielte Anstrengungen der Akteure im Innovationsystem sowohl auf Seiten der Politik (z. B. im Rahmen der Forschungs-, Innovations- und Diffusionsförderung) und der Forschungseinrichtungen (z. B. Fraunhofer-Gesellschaft, Industrielle Gemein-

schaftsforschung AIF, Hochschulen, Großforschungseinrichtungen etc.) als auch auf Seiten der Wirtschaft und Verbände erforderlich sind. Neben den Ansätzen zur Implementierung der aufgezeigten Roadmap sind weiterführende Handlungsempfehlungen zu verfolgen:

- ▶ Ein vorausschauender Ansatz soll mithilfe eines regelmäßigen Monitorings in der Praxis verankert werden. Alle vier Jahre sollten die Umwelttechnologien und dafür erforderliche Rohstoffe auf Kritikalität und Substitutionsoptionen überprüft werden.
- ▶ Entsprechende Vertiefungen in Richtung Effizienzsteigerung und Substitution sollten nicht erst angestoßen werden, wenn Rohstoffe bereits knapp und kritisch eingestuft sind. Daher ist ein systematisches Screening und frühzeitiges Betrachten von Kritikalitätsaspekten von Rohstoffen notwendig.
- ▶ Bei den Substitutionsoptionen soll der Diversität an materiellen, technologischen und funktionalen Substitutionen Rechnung getragen werden, da diese zum Teil sehr unterschiedliche Reifegrade und Zeithorizonte besitzen.
- ▶ Substitutionsformen sind auch in ihrer globalen Dimension und Skalierung zu bewerten, da sich weltweit der Bedarf an einigen grundlegenden Umwelttechnologien gleichermaßen abzeichnet.
- ▶ Die prioritär eingestuften Substitutionsalternativen sollten vertieft analysiert und in die hier erarbeitete Roadmap überführt werden, um deren Entwicklung und Etablierung konzertiert und koordiniert voranzutreiben.
- ▶ Bei der Bewertung der rohstoffwirtschaftlichen Auswirkungen der Substitutionsalternativen sind ganze Technologieportfolios zu berücksichtigen, die sich kumulative und möglicherweise auch konkurrierende Rohstoffbedarfe ergeben.
- ▶ Eine Unterstützung der Substitutionsforschung in der Bundesrepublik könnte erfolgen durch
 - Öffnung des Rohstoffeffizienzpreises Richtung Substitution
 - Starten eines eigenen BMBF-Forschungsprogramms „Substitution“ zu den Bereichen Beleuchtung, Solar- und Speichertechnologien.

Das Thema Substitution von kritischen Rohstoffen sollte zukünftig vorausschauender angegangen werden, um die Auswirkung von Knappheit auf die Volkswirtschaft zu minimieren. Da die Märkte für Rohstoffe sehr volatil sind und die Förderung einiger Rohstoffe auf wenige Länder beschränkt, kann es in Zukunft häufiger passieren, dass Preisschocks kurzfristig drastische Auswirkungen haben können.

9 Literatur / Quellen

- Achzet et al. 2011: Achzet, B.; Reller, A.; Zepf, A. (2011): Materials critical to the energy industry. An Introduction. http://www.physik.uniaugsburg.de/lehrestuehle/rst/downloads/Materials_Handbook_Rev_2012.pdf
- Alotto et al., 2013: Redox flow batteries for the storage of renewable energy. P. Alotto, M. Guarnieri, F. Moro. 2013
- American Physical Society 2011: American Physical Society (2011) Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies, <http://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/upload/elementsreport.pdf>
- ANL (Argonne National Laboratory) 2012 Argonne National Laboratory, Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle.
- Argonne National Laboratory 2009 Lithium-Ion Batteries: Possible Material Issues IEA 2012
- Association Connecting Electronics Industries (IPC) (2009): Joint Industry Standard, Requirements for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronic Soldering Applications, IPC J-STD-006B, Amendments 1&2, September 2009, online verfügbar unter: http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/Free/j-std-006b-amendments-1-2.pdf#xml=http://localhost/texis/searchipc/pdfhi.txt?query=Sn+Bi&pr=IPC-NonMember&prox=page&rorder=500&rprox=500&rdfreq=0&rwfreq=1000&rlead=750&rdepth=31&sufs=1&order=r&cq=&sr=-1&id=527d929017 (abgerufen am 25.01.2018)
- B. Diouf, R. Pöde 2014: Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. Materials Today. 2016
- Babar, A.A.; J. Virtanen; V. A. Bhagavati; L. Ukkonen; A. Z. Elsherbeni; P. Kallio; L. Sydänheimo (2012) Inkjet-Printable UHF RFID Tag Antenna on a Flexible Ceramic-Polymer Composite Substrate.
- Battery University 2010: Can the Lead-acid Battery Compete in Modern Times?, http://batteryuniversity.com/learn/archive/can_the_lead_acid_battery_compete_in_modern_times
- BaWü 2014: Öko-Institut e.V.: Buchert, M. et al. (2014): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, i.A. des Ministerium für Umwelt, Klima u. Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg, Stuttgart 2014.
- BINE 2011 BINE Informationsdienst, Photovoltaik – Innovationen.
- Birke 2015 Persönliches Gespräch mit Peter Birke am 18.05.2015
- BMU/BMBF 2008: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesministerium für Bildung und Forschung (2008). Masterplan Umwelttechnologien. Berlin. http://www.fona.de/pdf/publikationen/masterplan_umwelttechnologien.pdf
- BMUB 2012: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 3.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
- BMUB 2014: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Büchele R. et al., Roland Berger Strategy Consultants, Berlin, Juli 2014.
- BMUB 2016: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen; abrufbar unter <https://www.bmu.de/publikation/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-ii-programm-zur-nachhaltigen-nutzung-und-zum-schutz-der-natue/>
- BMW 2009: Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Stuttgart 2009.
- Buchert et al. 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Gefördert durch das BMUB, Darmstadt, 2011 (<http://www.oeko.de/oekodoc/1340/2011-003-de.pdf>)

- Buchert et al. 2014: Buchert, M.; Manhart, A.; Sutter, J.: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industrielle Einsatz in Baden-Württemberg. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Januar 2014 (<http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>)
- Bulan, A. (2015): Schriftliche Mitteilung vom 14.08.2015
- Bulan, A. (2016a): Mündliche Mitteilung vom 13.10.2016
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2014): DERA Rohstoffinformationen (20): Zinn, 2014, online verfügbar unter: http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-20.pdf?__blob=publicationFile&v=9 (abgerufen am 25.08.2016)
- Burke, Zhao 2015: Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles. A. Burke, H. Zhao.
- Coenen et al. 1996: Coenen, R., Klein-Vielhauer, S., Meyer, R (1996): Integrierte Umwelttechnik: Chancen erkennen und nutzen. Berlin.
- COM(2017): Europäische Kommission. Communication of the European Commission on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU, COM(2017)490, 2017 (abrufbar unter <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/EN/COM-2017-490-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF>)
- CRM InnoNet 2013: Substitution of Critical Raw Materials. Deliverable report. D3.3 Raw material profiles, September 2013
- CRM InnoNet 2015: Substitution of critical raw materials. 2015
- Deubzer, O. (2007): Explorative Study into the Sustainable Use and Substitution of Soldering Metals in Electronics – Ecological and Economical Consequences of the Ban of Lead in Electronics and Lessons to Be Learned for the Future; PhD thesis TU Delft, The Netherlands, January 2007, ISBN 978-90-5155-031-3, online verfügbar unter: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Af9a776cf-57c3-4815-a989-fe89ed59046e/> (abgerufen am 25.01.2018)
- DERA 2016: Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016, Nr. 28, Berlin, Auftragsstudie, Autoren: Frank Marscheider-Weidemann, Sabine Langkau, Torsten Hummen, Lorenz Erdmann, Luis Tercero Espinoza, Gerhard Angerer, Max Marwede, Stephan Benecke, https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- DLR 2015: Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität, Abschlussbericht. Stuttgart, 2015
- DoE 2012 Department of Energy, SunShot Vision Study. <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/47927.pdf>
- Elektronik Praxis 2015: Substitution Seltener Erden mithilfe der Nanotechnologie, <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/nanotechnologie/articles/492019/>
- EU 2016: Materials Information system. Institute for energy and Transport (EIT). European Commission
- EU 2016: Materials Information System. Institute for energy and Transport (EIT). European Commission. 2016
- EU 2014: Europäische Kommission: Report on Critical Raw Materials for the EU, 2014 (abrufbar unter: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_de)
- European Commission Joint Research Centre, 2012 European Commission Joint Research Centre. (2012). Strategic Energy Technology Plan. Luxemburg: Publications Office of the European Union
- European Commission Joint Research Centre, 2012 European Commission Joint Research Centre. (2012). Strategic Energy Technology Plan. Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- European Parliament 2011: Future Metal Demand from Photovoltaic Cells and Wind Turbines, http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET%282011%29471604_EN.pdf
- Ferdinand, L. (2009): Was ist molekulare Elektronik?, Seminarvortrag, Heidelberg 2009, online verfügbar unter: http://www.uni-heidelberg.de/institute/fak12/OC/hashmi/MCII/MCII/seminar/Was_ist_Molekulare_Elektronik_2009.pdf (abgerufen am 25.01.2018)
- Fraunhofer ISE 2013d Fraunhofer ISE, Entwicklungslinien der PV-Technologien und Materialsubstitutionsmöglichkeiten. Freiburg
- Fraunhofer ISE 2014 Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report. Freiburg
- Fraunhofer ISE 2015 Fraunhofer ISE, Current Status of Concentrator Photovoltaic. Freiburg

Fraunhofer ISE, 2013b Fraunhofer ISE, Overview about technology perspectives for high efficiency solar cells for space and terrestrial applications

Fraunhofer ISI 2010: Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030, Karlsruhe

Fraunhofer ISI 2015: Roadmap for the Substitution of Critical Raw Materials in Electric Motors and Drives, http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/en/publikationen/CRM-InnoNet-Roadmap-for-CRM-substitution_Electric_Motors_And_Drives.pdf

Fraunhofer ISI 2017: Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien, Karlsruhe, Dezember 2017, Abrufbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>

Fraunhofer IWES, 2014 Windenergiereport Windenergie Report Deutschland 2014

Fraunhofer IWS, o.J.: SubITO – Entwicklung eines Schichttransfer-Verfahrens für die Substitution von Zinn-dotiertem Indiumoxid (ITO) durch Fluor-dotiertes Zinndioxid (FTO) in leitfähigen, transparenten Polymerfolien, http://www.iws.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/chemische_oberflaechen_reaktionstechnik/chemische_oberflaechentechnologie/projekte/subito.html#

Graedel 2012: Graedel, T. E. / Barr, R. / Chandler, C. u.a.: Methodology of Metal Criticality Determination. Environ. Sci. Technol., Volume 42, Issue 2, S. 1063 - 1070. (<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es203534z>)

Graedel 2015: 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, S. 4257 - 4262. (<http://www.pnas.org/content/112/14/4257.full.pdf?with-ds=yes>)

greencarcongress 2016: Honda begins production of motor free of heavy rare earth elements. 24 August 2016 (<http://www.greencarcongress.com/2016/08/20160824-honda.html>)

GWEC, 2014 Global Wind Energy Outlook

hzwei 2016: Auch Pedelecs fahren mit Brennstoffzellen. abgerufen am 22.08.2016 unter <http://www.hzwei.info/blog/2016/03/14/auch-pedelecs-fahren-mit-brennstoffzellen/>

IEA 2012 International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris.

IEA 2014 Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy. Paris

IEEE 2013 R. Qu, Y. Liu, J. Wang, Review of Superconducting Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines, <http://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/ASC2012-4LPG-09.pdf>

ingenieur.de 2016: Alpha E-Bike. 2016 kommt erstes Wasserstoff-Fahrrad auf den Markt. Artikel vom 10.12.2015 <http://www.ingenieur.de/Themen/Fahrrad/2016-kommt-erstes-Wasserstoff-Fahrrad-Markt>

INREP 2016: Towards Indium free TCOs, http://www.inrep.eu/files/leaflet%20%20poster/INREP_Leaflet_20160517.pdf

IRENA 2012: Renewable energy technologies, Volume 1: Concentrated solar power. http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf

IRENA. (2015). Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook.

JRC 2013: Moss, R.L. et al. 2009 Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector, JRC Scientific and Policy Papers, <http://setis.ec.europa.eu/system/files/Critical%20Metals%20Decarbonisation.pdf>

Kalyania, T., Dhobleb S.J. (2012) Organic light emitting diodes: Energy saving lighting technology—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2696–2723.

Kostka, J. 2015: Energiewende vor Ort: Boschs Erfahrungen mit Energiespeichern, https://www.hs-karlsruhe.de/fileadmin/hska/EIT/Aktuelles/seminar_erneuerbare_energien/Sommer_2015/Folien/2015_06_17_FH_Karlsruhe_Bosch_Speicher_Kostka_Druckversion.pdf

LED professional Review (2015) Cadmium-Free Quantum Dot Technology in LED Lighting. Online verfügbar: <https://www.led-professional.com/technology/light-generation/cadmium-free-quantum-dot-technology-in-led-lighting>

NABU 2013: Kreibich, R., Hofmann, D., Handke, V. und Scharp, M. 2013. Ressourcenschonung durch ausgewählte grüne Zukunftstechnologien. Auftraggeber Naturschutzbund Deutschland NABU, Bearbeitung IZT.

- Natural Resources Defense Council (NRDC) (2014): Data Center Efficiency Assessment: Scaling Up Energy Efficiency Across the Data Center Industry: Evaluating Key Drivers and Barriers, Issue Paper.
- Pavel et al. 2017: Pavel, C.; Tiel, C.; Degreif, S.; Blagoeva, D.; Buchert, M.; Schüler, D.; Tzimas, E: Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications (abrufbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993716300641>)
- 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. Abrufbar unter: http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf
- REFREEPERMAG - FP7 EU Project 2015: Rare Earth Free Permanent Magnets. http://www.criticalrawmaterials.eu/wp-content/uploads/reefreepermag_niachros.pdf
- REN21, 2015 Renewables 2015, Global Status Report. Paris.
- Pihl, Kushnir, Sanden, & Johnsson, 2012 Pihl, Erik; Kushnir, Duncan; Sanden, Björn; Johnsson, Filip, Material constraints for Concentrated solar thermal power
- Platzer, 2011 Solarthermische Kraftwerke - Stand und Perspektiven
- Pragma Industries 2016: Pragma Industries Homepage – Light Mobility. Abgerufen am 11.10.2016 unter <http://www.pragma-industries.com/consumer-products/light-mobility/#>
- Prakash, S., Brommer, E., Gröger, J. (2012): PROSA Grüne Rechenzentren: Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projekts „Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte“, Öko-Institut e.V. im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Reinhard, S. (2016) Cadmium-Free Quantum Dots Offer Vibrant Color for Liquid Crystal Displays. Photonics Spectra. Online verfügbar: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=58504>
- Sawaryn, B. (2011): Effizienzsteigerung bei der Chlorherstellung, Präsentation des BMBF-Projekts 033R018A
- Schippl, J., Grunwald, A., Hartlieb, N., Jörissen, J., Mielicke, U., Parodi, O., Stelzer, V., Weinberger, N. und Dieckhoff, C. (2009). Roadmap Umwelttechnologien 2020 - Endbericht. Wissenschaftliche Berichte / Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft FZKA 7519. Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS).
- Schmid 2014: R. Schmid, C. Pillot, Introduction to energy storage with market analysis and outlook
- Schriefl, Brucker 2016: Schriefl, E.; Brucker, M.: Bedarf an Metallen für eine globale Energiewende bis 2050 – Diskussion möglicher Versorgungsgrenzen, in: Andreas Exner, Martin Held, Klaus Kümmerer, Herausgeber: Kritische Metalle in der Großen Transformation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
- Sterner & Stadler 2015 Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration. Springer
- Stobbe, L., Proske, M., Zedel, H., Hintemann, R., Clausen, J., Beucker, S. (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- SubSKrit 2016: Expertenworkshop im Rahmen des Projektes SubSKrit am 13.10.2016 in Berlin
- Trieu, V. 2011: Elektrochemische Synthese von Dimensionsstabilen Anoden für die Chlorelektrolyse; Dissertation, Saarbrücken 2011, online verfügbar unter: <http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/4369/pdf/Datei.pdf> (abgerufen am 25.08.2016)
- UK Energy Research Center 2013 Materials Availability: Potential constraints to the future low-carbon economy -Working Paper II: Batteries, Magnets and Materials.
- VDI 4800 2016: Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Gröndruck
- WI 2014: Wuppertal Institut. 2014. Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf
- Wietschel et al. 2015: Wietschel, Martin; Ullrich, Sandra; Markewitz, Peter; Schulte, Friedrich; Genese, Fabio, Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden.

10 Anhang

In der folgenden Tabelle sind die 115 Umwelttechnologien in einer Übersicht zusammengestellt. Eine Kurzbeschreibung der einzelnen Umwelttechnologien befindet sich im Anhang des Arbeitsberichtes 1.

UT Nr.	Umwelttechnologie
1.	Hochwirkungsgradmotoren
2.	Kompressoren
3.	Varistoren
4.	Organische Elektronik (Polymerelektronik)
5.	RFID
6.	Frequenzumrichter
7.	Industrie-Elektromotoren
8.	Aerogele
9.	Sensitive schaltbare Gläser
10.	Metallbeschichtungen auf Gläsern
11.	Neue Chipgenerationen
12.	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle
13a.	Membranelektrolyse Chlor-Alkali
13b.	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode
14.	Corex/Finex-Verfahren für Stahl
15.	ULCOS-BF / ULCOWIN / ULCORED / ULCOS
16.	Celitement
17.	Sensoren zur Energie-Wasser-Optimierung
18.	Bewegungs- und Präsenzsteuerung
19.	Smart Meter
20.	Mikro-KWK
21.	Erdwärmepumpen
22.	Thin Clients
23.	Ultratablets
24.	Grüne Rechenzentren
25.	LED für Hintergrund-beleuchtung in LCDs
26.	Organische Leuchtdioden (OLED)
27.	Weißer LED
28.	Keramik-Metallhalogenid-Lampen
29.	Trichromatische Fluoreszenzlampen
30.	T5-Leuchtstoffröhren
31.	Kompakte Fluoreszenzlampen
32.	Hochwirkungsgrad-Nass- und Trockenläufer
33.	Automatische Stofftrennverfahren

UT Nr.	Umwelttechnologie
34.	Service Roboter
35.	Pedelects
36.	LKW-Oberleitungen
37.	Hybridmotoren
38.	Elektroantriebsmotoren
39.	Karosserie (Kunststoff, Aluminium, GFK, Carbon)
40.	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke
41.	Leichtbau - Titan und Sc.-Airframe
42.	Real Time Traffic Information und Online-Vernetzung
43.	Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren
44.	Selbstfahrende Kraft- und Lastfahrzeuge
45.	Katalytischer Kraftstoffzusatz
46.	BtL-Kraftstoffe
47.	Adaptronik
48.	Dezentrale Wasseraufbereitung
49a.	Solare Meerwasserentsalzung
49b.	Wassereffizienztechnologien
50.	Umkehrosmose, (hochpermeable) Membransysteme
51.	Ultrafiltration (Mikro-, Nano-)
52.	Phosphorrückgewinnung
53.	Maßgeschneiderte Katalysatoren
54.	Biokatalyse-Anlagentechnik
55.	Kunststoffherstellung aus verholzter Biomasse
56.	Bleifreie Lote
57.	Korrosionsfeste Superlegierungen
58.	Hochtemperatur-Supraleiter
59.	Hochwarmfeste Superlegierungen
60.	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen
61.	Anorganische Nanokomposite
62.	Formgedächtnis-Legierungen
63.	Metallschäume
64.	3-D-Drucker
65.	Carbon Nanotubes (CNT) für Stromleitungen und Drähte
66.	Carbon Nanotubes (CNT) für Katalysatoren
67.	Nanobeschichtung von Oberflächen
68.	Precision Farming
69.	Mikroreaktionstechnik

UT Nr.	Umwelttechnologie
70.	Me-Schlacken- und P-Klärschlammaufbereitung
71.	SCR Selective Katalytische Reduktion: ohne Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren
72.	NO _x -Speicher-Katalysator: ohne Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren
73.	Coal to Liquid (CtL)
74.	Gas to Liquid (GtL)
75.	PEM-Brennstoffzellen
76.	Brennstoffzelle für mobile Geräte
77.	SOFC-Brennstoffzellen für stationäre Anlagen
78.	Thermoelektrische Energiewandlung
79.	Urbane Abwärmequellen (Kanalisation, Verkehrssysteme)
80.	ORC Organic Rankine Cycle
81.	Carbon Capturing CC
82.	Schwarmkraftwerke
83.	Kraftwerke - GuD/Gas
84.	Tiefengeothermie
85.	Mikrogasturbinen
86.	Stirlingmotor
87.	Dünnschicht-Solarzellen
88.	Farbstoffzellen (Grätzel-DSC-Zellen)
89.	Monokristalline Siebdrucksolarzellen
90.	Tandemzellen
91.	Si-Dickschichtzellen
92.	Si-Dünnschicht
93.	CSP-Technologie
94.	Redox-Flow
95.	Zn-Luft-Batterie
96.	Ni-Cd-Batterie
97.	Na-S-Batterie
98.	Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge
99.	Li-Ionen Batterien: portable Anwendungen
100.	Lithium-Ionen-Stromspeicher
101.	Supercaps
102.	Supraleitende Spulen
103.	Metallhydrid-Speicher
104.	Nano-Speichermaterialien
105.	Speicher-Kraftwerke
106.	Permanentmagnet-Generator

UT Nr.	Umwelttechnologie
107.	Synchron-Generatoren
108.	Asynchron-Generatoren
109.	Direktantrieb
110.	Reluktanzgeneratoren
111.	HTS-Generatoren
112.	Power-to-Gas (PtG)
113.	Power-to-Liquid (PtL)