

TEXTE

03/2019

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

Arbeitsbericht 3: Kritikalitätsanalyse der betrachteten Rohstoffe und Umwelttechnologien zur Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien

TEXTE 03/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 93 316 0
UBA-FB 002705/ANH,3

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

Arbeitsbericht 3: Kritikalitätsanalyse der betrachteten Rohstoffe und
Umwelttechnologien zur Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien

von

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

Dr. Siegfried Behrendt, Dr. Michael Scharp, 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:

Mai 2016

Redaktion:

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

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

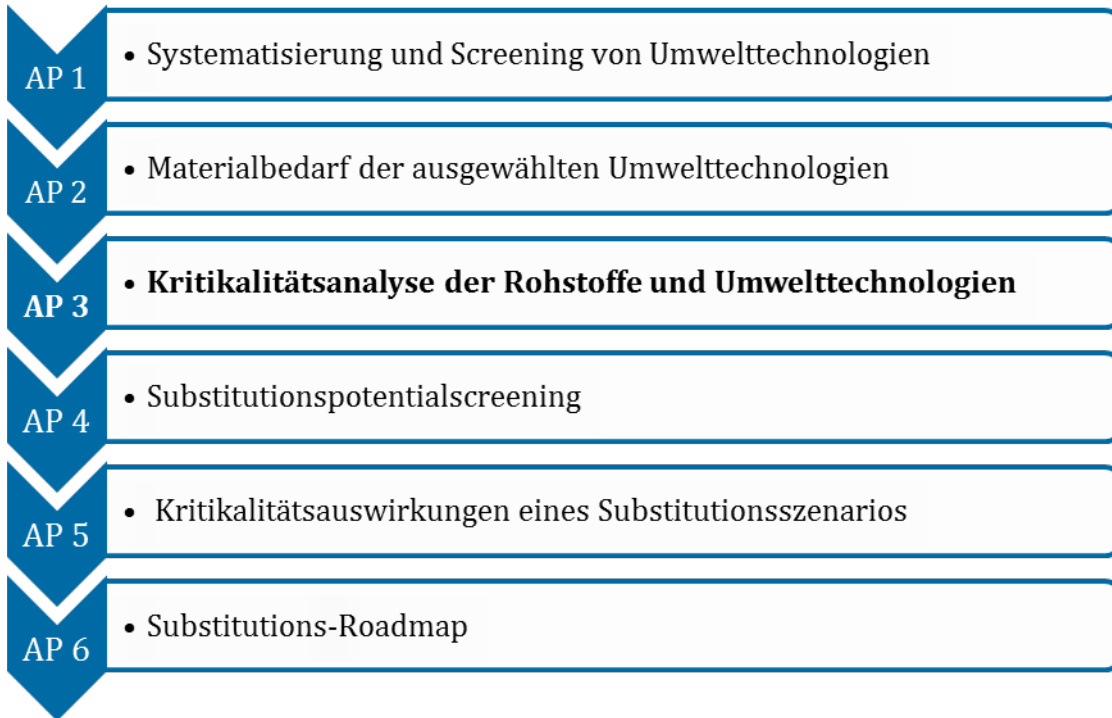
Dessau-Roßlau, Januar 2019

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

Einordnung des Arbeitsberichtes 3:

Das Projekt SubSKrit gliedert sich in sechs Arbeitspakete. Diese sechs Hauptprojektphasen bauen aufeinander auf, wie in folgender Abbildung dargestellt.

Überblick über die Hauptprojektphasen in SubSKrit:



Der vorliegende Arbeitsbericht 3 umfasst die Untersuchung der 40 Umwelttechnologien hinsichtlich der Kritikalität ihres Materialbedarfs. Der mehrstufige Auswahlprozess von 20 prioritären Umwelttechnologien erfolgt anhand der Kritikalitätsdimensionen Versorgungsrisiko, ökologisches Schadenspotential und strategische Bedeutung. Mit Hilfe einer Rangbildung der Rohstoffe zu den Kritikalitätsdimensionen wird ein Ranking der Umwelttechnologien ermöglicht. Es werden daraufhin 20 Umwelttechnologien ausgewählt, die im folgenden Arbeitsschritt 4 auf ihre Substitutionsmöglichkeiten hin untersucht werden. Die Robustheit der Auswahl wird geprüft, in dem eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird.

Anmerkung: Der Arbeitsbericht stellt den aktuellen Stand zur Abgabe des Berichtes (Mai 2016) dar.

Übersicht der 40 Umwelttechnologien*

UT Nr.	UT Name	Leitmarkt
2	Kompressoren	Energieeffizienz
5	RFID	Energieeffizienz
8	Aerogele	Energieeffizienz
12	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Energieeffizienz
13b	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode	Energieeffizienz
16	Celitement	Energieeffizienz
24	Grüne Rechenzentren	Energieeffizienz
26	OLED	Energieeffizienz
27	weiße LED	Energieeffizienz
33	Automatische Stofftrennverfahren	Kreislaufwirtschaft
35	Pedelects	Nachhaltige Mobilität
37	Hybridmotoren	Nachhaltige Mobilität
38	Elektroantriebsmotoren	Nachhaltige Mobilität
39	Karosserie	Nachhaltige Mobilität
40	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke	Nachhaltige Mobilität
41	Leichtbau - Titan und Sc-Airframe	Nachhaltige Mobilität
43	Fahrzeug-Abgas-Katalysator	Nachhaltige Mobilität
48	Dezentrale Wasseraufbereitung	Nachhaltige Wasserwirtschaft
49b	Wassereffizienztechnologien	Nachhaltige Wasserwirtschaft
50+51	Membrantechnik	Nachhaltige Wasserwirtschaft
52	Phosphorrückgewinnung	Nachhaltige Wasserwirtschaft
53	Industriekatalysatoren	Rohstoff- und Materialeffizienz
56	Bleifreie Lote	Rohstoff- und Materialeffizienz
60	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen	Rohstoff- und Materialeffizienz
67	Nanobeschichtung von Oberflächen	Rohstoff- und Materialeffizienz
68	Precision Farming	Rohstoff- und Materialeffizienz
70	Me-Schlackenaufbereitung	Rohstoff- und Materialeffizienz
83	Kraftwerke – GuD/Gas	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
87	Dünnschicht-Solarzellen	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
90	Tandemzellen	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
91	Si-Dickschichtzellen	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
93	CSP-Technologie	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
98	Li-Ionen Batterien für PHEV	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
100	Lithium-Ionen-Stromspeicher	Umweltfreundliche Energien und Speicherung

105	Speicherkraftwerke - Pumpspeicherkraftwerk	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
106	Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft)	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
107	Synchron-Generatoren	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
108	Asynchron-Generatoren in WKA	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
110	Reluktanzgeneratoren	Umweltfreundliche Energien und Speicherung
111	HTS-Generatoren	Umweltfreundliche Energien und Speicherung

* Die Nummerierung ergibt sich aus der ursprünglichen Liste von 115 Umwelttechnologien wie in Arbeitsbericht 1 dargestellt.

In Arbeitsbericht 2 sind die 40 Umwelttechnologien detailliert beschrieben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Ziele des 3. Arbeitspakets	11
2 Methodik	12
2.1 Methodik zum Ranking der Rohstoffe	12
2.2 Methodik zum Ranking der Umwelttechnologien	15
3 Ergebnisse	17
3.1 Rohstoffranking	17
3.2 Auswahl der 20 Umwelttechnologien für das weitere Projekt	22
4 Sensitivitätsanalyse zum Rohstoffranking und zur Auswahl der Umwelttechnologien	27
4.1 Einfluss der Berechnungsmethodik auf die Gesamtkritikalität im Versorgungsrisiko	27
4.2 Prospektive Sensitivitätsanalyse des Versorgungsrisikos	28
4.2.1 Veränderte Gewichtung	30
4.2.2 Veränderte Bewertung	32
4.3 Sensitivität des ökologischen Schadenspotentials	34
4.4 Auswirkungen der prospektiven Sensitivitätsanalyse auf die UT-Auswahl	35
5 Fazit	38
6 Anhang	39
7 Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Visualisierung der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „ökologisches Schadenspotential“ und „Versorgungsrisiko“	19
Abbildung 2:	Visualisierung der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „Strategische Bedeutung“ und „Versorgungsrisiko“	21
Abbildung 3:	Visualisierung der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „Strategische Bedeutung“ und „ökologisches Schadenspotential“	21
Abbildung 4:	Einfluss der Berechnungsmethodik auf die Kritikalität des Versorgungsrisikos.....	28
Abbildung 5:	Szenarien der Dimension Versorgungsrisiko	30
Abbildung 6:	Spannbreite des Ranking in den Szenarien bei veränderter Gewichtung (Dimension Versorgungsrisiko)	32
Abbildung 7:	Spannbreite des Rankings in den Szenarien bei veränderter Bewertung (Dimension Versorgungsrisiko)	33
Abbildung 8:	Anhang: Bewertung des Versorgungsrisikos nach VDI-Richtlinie [VDI 4800 2016]	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Rohstoffbedarf aller Umwelttechnologien im Green-Economy-Szenario 2025 in Relation zur Gesamtproduktion 2013.....	12
Tabelle 2:	Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2.....	13
Tabelle 3:	Bewertungen der Elemente, die nicht in VDI 4800 Blatt 2 enthalten sind und die zugehörigen Bewertungen der Elemente deren Daten genutzt wurden.	14
Tabelle 4:	Übertragung der Rohstoffsicht auf die UT-Sicht am Beispiel der UT 24 „Grüne Rechenzentren“	16
Tabelle 5:	Rohstoffranking Versorgungsrisiko.....	17
Tabelle 6:	Rohstoffranking Ökologisches Schadenspotential	18
Tabelle 7:	Rohstoffranking Strategische Bedeutung.....	20
Tabelle 8:	Gesamtranking Rohstoffe	22
Tabelle 9:	Ranking der Umwelttechnologien: Die Top 11 Umwelttechnologien.....	23
Tabelle 10:	Ranking der Umwelttechnologien: Weitere 6 Umwelttechnologien in der Betrachtung.....	24
Tabelle 11:	Ranking der Umwelttechnologien: 4 Grenzfälle bei der Auswahl der 20 Umwelttechnologien	24
Tabelle 12:	Ranking der Umwelttechnologien: 5 Umwelttechnologien fallen aus der Betrachtung heraus.....	25
Tabelle 13:	15 Umwelttechnologien ohne Rohstoffrelevanz.....	25
Tabelle 14:	Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien	26
Tabelle 15:	Ranking und Veränderung der Kritikalität in den Szenarien bei veränderter Gewichtung (Dimension Versorgungsrisiko)	31
Tabelle 16:	Ranking und Veränderung der Kritikalität der Rohstoffe in den Szenarien bei veränderter Bewertung (Dimension Versorgungsrisiko)	34
Tabelle 17:	Sensitivität des ökologischen Schadenspotentials	35
Tabelle 18:	Rohstoffranking der Sensitivitätsanalyse über alle Dimensionen (Auszug relevanter Rohstoffe für die Grenzfälle der UT-Auswahl)	36
Tabelle 19:	Ranking der UT-Grenzfälle in Basis und Sensitivitätsanalyse	36
Tabelle 20:	Anhang: Rankingergebnisse der 40 Umwelttechnologien	39

Abkürzungsverzeichnis

Ag	Silber
AP	Arbeitspaket
Au	Gold
BAU	Business-As-Usual
Ce	Cer
CSP	Concentrated Solar Power Kraftwerke
Cu	Kupfer
Dy	Dysprosium
EoL	End of Life
Ga	Gallium
GE	Green-Economy
In	Indium
Ir	Iridium
Li	Lithium
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Nd	Neodym
OLED	Organic Light Emitting Diode
PHEV	Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeug
Pd	Palladium
Pr	Praseodym
Pt	Platin
RFID	Radio Frequency Identification
Rh	Rhodium
Ru	Ruthenium
Si	Silizium
Sn	Zinn
Tb	Terbium
TiO₂	Titandioxid
UT	Umwelttechnologie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Ziele des 3. Arbeitspakets

Ziel des 3. Arbeitspakets „Kritikalitätsanalyse“ ist die Untersuchung der in AP 1 ausgewählten 40 Umwelttechnologien (UT) hinsichtlich der Kritikalität ihres Materialbedarfs. Als Ergebnis von AP 3 sollen 20 UTs ausgewählt werden, welche in AP 4 auf ihr Substitutionspotential hin untersucht werden sollen.

Der Auswahlprozess soll durch eine angemessene Methodologie durchgeführt werden. In der Ausschreibung wird bereits ein Kerngerüst genannt, auf dem die hier durchgeführte Kritikalitätsanalyse aufsetzt. Demzufolge sind drei Dimensionen zu betrachten:

1. Das Versorgungsrisiko,
2. das ökologische Schadenspotential und
3. die strategische Bedeutung.

Für jede Dimension wird eine eigene methodische Grundlage genutzt, um eine Charakterisierung zu ermöglichen. Für das Versorgungsrisiko ist die Grundlage die VDI Richtlinie 4800 Blatt 2. Für die strategische Bedeutung wird der Bedarf an Rohstoffen, der im Green-Economy-Szenario aus AP 2 berechnet wurde, genutzt. Für das ökologische Schadenspotential werden die Daten und die Methodik von Graedel [2015] genutzt. Es wird für jede Dimension ein Ranking auf Rohstoffebene erstellt, welches im zweiten Schritt auf die UTs übertragen wird, um das Ziel des APs zu erreichen.

In Kapitel 2 wird die Methodik der Rankingbildung für die einzelnen Dimensionen erläutert. Dies geschieht in zwei Stufen. Zuerst wird die Methodik zur Rankingbildung für die betrachteten Rohstoffe dargelegt. Anschließend wird die Übertragung dieses Rankings auf die UTs gezeigt aus der ein Ranking der UTs resultiert.

In Kapitel 3 wird die Methodik aus Kapitel 2 zuerst auf die Rohstoffe angewandt und die Ergebnisse dargestellt. In einem zweiten Schritt werden diese Rankings dann auf die einzelnen UTs bezogen und so ein Ranking der Kritikalität für den Materialbedarf erstellt. Auf dieser Basis werden die 20 UTs ausgewählt.

Kapitel 4 soll die Methodik auf ihre Robustheit prüfen indem eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird. Diese bezieht sich vor allem auf die Dimension des Versorgungsrisikos, da dies sich durch Änderungen in der Geopolitik oder in der technischen Fortentwicklung am stärksten ändert. Das ökologische Schadenspotential und seine Gewichtungsmethodik werden ebenfalls durchleuchtet, um zu untersuchen, ob sich hier Änderungen für das Ranking und die Auswahl der UTs ergeben.

2 Methodik

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

2.1 Methodik zum Ranking der Rohstoffe

In AP 2 wurden von 64 untersuchten Rohstoffen 38 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 wird, um irrelevante Rohstoffe zwecks Übersichtlichkeit zu streichen. Hierfür werden die Ergebnisse von AP 2 herangezogen, die im Green-Economy-Szenario den Rohstoffbedarf der 40 UTs 2025 als Anteil der Primärförderung 2013 abbildet. Bei 3% der Primärförderung 2013 wird abgeschnitten. In Tabelle 1 sind die Anteile dargestellt, wobei links die 21 Rohstoffe dargestellt sind, die weiter betrachtet werden und rechts die 17 Rohstoffe gezeigt werden, die unterhalb des Abschneidekriteriums liegen und nicht mehr weiter untersucht werden.

Tabelle 1: Rohstoffbedarf aller Umwelttechnologien im Green-Economy-Szenario 2025 in Relation zur Gesamtproduktion 2013

Oberhalb des Abschneidekriteriums		Unterhalb des Abschneidekriteriums	
Rohstoff	Anteil	Rohstoff	Anteil
Palladium	423%	Titan (Metall)	2,57%
Ruthenium	409%	Yttrium	2,55%
Rhodium	331%	Selen	1,34%
Dysprosium	304%	Europium	0,957%
Iridium	289%	Gadolinium	0,367%
Lithium	247%	Kobalt	0,353%
Terbium	238%	Zirkon	0,350%
Platin	153%	Molybdän	0,310%
Zinn	81,6%	Nickel	0,296%
Neodym	81,0%	Germanium	0,248%
Praseodym	66,7%	Chrom	0,247%
Gallium	63,4%	Natürlicher Graphit	0,188%
Silber	58,3%	Zink	0,035%
Indium	31,7%	Tantal	0,034%
Cer	15,5%	Vanadium	0,010%
Titan als TiO ₂	12,5%	Blei	0,009%
Magnesium	11,7%	Phosphat	0,001%
Kupfer	11,2%		
Silizium (Metall)	5,01%		
Mangan	4,84%		
Gold	3,28%		

Da die zu betrachtenden Rohstoffe nun festgelegt sind, werden diese 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 drei Gruppen eingeteilt sind. In Tabelle 2 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 / Anbaugelände		

Jeder Rohstoff erhält für jeden Indikator eine Bewertung, wobei die Bewertungsskala von 0 bis 1 reicht und die Zwischenschritte 0,3 und 0,7 beinhaltet. 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 klassischen Mittelwert zurückgegriffen, da die degressive Addition spätere Sensitivitätsanalysen erschwert.

In der VDI 4800 finden sich für weite Teile der zu betrachtenden Rohstoffe Bewertungen auf Grund von Berechnungen, Schätzungen und Expertenmeinungen. Die vollständige Tabelle findet sich im Anhang. 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 (Ir), Ruthenium (Ru) und Rhodium (Rh) werden die Wertungen von Platin (Pt) und Palladium (Pd) herangezogen. Die Basis bildet Palladium, wobei das regulatorische Länderrisiko und der Grad der Nachfragesteigerung eher analog zu Platin gesehen werden.

Für Gold (Au) wird auf die Daten von Silber (Ag) zurückgegriffen, da dieses in der Förderstruktur, der Knappheit und der geopolitischen Verteilung sehr nah an Gold liegt.

Für das leichte Seltenerdelement Praseodym (Pr) werden die Daten von Neodym (Nd) übernommen, welches ebenfalls ein leichtes Seltenerdelement ist.

Für Terbium (Tb), dem schweren Seltenerdelement, wird die Bewertung für das schwere Seltenerdelement Dysprosium (Dy) übernommen.

In Tabelle 3 sind die Elemente, deren Bewertungslücke gefüllt wurde, sowie die zum Analogieschluss nötigen Elemente nebeneinander dargestellt. Die zusammengehörigen Paare sind durch dickere Tabellenlinien getrennt.

Tabelle 3: Bewertungen der Elemente, die nicht in VDI 4800 Blatt 2 enthalten sind und die zugehörigen Bewertungen der Elemente deren Daten genutzt wurden.

Indikator	Ir, Ru, Rh	Pd	Pt	Au	Ag	Pr	Nd	Tb	Dy
Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Grad der Koppelproduktion / Nebenproduktion	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Verbreitungsgrad funktionaler EoL-Recyclingtechnologien	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen / Anbaugebiete	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	1	1	1	0,3	0,3	1	1	1	1
Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	1	1	1	0,3	0,3	1	1	1	1
Politisches Länderrisiko	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Regulatorisches Länderrisiko	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	1	1	1	1
Grad der Nachfragesteigerung	0,7	0,3	0,7	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Annualisierte Preisvolatilität	1	1	0,7	1	1	0,3	0,3	1	1

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 Ökosystem

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 eine 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 Ergebnisse von AP 2 zurückgegriffen, die bereits in Tabelle 1 dargestellt sind. 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. Tabelle 1 ist bereits nach dem Bedarf sortiert, somit muss nur noch ein Rang auf die Rohstoffe verteilt werden. 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 Ranking zu bilden. Dies geschieht über das Addieren der einzelnen Platzierungen und der Bildung eines Mittelwertes. Rhodium z.B. hat die Platzierungen 5 (Versorgungsrisiko), 1 (ökologisches Schadenspotential) und 3 (strategische Bedeutung). Zusammen ergibt sich also ein Wert von 9, der einem Mittelwert von 3 entspricht. Da dies im Ergebnis der kleinste Mittelwert ist, befindet sich Rhodium im Gesamtranking auf Platz 1, hat also die höchste Kritikalität über alle drei Dimensionen. Dies wird für alle Elemente durchgeführt und die Mittelwerte werden nach ihrer Größe sortiert, wobei das Element mit dem kleinsten Wert (also der höchsten Kritikalität) auf dem ersten Platz landet und das Element mit dem höchsten Wert (also der niedrigsten Kritikalität) auf dem letzten Platz (21) landet.

2.2 Methodik zum Ranking der Umwelttechnologien

Zur Übertragung der Ergebnisse des Rohstoffrankings auf die UT-Sicht müssen für jede UT die relevanten Rohstoffe tabellarisch aufgetragen werden. In Tabelle 4 sind als Beispiel für die UT-Nr. 24 „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 4: Übertragung der Rohstoffsicht auf die UT-Sicht am Beispiel der UT 24 „Grüne Rechenzentren“

Rohstoffe	Rang Versorgungsrisiko	Rang ökologisches Schadenspotential	Rang strategische Bedeutung	Rang Mittelwert Rohstoff	Mittelwert UT nach Mittelwert Rohstoff	Höchster Rohstoff-Rang	Anzahl relevante Rohstoffe
					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			

Um die UTs nach ihrer Relevanz zu ordnen, wurden die UTs in abfallender Priorität nach folgenden Kriterien sortiert:

1. Höchstes einzelnes Rohstoffranking in der 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 Sortierkriterium, da dieser stets der limitierende Faktor ist. 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 UTs und führt so zum Ziel der Auswahl von 20 prioritären Umwelttechnologien in diesem Arbeitspaket.

3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden zum einen die Rankingergebnisse der Rohstoffe dargestellt. In das Ranking gingen die 21 als relevant identifizierten Rohstoffe ein (siehe Kapitel 2). Zum anderen wurden die Ergebnisse der Rohstoffe im nächsten Schritt auf die Umwelttechnologien übertragen. Die Rankingergebnisse der Umwelttechnologien und somit die Auswahl der 20 UTs, die im weiteren Projektverlauf untersucht werden, sind in Kapitel 3.2 beschrieben.

3.1 Rohstoffranking

Das Ranking der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „Versorgungsrisiko“, „Ökologisches Schadenspotential“ und „Strategische Bedeutung“ sowie das Gesamtranking über alle drei Kritikalitätsbereiche wurde analog der in Kapitel 2 dargestellten Methodik durchgeführt.

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 Seltenen Erden Dysprosium und Terbium auf dem 2. Rang und Gallium auf Rang 4. Sieben Rohstoffe – Edelmetalle und Seltene Erden - belegen gemeinsam den 5. Rang (Iridium, Rhodium, Ruthenium, Palladium, Praseodym, Neodym, Cer). Am Ende des Rankings (Rang 17-21) – also die am wenigsten kritischen Rohstoffe im Versorgungsrisiko - liegen Magnesium, Mangan, Kupfer, metallisches Silizium und Titandioxid.

Tabelle 5: 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
Kupfer	19	0,400
Silizium (Metall)	20	0,392
Titan als TiO ₂	21	0,385

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). 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 Ranking, welches mehrfach vergeben ist).

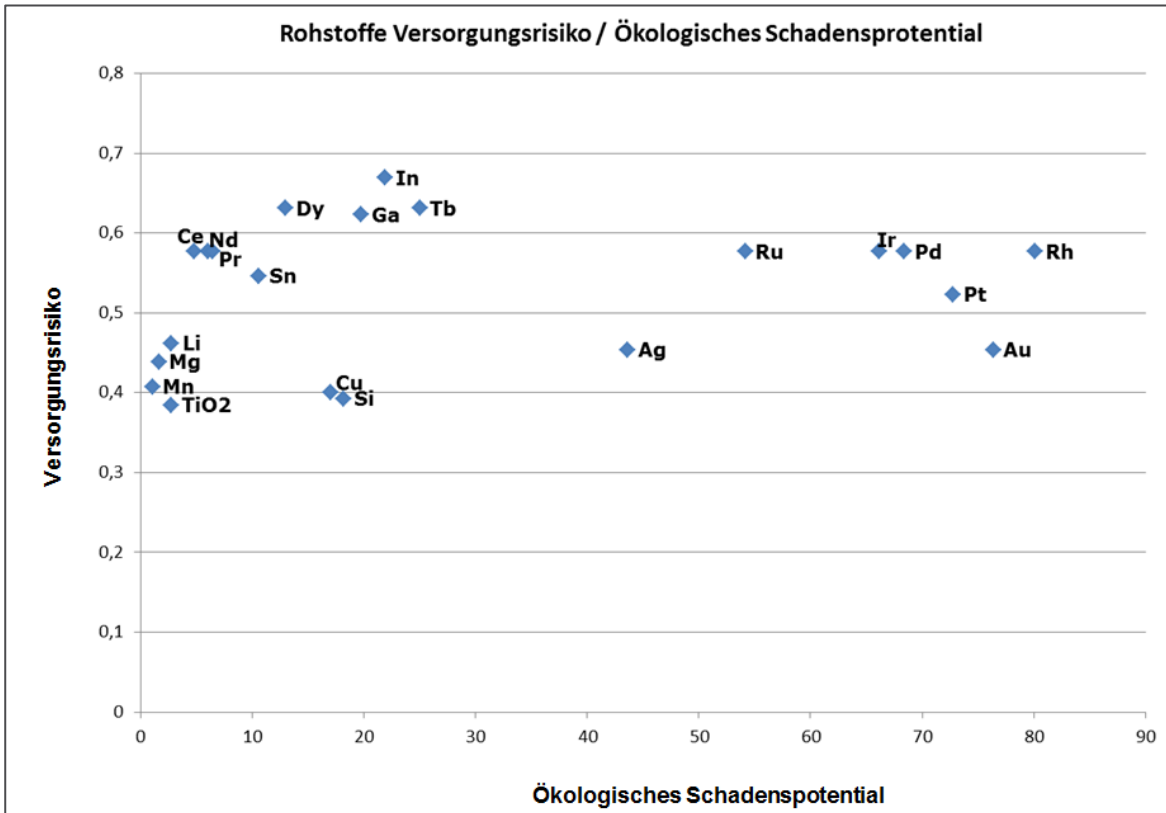
Tabelle 6: Rohstoffranking Ökologisches Schadenspotential

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

Die Kritikalitätsbereiche „Ökologisches Schadenspotential“ und „Versorgungsrisiko“ sind in folgender Abbildung gegeneinander aufgetragen. In diesen Abbildungen wurde sich nicht auf die Rankingergebnisse (1-21) bezogen, sondern auf die Werte der Kritikalitätsbereiche aus den vorangegangenen Tabellen. Somit können die Abstände zueinander visualisiert werden. Auf der x-Achse ist das ökologische Schadenspotential aufgetragen und auf der y-Achse das Versorgungsrisiko. Analog der Rankings zeigen sich die Gruppierungen der Edelmetalle mit hohem ökologischem Schadenspotential – auf der rechten Seite in der Abbildung (ökologisches Schadenspotential > 40) - mit einem Versorgungsrisiko 0,45 – 0,58. In diese Gruppe fallen Silber, Ruthenium, Iridium, Palladium, Platin, Gold und Rhodium. Eine zweite Gruppe kann abgegrenzt werden, welche ein relativ niedriges ökologisches Schadenspotential (<0,3) mit hohem Versorgungsrisiko (>0,5) aufweist. In diese Gruppe fallen die Seltenen Erden Terbium, Dysprosium, Neodym, Praseodym, Cer sowie Indium, Gallium und Zinn. Die restliche Roh-

stoffe Lithium, Magnesium, Mangan, Titandioxid und Kupfer, Silizium bilden zwei Kleingruppen mit vergleichsweise niedrigem Versorgungsrisiko und niedrigem ökologischen Schadenspotential.

Abbildung 1: Visualisierung der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „ökologisches Schadenspotential“ und „Versorgungsrisiko“



Quelle: Eigene Darstellung

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 Seltenerdenmetall 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.

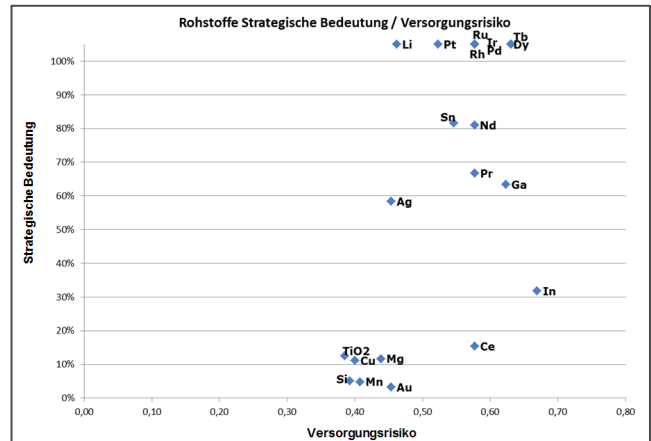
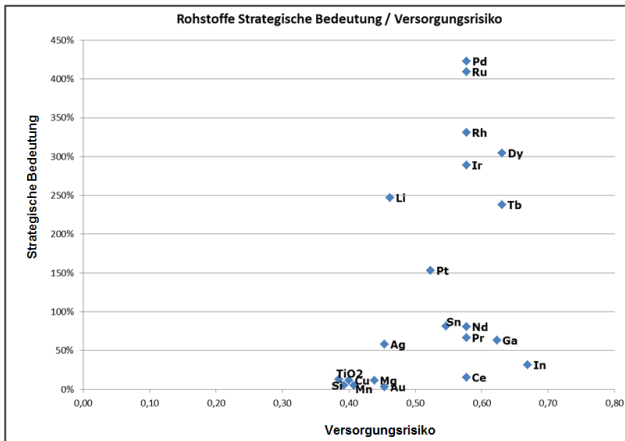
Tabelle 7: Rohstoffranking Strategische Bedeutung

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%

Visualisiert wird die strategische Bedeutung gegenüber dem Versorgungsrisiko und dem ökologischen Schadenspotential in den folgenden zwei Abbildungspaaren.

Die folgenden beiden Abbildungen visualisieren die strategische Bedeutung (y-Achse) zum Versorgungsrisiko (x-Achse). Auf der linken Abbildung reicht die y-Achse bis zum höchsten Wert > 400%. Bei der rechten Abbildung wurde die y-Achse bei 100% gekappt, um die Rohstoffe mit einer strategischen Bedeutung < 100% besser visualisieren zu können. Bei dieser Darstellung sind ebenfalls Gruppierungen zu erkennen. Eine Ballung ist bei einer strategischen Bedeutung > 100% mit relativ hohem Versorgungsrisiko (> 0,46) zu erkennen. Hierunter fallen die Platingruppenmetalle (Pd, Ru, Rh, Ir, Pt) sowie die schweren Seltenen Erden (Dy, Tb) und Lithium. Eine zweite Gruppe mit niedriger strategischer Bedeutung (<15%) und vergleichsweise niedrigem Versorgungsrisiko (<0,5) besteht aus Titandioxid, Silizium, Kupfer, Mangan, Magnesium und Gold. Die restlichen Rohstoffe (Sn, Nd, Pr, Ga, Ag, In, Ce) weisen eine strategische Bedeutung zwischen 15% und 90% und ein Versorgungsrisiko > 0,4 auf.

Abbildung 2: Visualisierung der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „Strategische Bedeutung“ und „Versorgungsrisiko“

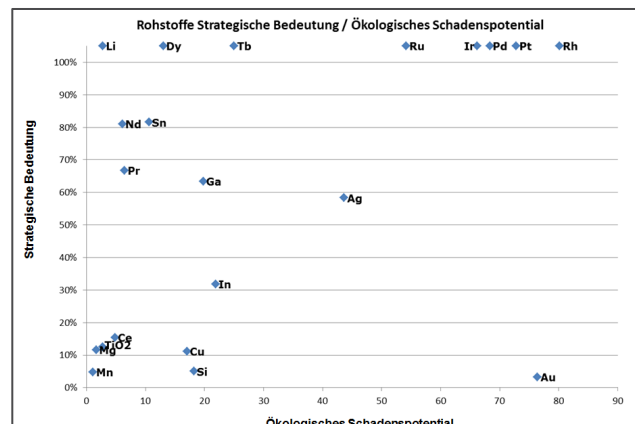
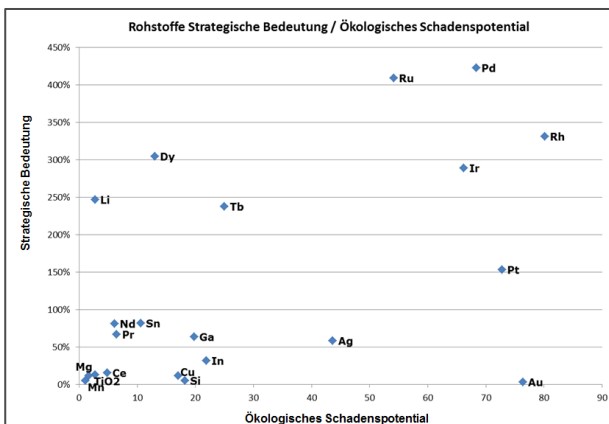


Quelle: Eigene Darstellung

Daten der Abbildung analog Abbildung links, y-Achse endet aber bei 100%

Die folgenden beiden Abbildungen visualisieren die strategische Bedeutung (y-Achse) zum ökologischen Schadenspotential (x-Achse). Wie oben reicht die y-Achse bis zum höchsten Wert > 400%. Bei der rechten Abbildung wurde die y-Achse bei 100% gekappt, um die Rohstoffe mit einer strategischen Bedeutung < 100% besser visualisieren zu können. Folgende Gruppen lassen sich bei dieser Darstellung charakterisieren. Zum einen liegen wie bei der vorherige Darstellung acht Rohstoffe bei einer strategischen Bedeutung > 100%. Allerdings teilt sich diese Gruppe im ökologischen Schadenspotential in Lithium, Dysprosium, Terbium mit niedrigem ökologischen Schadenspotential (<30) und die Platingruppenmetalle (Ru, Ir, Pd, Pt, Rh) mit hohem ökologischen Schadenspotential (>50). Gold weist ebenfalls ein sehr hohes ökologisches Schadenspotential auf (76), allerdings bei niedriger strategischer Bedeutung (3%). Zum anderen erkennt man eine Rohstoffballung bei niedrigem ökologischen Schadenspotential (<20) und niedriger strategischer Bedeutung (<20%). Hierunter fallen Cer, Titandioxid, Magnesium, Mangan, Kupfer und Silizium.

Abbildung 3: Visualisierung der Rohstoffe in den Kritikalitätsbereichen „Strategische Bedeutung“ und „ökologisches Schadenspotential“



Quelle: Eigene Darstellung

Daten der Abbildung analog Abbildung links, y-Achse endet aber bei 100%

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). Es folgen auf den Rängen 5 und 6 die schweren Seltenen Erden Terbium und Dysprosium. Rang 7 fällt gleichermaßen auf 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.

Tabelle 8: 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

3.2 Auswahl der 20 Umwelttechnologien für das weitere Projekt

Die Methodik der Übertragung der Rohstoffergebnisse auf die Umwelttechnologien wurde in Kapitel 2 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 je Umwelttechnologie“ herangezogen. Die gesammelte Übersicht über das Ranking der 40 Umwelttechnologien ist im Anhang zusammengefasst. Im Folgenden werden die 40 bearbeiteten Umwelttechnologien in Rankinggruppen beschrieben. Am Ende des Kapitels folgt die Übersicht der 20 ausgewählten Umwelttechnologien.

Das durchgeführte Ranking führte 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 (UT-Nr. 53, 43), Permanentmagneten (UT-Nr. 37, 38, 60, 106, 35), sowie Solarzellen (UT-Nr. 87, 90), weiße LED (UT-Nr. 27) und grüne Rechenzentren (UT-Nr. 24).

Tabelle 9: Ranking der Umwelttechnologien: Die Top 11 Umwelttechnologien

UT Nr.	UT Name	Höchstes Rohstoffranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
53	Industriekatalysatoren	1 (Rhodium)	4,8	6 relevante Rohstoffe
43	Fahrzeug-Abgas-Katalysator	1 (Rhodium)	6,0	4 relevante Rohstoffe
24	Grüne Rechenzentren	2 (Palladium)	9,7	9 relevante Rohstoffe
37	Hybridmotoren	5 (Terbium)	9,5	6 relevante Rohstoffe
38	Elektroantriebsmotoren	5 (Terbium)	9,5	6 relevante Rohstoffe
60	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen	5 (Terbium)	9,6	5 relevante Rohstoffe
106	Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft)	6 (Dysprosium)	11,0	3 relevante Rohstoffe
35	Pedelects	6 (Dysprosium)	13,2	6 relevante Rohstoffe
87	Dünnschicht-Solarzellen	7 (Indium)	11,3	3 relevante Rohstoffe
90	Tandemzellen	7 (Indium)	11,5	4 relevante Rohstoffe
27	weiße LED	7 (Indium + Platin)	11,6	8 relevante Rohstoffe

Folgende weitere sechs Umwelttechnologien werden in AP4 betrachtet, die in folgender Tabelle aufgelistet werden. 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. Speicher- (UT-Nr. 98, 100) sowie Solartechnologien (UT-Nr. 93), Bleifreie Lote (UT-Nr. 56), RFID (UT-Nr. 5) und Sauerstoffverzehrkathode (UT-Nr. 13b) fallen in diese Gruppe.

Tabelle 10: Ranking der Umwelttechnologien: Weitere 6 Umwelttechnologien in der Betrachtung

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

Mit den bereits genannten UTs sind 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 Rohstoff Kupfer auf (siehe folgende Tabelle). Dabei weist UT-Nr. 105 (Speicherkraftwerke - Pumpspeicherkraftwerke) mit 672 t den geringsten Bedarf im Vergleich mit den anderen drei UTs auf und fällt somit aus der weiteren Betrachtung heraus.

Tabelle 11: Ranking der Umwelttechnologien: 4 Grenzfälle bei der Auswahl der 20 Umwelttechnologien

UT Nr.	UT Name	Höchstes Rohstoffranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
107	Synchron-Generatoren	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 103.603 t
83	Kraftwerke – GuD/Gas	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 100.837 t
108	Asynchron-Generatoren in WKA	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 25.824 t
105	Speicherkraftwerke - Pumpspeicherkraftwerk	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff: 672 t

Somit fallen folgende 5 Umwelttechnologien (inklusive Nr. 105) aufgrund des vorgenommenen Rankings aus der weiteren Betrachtung heraus:

Tabelle 12: Ranking der Umwelttechnologien: 5 Umwelttechnologien fallen aus der Betrachtung heraus

UT Nr.	UT Name	Höchstes Rohstoff-ranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
105	Speicherkraftwerke – Pumpspeicherkraftwerk	17 (Kupfer)	17,0	1 relevanter Rohstoff (672 t)
91	Si-Dickschichtzellen	17 (Kupfer)	17,5	2 relevante Rohstoffe
39	Karosserie	18 (Silizium)	19,5	2 relevante Rohstoffe
52	Phosphorrückgewinnung	19 (Magnesium)	19,0	1 relevanter Rohstoff
50+51	Membrantechnik	20 (TiO₂)	20,0	1 relevanter Rohstoff

Weitere 15 Umwelttechnologien wurden ebenfalls untersucht, es konnte aber keine 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. UT-Nr. 68 Precision Farming, UT-Nr. 8 Aerogele). Bei anderen Umwelttechnologien konnte der Einsatz der relevanten Rohstoffe nicht in Erfahrung gebracht werden (z.B. UT-Nr. 26 OLED) oder beläuft sich auf so geringe Mengen, dass keine Rohstoffrelevanz gegeben ist (z.B. UT-Nr. 40 Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke). Zum anderen fallen in diese Gruppe Umwelttechnologien, die noch nicht auf dem Markt sind und somit keine Substitutionspotentiale aufweisen (z.B. UT-Nr. 111 HTS-Generatoren).

Tabelle 13: 15 Umwelttechnologien ohne Rohstoffrelevanz

UT Nr.	UT Name	Kommentar
2	Kompressoren	Keine Rohstoffrelevanz
8	Aerogele	Keine Rohstoffrelevanz
12	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Keine Rohstoffrelevanz
16	Celitement	Keine Rohstoffrelevanz
26	OLED	Keine Rohstoffrelevanz
33	Automatische Stofftrennverfahren	Keine Rohstoffrelevanz
40	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke	Keine Rohstoffrelevanz
41	Leichtbau - Titan und Sc-Airframe	Keine Rohstoffrelevanz
67	Nanobeschichtung von Oberflächen	Keine Rohstoffrelevanz
68	Precision Farming	Keine Rohstoffrelevanz
70	Me-Schlackenaufbereitung	Keine Rohstoffrelevanz
110	Reluktanzgeneratoren	Keine Rohstoffrelevanz
111	HTS-Generatoren	Keine Rohstoffrelevanz
48	Dezentrale Wasseraufbereitung	Keine Rohstoffrelevanz
49b	Wassereffizienztechnologien	Keine Rohstoffrelevanz

Abschließend sind die 20 ausgewählten Umwelttechnologien in der folgenden Tabelle aufgelistet. Diese 20 UTs werden im weiteren Projektverlauf auf Substitutionspotentiale untersucht.

Tabelle 14: Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien

UT Nr.	UT Name
53	Industriekatalysatoren
43	Fahrzeug-Abgas-Katalysator
24	Grüne Rechenzentren
37	Hybridmotoren
38	Elektroantriebsmotoren
60	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen
106	Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft)
35	Pedelects
87	Dünnschicht-Solarzellen
90	Tandemzellen
27	weiße LED
93	CSP-Technologie
13b	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode
5	RFID
56	Bleifreie Lote
100	Lithium-Ionen-Stromspeicher
98	Li-Ionen Batterien für PHEV
107	Synchron-Generatoren
83	Kraftwerke – GuD/Gas
108	Asynchron-Generatoren in WKA

4 Sensitivitätsanalyse zum Rohstoffranking und zur Auswahl der Umwelttechnologien

Dieses Kapitel untersucht die Sensitivität des Rohstoffrankings und der Auswahl der Umwelttechnologien. Damit soll festgestellt werden, wie robust die gewonnenen Ergebnisse aus Kapitel 3 sind. Untersucht wurde einerseits der Einfluss der Berechnungsmethodik auf die Kritikalität des Versorgungsrisikos, andererseits wurde der Einfluss einer veränderten Gewichtung und Bewertung der Kriterien auf die Kritikalitätseinstufung analysiert. Dazu dienen plausible Szenarien, die mögliche Entwicklungsdynamiken widerspiegeln, die von dem Green-Economy-Szenario, das hier als Basis für die Kritikalitätseinstufung zugrundegelegt wurde, abweichen können. Solche Dynamiken entstehen beispielsweise durch über den Trend hinausgehende Nachfrageimpulse, durch neue Technologien oder infolge von Marktinterventionen durch Regierungen und oligopolartigen Angebotsituationen. Sie sind schwer prognostizierbar, mit ihnen ist aber dennoch gerade über längere Zeiträume, wie sie hier betrachtet werden, zu rechnen. Sie zeichnen sich deshalb vielfach als „Wild cards“, „Schwarze Schwäne“ oder „Disruptive Technologien“ aus, die die in diesem Projekt entwickelten Szenarioverläufe grundlegend verändern können. Langfristig ist deshalb davon auszugehen, dass sich die Bewertung der Versorgungsrisiken, der strategischen Bedeutung von Rohstoffen für Umwelttechnologien und der ökologischen Schadenspotentiale im Lauf der Zeit verändert.

Im Folgenden wird zunächst der Einfluss der Berechnungsmethodik auf die Kritikalitätseinstufung in der Dimension Versorgungsrisiko im Vergleich zur Aggregationsmethode gemäß VDI 4800 Blatt 2 untersucht. Im Anschluss wird die Berechnungsgrundlage der Kritikalität auf Basis von Szenarien auf zwei Arten variiert. In einem Ansatz wird die Gewichtung betroffener Kriterien geändert, in einem zweiten Ansatz die Bewertung der betroffenen Kriterien. Abschließend wird die Sensitivität der Einstufung des ökologischen Schadenspotentials untersucht. Bei der Dimension strategische Bedeutung wurde auf eine Sensitivitätsanalyse verzichtet, da im ersten Schritt bereits ein Basis-Szenario (BAU) und ein Green-Economy-Szenario betrachtet wurden.

4.1 Einfluss der Berechnungsmethodik auf die Gesamtkritikalität im Versorgungsrisiko

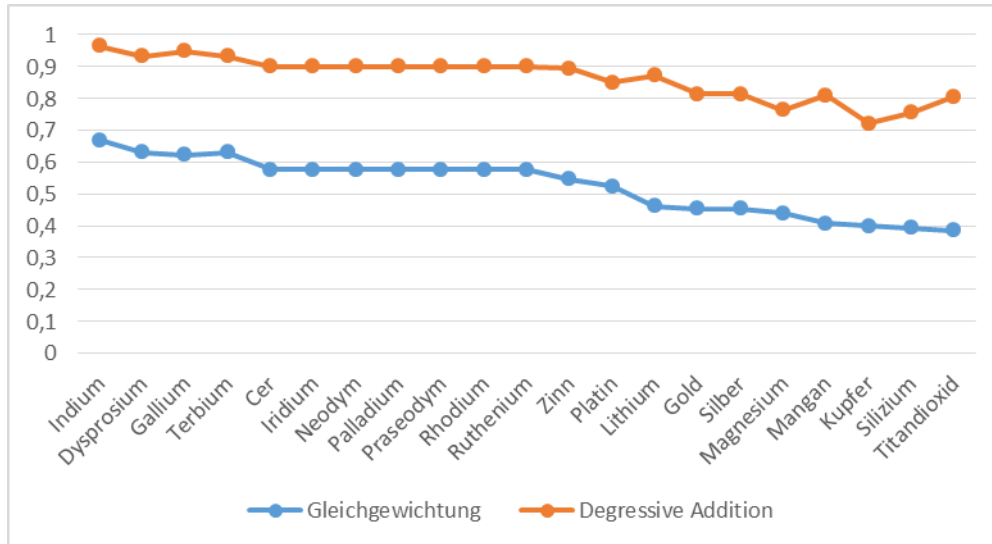
Die Einschätzung der Versorgungskritikalität eines Rohstoffes, wie sie hier vorgenommen wurde, folgt den Kriterien, Indikatoren und Bewertungsgrundsätzen der VDI Richtlinie 4800 Blatt 2 (S. 13), weicht aber bei der Aggregationsmethode zur Kritikalitätsanalyse von Rohstoffen ab. Die VDI-Richtlinie empfiehlt die Methode einer degressiven Addition mittels derer die Gesamtkritikalität bestimmt wird. Diese Methode addiert die Summanden mit abnehmender Gewichtung. Damit werden einerseits hohe Ergebniswerte der Indikatoren hinreichend berücksichtigt, sind aber nicht alleine ergebnisbestimmend. Andererseits werden durch die degressive Addition der Ergebniswerte tendenziell kritischere Werte höher gewichtet.

Anders als die in der VDI Richtlinie 4800 verwendete Aggregationsmethode wurden für dieses Projekt die Einzelwerte gleichgewichtet zur Gesamtkritikalität von Rohstoffen addiert. Durch dieses methodische Vorgehen wird sichergestellt, dass für die Sensitivitätsanalyse die Gewichtungen einzelner Kriterien ohne Verzerrung der Ergebnisse verändert werden können.

Eine Gleichgewichtung der Einzelkriterien führt dazu, dass der Kritikalitätswert aller Rohstoffe gegenüber einer degressiven Addition deutlich niedriger ausfällt. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass für die hier betrachteten Metalle zwei der Kriterien (Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport und Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugelände) unkritisch sind und daher auf null gesetzt wurden (vgl. Abbildung 4). Der Einfluss der Bewertungsmethodik auf die Rangfolge ist gering. Sie ändert sich nur an einzelnen Positionen, insbesondere nur bei vergleichsweise weniger kritischen Rohstoffen. Dies gilt für Titan, das in der gleichgewichteten Addition unkritischer ist (von Rang 17 auf

Rang 21), während Kupfer kritischer bewertet wird (von Rang 21 auf Rang 19). Geringe Verschiebungen von einer Rangstufe ergeben sich für Platin, Lithium, Magnesium und Mangan. Bei allen anderen Rohstoffen verändert sich das Ranking nicht.

Abbildung 4: Einfluss der Berechnungsmethodik auf die Kritikalität des Versorgungsrisikos



Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Prospektive Sensitivitätsanalyse des Versorgungsrisikos

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 Abbildung 5 dargestellt. Während die ersten drei Szenarien sich jeweils auf ein Kriterium des VDI-Kataloges auswirken, ist das das vierte Szenario „Geopolitische Risiken“ mit fünf Kriterien übergreifender. Im Einzelnen spiegeln die Szenarien folgende Annahmen und Ausprägungen wider:

Restriktive Handelspolitiken

Das Szenario fokussiert auf die regulatorische Situation für Rohstoffprojekte. Wirtschafts-, steuer- und umweltpolitische Rahmenbedingungen haben erheblichen Einfluss auf Intensität und Ausmaß der Gewinnung von Rohstoffen. Regulatorische Hemmnisse können bergbauliche Aktivitäten und den Export von Rohstoffen trotz bedeutsamer Rohstoffvorkommen stark limitieren. Restriktivere Handelspolitiken können Preissteigerungen und/oder -volatilitäten begünstigen. Das Szenario nimmt restriktivere Förder- und Handelsbedingungen, beispielsweise Handelsembargos, stärkere Marktkonzentration oder Rohstoffkartelle an, so dass das regulatorische Länderrisiko höher als aus heutiger Sicht ausfällt.

Globale Marktwachstumssteigerungen

Dieses Szenario geht davon aus, dass die globale Nachfrage nach Rohstoffen schneller wächst als angenommen. Dies ist dann der Fall, wenn die Weltwirtschaft und speziell die Märkte für Zukunfts- und Umwelttechnologien über den Trend hinaus schneller wachsen. Das Rohstoffangebot kann dann nicht oder nur mit zeitlicher Verzögerung an die Nachfrage angepasst werden. Die Verletzbarkeit in rohstoffarmen Ländern wie Deutschland wird noch dadurch erhöht, dass bestimmte metallische Rohstoffe häufig nur über vergesellschaftete Vorkommen in Erzen erschlossen werden können. Steigt der Bedarf

nach einem Metall stark an, so ändert sich das gesamte Wertschöpfungs- und Preisgefüge von Haupt-, Kuppel- und Nebenprodukten. Das Szenario ist durch besondere Preis- und Lieferrisiken infolge technologisch bedingter Nachfrageschübe gekennzeichnet, die durch rapide Technologiewechsel der -sprünge ausgelöst werden.

Höhere Recyclingraten

Dieses Szenario nimmt die Verbreitung des Recyclings von End-of-Life-Abfällen in den Blick. Das Recycling umfasst die stoffliche Verwertung von Abfällen, um daraus Sekundärrohstoffe herzustellen. Schlüsselement einer Intensivierung der Sekundärrohstoffwirtschaft ist das Zusammenspiel von Design for Disassembly, Sammelsystemen, Aufbereitungs- und Recyclingverfahren. Angenommen wird, dass das dominierende massebasierte Recycling auf Spurenelemente, Wert und Prozessqualität hin ausgerichtet wird. Gegenüber der heutigen Einschätzung ist in Zukunft infolge politischer Rahmenbedingungen sowie technologischer und logistischer Fortschritte und deren Verbreitung mit höheren Recyclingraten zu rechnen. Kennzeichnend sind für dieses Szenario Entwicklungssprünge bei der recyclinggerechten Konstruktion, Fortschritte bei Sammelsystemen, dem Aufbau globaler Recyclinginfrastrukturen sowie der Verbreitung von Demontage- und Recyclingsystemen zur Rückgewinnung von dissipativen Technologiemetallen.

Geopolitische Risiken

Das Szenario umfasst geopolitische und regulatorische Kriterien. Dies sind „Geopolitische Risiken der Weltproduktion“, „Länderkonzentration der Produktion“, „Länderkonzentration der Reserven“ und „Regulatorische Situation für Rohstoffprojekte“. Zudem wird eine Steigerung der Nachfrage nach Rohstoffen über den Trend hinaus angenommen, was dem Kriterium „Globaler Nachfrageimpuls“ zuzuordnen ist. Generell wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass der Zugang zu Rohstoffen erschwert wird. Die Länderkonzentration der Reserven und der Produktion nimmt zu. Mit zunehmender Konzentration steigt das Risiko von handelspolitisch motivierten restriktiven Maßnahmen zur Ausnutzung von Marktmacht seitens der Rohstoffanbieter. Unerwartete politische und/oder militärische Auseinandersetzungen beeinträchtigen die Verfügbarkeit von Rohstoffen, was sich in höheren Preis- und Lieferrisiken für Rohstoffe niederschlägt.

Abbildung 5: Szenarien der Dimension Versorgungsrisiko

	Restriktive Handelspolitiken	Globale Marktwachstumssteigerung	Höhere Recyclingraten	Geopolitische Risiken
Grundannahmen	Rohstoffhandel wird durch restriktive Handelsbedingungen erschwert <ul style="list-style-type: none"> • Handelsembargo • Marktkonzentration • Rohstoffkartelle 	Weltmarkt für Rohstoffe wächst stärker als im Trend <ul style="list-style-type: none"> • Nachfrigesteigerung • Hohes Weltwirtschaftswachstum • Schnelles Wachstum von Zukunftstechnologien 	Anstieg der Recyclingraten infolge politischer Rahmenbedingungen und technologisch, logistischer Fortschritte <ul style="list-style-type: none"> • Recyclinggerechte Konstruktion • Retro-Logistik • Demontage • Recyclingtechnologien • Globale Recyclinginfrastrukturen 	Geopolitische und regulatorische Risiken nehmen zu
Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> • Regulatorische Situation für Rohstoffprojekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Globaler Nachfrageimpuls 	<ul style="list-style-type: none"> • Recycling 	<ul style="list-style-type: none"> • Globaler Nachfrageimpuls • Regulatorische Situation für Rohstoffprojekte • Geopolitische Risiken der Weltproduktion • Länderkonzentration der Produktion • Länderkonzentration der Reserven

Quelle: Eigene Abbildung

4.2.1 Veränderte Gewichtung

In diesem Ansatz wird die Gewichtung der Kriterien des Versorgungsrisikos, die im Basisfall gleich ist, verändert. Bezogen auf die Szenarien fließen die betroffenen Kriterien gewichtet mit einem Faktor 4 in die Gesamtbewertung ein; bei insgesamt 13 Kriterien haben die in den Szenarien „Restriktive Handelspolitiken“, „Globale Marktwachstumssteigerung“ und „Höhere Recyclingraten“ höher gewichteten einzelnen Kriterien damit jeweils einen Einfluss von 25% auf das Gesamtergebnis. Im Szenario „Geopolitische Risiken“ machen die fünf höhergewichteten Kriterien insgesamt 71% der Gesamtbewertung aus.

Damit steigt die Kritikalität eines Rohstoffes in einem Szenario, wenn die Kritikalität des betroffenen Einzelkriteriums höher ist als die durchschnittliche Kritikalität, ansonsten sinkt sie.

Tabelle 15 zeigt das Ranking der Rohstoffe und ihre Kritikalität im Basisfall sowie das Ranking und die Differenz der Kritikalitätswerte in den Szenarien bei veränderter Gewichtung der betroffenen Kriterien.

Tabelle 15: Ranking und Veränderung der Kritikalität in den Szenarien bei veränderter Gewichtung (Dimension Versorgungsrisiko)

Rohstoff	Basis Ranking	Kritikalität	Recycling Ranking	Delta Kritikalität zu Basis	Handel Ranking	Delta Kritikalität zu Basis	Wachstum Ranking	Delta Kritikalität zu Basis	Geopolitik Ranking	Delta Kritikalität zu Basis
Ce	5-11	0,577	5-11	0,023	7	0,023	11-12	-0,052	3-5	0,162
Dy	2-3	0,631	3-4	0,013	1-2	0,013	3-4	0,013	1-2	0,134
Ga	4	0,623	1	0,071	9	-0,061	2	0,071	10	0,030
Au	15-16	0,454	16-17	-0,029	18-19	-0,029	15-16	-0,029	19-20	-0,040
In	1	0,669	2	0,006	3	-0,069	1	0,062	12	-0,037
Ir	5-11	0,577	5-11	0,023	10-12	-0,052	5-9	0,023	7-9	0,087
Cu	19	0,400	20	-0,019	21	-0,019	18	-0,019	21	-0,011
Li	14	0,462	13	0,101	17	-0,030	14	-0,030	14-15	0,106
Mg	17	0,438	18	-0,026	13	0,049	17	-0,026	14-15	0,129
Mn	18	0,408	19	-0,020	20	-0,020	19	-0,076	18	0,028
Nd	5-11	0,577	5-11	0,023	4-6	0,023	5-9	0,023	3-5	0,162
Pd	5-11	0,577	5-11	0,023	4-6	0,023	11-12	-0,052	6	0,130
Pt	13	0,523	14	0,033	14	-0,042	10	0,033	11	0,116
Pr	5-11	0,577	5-11	0,023	4-6	0,023	5-9	0,023	3-5	0,162
Rh	5-11	0,577	5-11	0,023	10-12	-0,052	5-9	0,023	7-9	0,087
Ru	5-11	0,577	5-11	0,023	10-12	-0,052	5-9	0,023	7-9	0,087
Ag	15-16	0,454	16-17	-0,029	18-19	-0,029	15-16	-0,029	19-20	-0,040
Si	20	0,392	15	0,058	15	0,058	20	-0,074	17	0,111
Tb	2-3	0,631	3-4	0,013	1-2	0,013	3-4	0,013	1-2	0,134
TiO ₂	21	0,385	21	-0,016	16	0,059	21	-0,072	16	0,158
Sn	12	0,546	12	0,029	8	0,029	13	-0,046	13	0,072

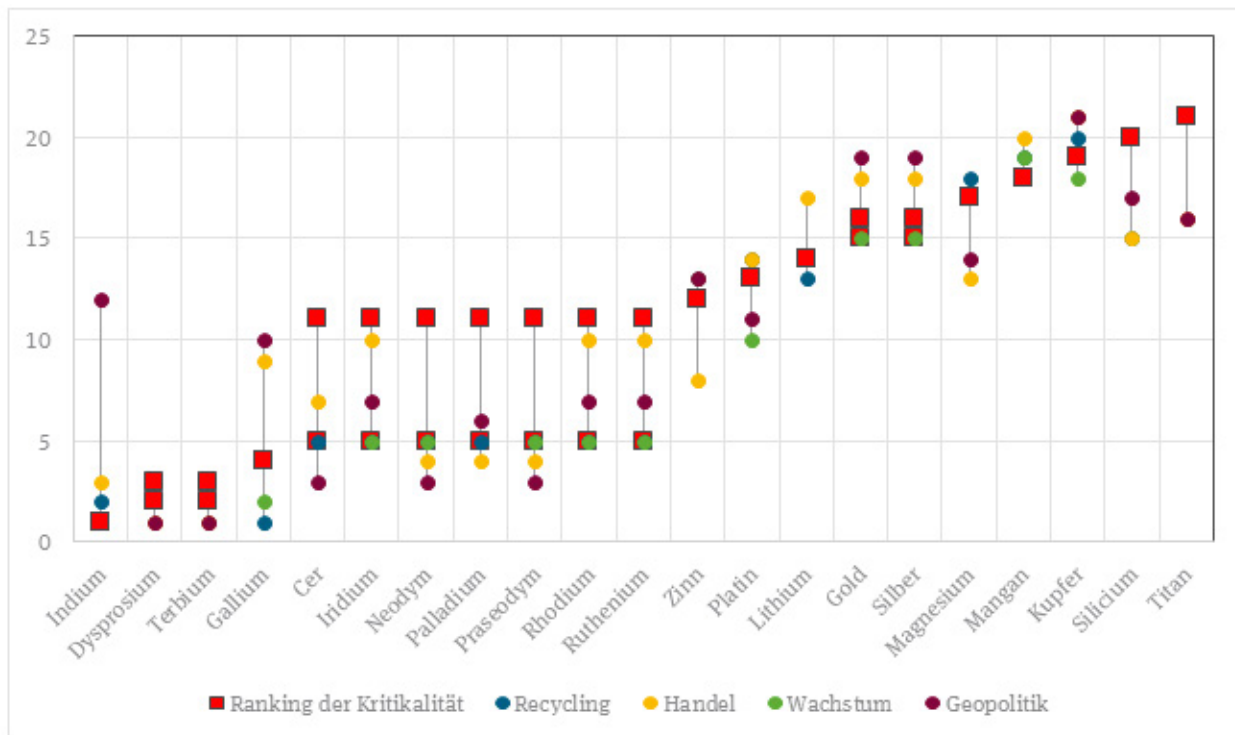
Fast alle Rohstoffe verändern ihren Rang zumindest in einem der Szenarien – die einzige Ausnahme bilden einige Stoffe, die sich schon im Basisfall einen Rang mit anderen Stoffen geteilt haben, und auch in den Szenarien in dieser Reichweite bleiben (vgl. Tabelle 15).

Veränderungen bei der absoluten Kritikalitätseinschätzung beeinflusst die Rangfolge des Versorgungsrisikos wie folgt:

- ▶ Keine Verschiebungen: Cer, Dysprosium, Iridium, Neodym, Palladium, Praseodym, Rhodium, Ruthenium, Terbium
- ▶ Verschiebungen um eine Rangstufe: keine
- ▶ Verschiebungen um 2 bis 3 Rangstufen: Gold, Kupfer, Lithium, Mangan, Platin, Silber
- ▶ Verschiebungen um 4 Rangstufen oder höher: Gallium, Indium, Magnesium, Silizium, Titandioxid, Zinn.

Besonders hervorzuheben ist Indium im Szenario „Geopolitische Risiken“: Hier verschiebt sich der Rang vom ersten auf den zwölften Platz.

Abbildung 6: Spannweite des Ranking in den Szenarien bei veränderter Gewichtung (Dimension Versorgungsrisiko)



Quelle: Eigene Darstellung

Während sich die Rangfolge der Kritikalitätseinschätzung in den Szenarien ändert, bleibt die grundsätzliche Kritikalitätseinschätzung der Rohstoffe bestehen. Ein großer Teil der Verschiebungen im Ranking ist darauf zurückzuführen, dass die Stoffe in ihrer Kritikalität sehr dicht zusammen liegen. Die absoluten Kritikalitätswerte ändern sich bis auf Ergebniswerte im Szenario „Geopolitische Risiken“ in keinem Fall um mehr als 0,1. Die absolute Kritikalitätseinschätzung ändert sich in den meisten Fällen nur relativ schwach (kleiner 0,1). Verschiebungen größer 0,1 ergeben sich im Szenario „Geopolitische Risiken“ für Cer, Dysprosium, Lithium, Magnesium, Neodym, Palladium, Platin, Praseodym, Silizium, Terbium und Titandioxid. Interessanterweise ist die absolute Kritikalitätsänderung von Indium in diesem Szenario (die für ein Abrutschen vom ersten auf den zwölften Rang sorgte) mit -0,037 relativ gering; bei einem Fokus auf geopolitische Risiken ist Indium tendenziell unkritischer, da die meisten sehr kritisch bewerteten Aspekte nicht in diese Kategorie fallen. Diese Einschätzung läuft der Bewertung der meisten anderen Stoffe in diesem Szenario entgegen, die kritischer ausfällt – dies erklärt auch das Abrutschen auf Kritikalitätsstufe 12 im Vergleich der Stoffe.

4.2.2 Veränderte Bewertung

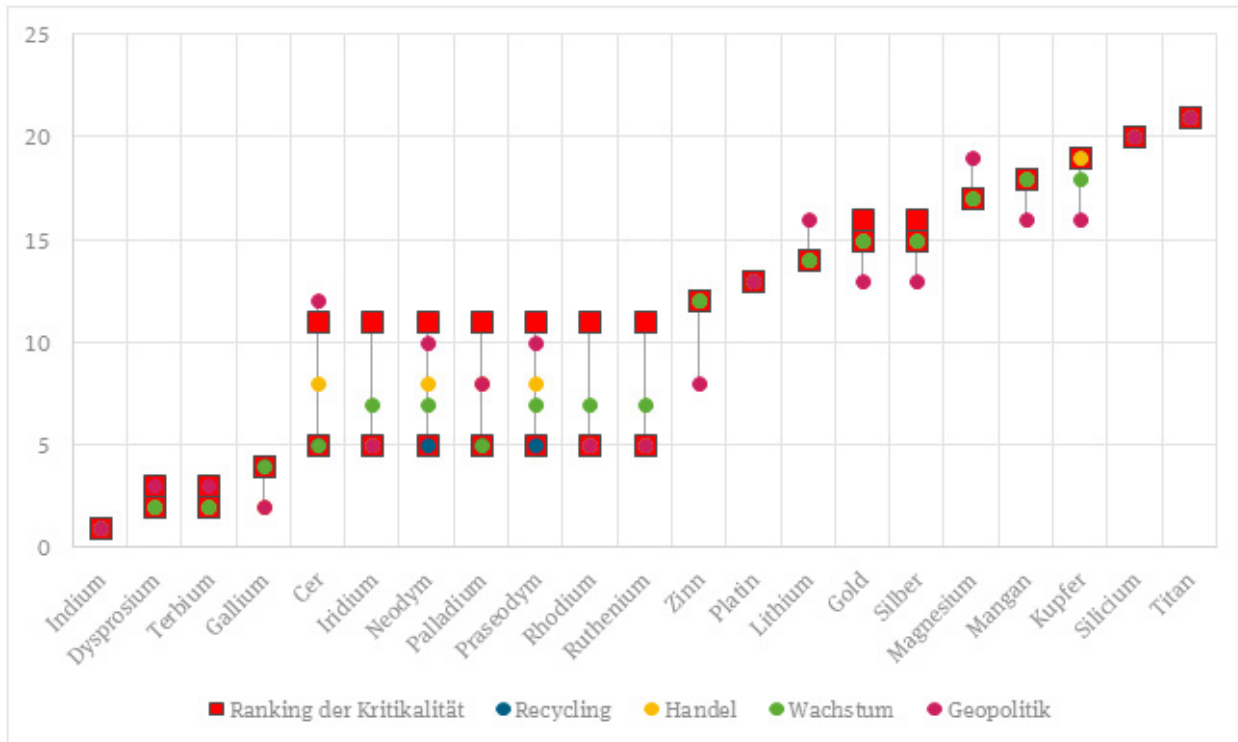
In diesem Ansatz werden Kriterien in ihrer Bewertung um eine Stufe im Wertebereich 0/0,3/0,7/1,0 herauf- oder herabgesetzt. Dabei wird darauf verzichtet, die Änderung der Bewertung nach Rohstoffen zu spezifizieren, da dies im Rahmen dieses Projektes schwer zu leisten ist. Im Fall der Szenarien „Restriktive Handelspolitiken“, „Globale Marktwachstumssteigerung“ und „Geopolitische Risiken“ wurden die Bewertung der betroffenen Kriterien um eine Stufe, maximal bis zum höchsten Wertebereich, heraufgesetzt. Im Szenario „Höhere Recyclingraten“ wurde die Kritikalitätsbewertung um eine Stufe herabgesetzt, da eine Verbesserung der Recyclingbedingung das Versorgungsrisiko minimiert. Kriterien, die schon im Basisfall als maximal kritisch bewertet werden, werden nicht geändert.

Die nach diesem Ansatz erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 16 dargestellt.

Generell zeigt sich, dass wenn die Kritikalität eines Kriteriums erhöht wird, die Gesamtkritikalität des Versorgungsrisikos steigt. Verbesserung der Recyclingfähigkeit senkt in allen Fällen die Kritikalität.

Die Auswirkungen der szenariobasierten Veränderung der Bewertung sind in Abbildung 7 dargestellt.

Abbildung 7: Spannweite des Rankings in den Szenarien bei veränderter Bewertung (Dimension Versorgungsrisiko)



Quelle: Eigene Darstellung

Es ergeben sich die folgenden Verschiebungen:

- ▶ Keine Verschiebung: Dysprosium, Indium, Iridium, Mangan, Neodym, Palladium, Platin, Praseodym, Rhodium, Ruthenium, Silber, Silizium, Terbium, Titandioxid
- ▶ Verschiebungen um eine Rangstufe: Cer, Kupfer
- ▶ Verschiebungen um 2 bis 3 Rangstufen: Gallium, Gold, Lithium, Magnesium, Zinn.

Die Reihenfolge der Kritikalität ändert sich vor allem im Szenario „Geopolitische Risiken“, weniger in den anderen Szenarien, was daran liegt, dass im Fall zunehmender geopolitischer und regulatorischer Risiken vier von 13 Kriterien das Versorgungsrisiko erhöhen (vgl. auch Tabelle 16). 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.

Während sich die Rangfolge der Kritikalitätseinschätzung in den Szenarien ändert, bleibt die grundsätzliche Kritikalitätseinschätzung der Rohstoffe bestehen. Die absolute Kritikalitätseinschätzung ändert sich in den meisten Fällen nur relativ schwach (kleiner 0,1). Differenzen größer 0,1 ergeben sich im Szenario „Geopolitische Risiken“ für Kupfer, Mangan, Indium, Silizium, Gold und Silber.

Tabelle 16: Ranking und Veränderung der Kritikalität der Rohstoffe in den Szenarien bei veränderter Bewertung (Dimension Versorgungsrisiko)

Rohstoff	Basis Ranking	Kritikalität	Recycling Ranking	Delta Kritikalität zu Basis	Handel Ranking	Delta Kritikalität zu Basis	Wachstum Ranking	Delta Kritikalität zu Basis	Geopolitik Ranking	Delta Kritikalität zu Basis
Ce	5-11	0,577	5-11	-0,031	8-11	0,023	5-6	0,031	12	0,046
Dy	2-3	0,631	2-3	-0,031	2-4	0,023	2-3	0,023	3-4	0,046
Ga	4	0,623	4	-0,023	2-4	0,031	4	0,000	2	0,100
Au	15-16	0,454	15-16	-0,023	15-16	0,031	15-16	0,031	13-15	0,146
In	1	0,669	1	-0,031	1	0,031	1	0,000	1	0,108
Ir	5-11	0,577	5-11	-0,031	5-7	0,031	7-11	0,023	5-7	0,077
Cu	19	0,400	19	-0,023	19	0,031	18-19	0,031	16-18	0,146
Li	14	0,462	14	-0,023	14	0,031	14	0,031	16-18	0,085
Mg	17	0,438	17	-0,023	17	0,023	17	0,031	19	0,100
Mn	18	0,408	18	-0,023	18	0,031	18-19	0,023	16-18	0,138
Nd	5-11	0,577	5-11	-0,031	8-11	0,023	7-11	0,023	10-11	0,046
Pd	5-11	0,577	5-11	-0,031	8-11	0,023	5-6	0,031	8-9	0,069
Pt	13	0,523	13	-0,031	13	0,031	13	0,023	13-15	0,077
Pr	5-11	0,577	5-11	-0,031	8-11	0,023	7-11	0,023	10-11	0,046
Rh	5-11	0,577	5-11	-0,031	5-7	0,031	7-11	0,023	5-7	0,077
Ru	5-11	0,577	5-11	-0,031	5-7	0,031	7-11	0,023	5-7	0,077
Ag	15-16	0,454	15-16	-0,023	15-16	0,031	15-16	0,031	13-15	0,146
Si	20	0,392	20	-0,031	20	0,023	20	0,023	20	0,108
Tb	2-3	0,631	2-3	-0,031	2-4	0,023	2-3	0,023	3-4	0,046
TiO ₂	21	0,385	21	-0,023	21	0,023	21	0,023	21	0,100
Sn	12	0,546	12	-0,031	12	0,023	12	0,031	8-9	0,100

4.3 Sensitivität des ökologischen Schadenspotentials

Das ökologische Schadenspotential bestimmt sich 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). Wie in Tabelle 17 dargestellt, ändert 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 ist das Ranking der Rohstoffe nach ihrem ökologischen Schadenspotential sehr robust.

Tabelle 17: Sensitivität des ökologischen Schadenspotentials

Rohstoff	Menschl. Gesundheit	Öko-systeme	Gewichtung 50/50	Ranking 50/50	Gewichtung 30/70	Ranking 30/70	Gewichtung 70/30	Ranking 70/30
Cer	0,66	0,08	4,81	17	3,57	17	5,90	17
Dysprosium	3,1	0,37	13,01	13	10,57	13	14,90	13
Gallium	8	0,75	19,78	10	16,71	11	22,04	10
Gold	6500	72	76,36	2	72,05	2	79,22	2
Indium	11	0,4	21,87	9	18,23	9	24,42	9
Iridium	2000	36	66,18	5	61,95	5	69,01	5
Kupfer	6,1	0,023	17,05	12	13,43	12	19,60	11
Lithium	0,35	0,027	2,78	18	1,92	18	3,56	18
Magnesium	0,19	0,019	1,65	20	1,14	20	2,13	20
Mangan	0,13	0,0045	1,10	21	0,70	21	1,47	21
Neodym	0,9	0,11	6,06	16	4,58	16	7,33	16
Palladium	2600	20	68,37	4	64,02	4	71,25	4
Platin	4300	59	72,79	3	68,51	3	75,64	3
Praseodym	0,98	0,12	6,44	15	4,89	15	7,76	15
Rhodium	10000	150	80,13	1	75,86	1	82,98	1
Ruthenium	500	8,9	54,15	6	49,92	6	56,98	6
Silber	150	1,1	43,64	7	39,33	7	46,51	7
Silizium (Metall)	4,97	2,18	18,22	11	16,94	10	19,34	12
Terbium	15	1,8	25,01	8	21,95	8	27,26	8
TiO ₂	0,34	0,03	2,73	19	1,91	19	3,49	19
Zinn	2,3	0,094	10,61	14	8,00	14	12,62	14

4.4 Auswirkungen der prospektiven Sensitivitätsanalyse auf die UT-Auswahl

Die oben beschriebenen Veränderungen in der prospektiven Sensitivitätsanalyse ändern das Gesamtranking der Rohstoffe über alle Dimensionen nur geringfügig. In der folgenden Tabelle werden die relevanten Rohstoffe für die Grenzfälle der UT-Auswahl und die Änderungen im Gesamtranking über alle Dimensionen in den Sensitivitätsanalysen dargestellt. Es handelt sich dabei um Kupfer, Magnesium, Mangan, Silizium und Titandioxid.

Die Änderung der Bewertung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse führt zu keiner für die UT-Auswahl relevanten Änderung des Rankings. Mit Ausnahme von Titandioxid im Szenario „Geopolitik“ bleibt das Ranking der Rohstoffe in der Bewertungsänderung gleich.

Bei den Szenarien mit unterschiedlicher Gewichtung sind Änderungen im Gesamtranking zu erkennen, außer bei Mangan. Mangan bleibt sowohl bei der Bewertungsänderung als auch bei der Gewichtungsänderung auf dem letzten Rang (21).

Tabelle 18: Rohstoffranking der Sensitivitätsanalyse über alle Dimensionen (Auszug relevanter Rohstoffe für die Grenzfälle der UT-Auswahl)

	Gesamtrang Basis	Gesamtrang Recycling		Gesamtrang Handel		Gesamtrang Wachstum		Gesamtrang Geopolitik	
		Gewichtung	Bewertung	Gewichtung	Bewertung	Gewichtung	Bewertung	Gewichtung	Bewertung
Kupfer	17	18	17	19	17	17	17	18	17
Magnesium	19	19	19	18	19	19	19	18	19
Mangan	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Silizium (Metall)	18	17	18	17	18	18	18	17	18
Titandioxid	20	20	20	19	20	20	20	18	19

Wie sich die oben ausgeführten Änderungen des Gesamtrankings der Rohstoffe im Rahmen der Sensitivitätsanalyse auf das Ranking der UT-Auswahl auswirkt, ist in folgender Tabelle abgebildet. Dargestellt sind hier nur die Grenzfälle bei der UT-Auswahl. Das ‚x‘ einer UT beim „Gesamtrang Basis“ bzw. den rechts daneben abgebildeten Szenarien bedeutet, dass diese UT unter die 20 ausgewählten UTs fällt bzw. fallen würde. Das ‚-‘ symbolisiert, dass die UT im folgenden Schritt nicht weiter auf die Substitutionspotentiale untersucht wird (fällt nicht unter die 20 ausgewählten UTs).

Tabelle 19: Ranking der UT-Grenzfälle in Basis und Sensitivitätsanalyse

UT-Nr.		Gesamtrang Basis	Gesamtrang Recycling		Gesamtrang Handel		Gesamtrang Wachstum		Gesamtrang Geopolitik	
			Gewichtung	Bewertung	Gewichtung	Bewertung	Gewichtung	Bewertung	Gewichtung	Bewertung
107	Synchron-Generatoren	x	x	x	-	x	x	x	x	x
83	Kraftwerke – GuD/Gas	x	-	x	-	x	x	x	-	x
108	Asynchron-Generatoren in WKA	x	-	x	-	x	x	x	-	x
105	Speicherkraftwerke / Pumpspeicherkraftwerk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
91	Si-Dickschichtzellen	-	x	-	x	-	-	-	x	-
39	Karosserie	-	x	-	x	-	-	-	x	-

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die Auswahl der Umwelttechnologien auch unter Annahme veränderter Szenarioverläufe robust bleibt. Somit bleiben die Umwelttechnologien Synchron-Generatoren (UT Nr. 107), Kraftwerke GuD/Gas (UT Nr. 83) und Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 108) in der Auswahl der 20 UTs. Die UTs Speicherkraftwerke (UT Nr. 105), Si-Dickschichtzellen (UT Nr. 91), Karosserie (UT Nr. 39), Phosphorrückgewinnung (UT Nr. 52) und Membrantechnik (UT Nr. 50+51) fallen aus der weiteren Betrachtung heraus.

5 Fazit

Im Rahmen der Arbeiten zu AP3 innerhalb des SubSKrit-Projektes wurden aus 40 UTs 20 Umwelttechnologien identifiziert, die im weiteren Projektverlauf auf Substitutionspotentiale untersucht werden. Die Auswahl der 20 UTs wurde auf Basis der enthaltenen kritischen Rohstoffe und ihrer jeweiligen Kritikalität durchgeführt (siehe Kapitel 3). Anhand der Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 4) wurde die Auswahl der 20 UTs auf ihre Robustheit geprüft. Auch nach den Sensitivitäten bleibt die Auswahl der 20 UTs stabil (siehe Tabelle 14).

Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien lassen sich in folgende Technologiegruppen einteilen:

- ▶ Katalysatoren: UT-Nr. 43 Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren, UT-Nr. 53 Industriekatalysatoren
- ▶ Permanentmagnete: UT-Nr. 35 Pedelects, UT-Nr. 37 Hybridmotoren, UT-Nr. 38 Elektroantriebsmotoren, UT-Nr. 60 Hochleistungs-Permanentmagnete übrige Anwendungen, UT-Nr. 106 Permanentmagnet-Generator Windkraft
- ▶ Solartechnologie: UT-Nr. 87 Dünnschicht-Solarzellen, UT-Nr. 90 Tandemzellen, UT-Nr. 93 CSP-Technologie
- ▶ Speichertechnologien: UT-Nr. 98 Lithium-Ionen-Batterien PHEV, UT-Nr. 100 Lithium-Ionen-Stromspeicher
- ▶ Generatoren ohne Permanentmagnete: UT-Nr. 107 Synchron-Generator, UT-Nr. 108 Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen
- ▶ Elektronik: UT-Nr. 24 Grüne Rechenzentren, UT-Nr. 56 bleifreie Lote
- ▶ Sonstige Technologien: UT-Nr. 5 RFID, UT-Nr. 13b Sauerstoffverzehrkatode, UT-Nr. 27 weiße LED, UT-Nr. 83 Kraftwerke GuD/Gas.

6 Anhang

Tabelle 20: Anhang: Rankingergebnisse der 40 Umwelttechnologien

UT Nr.	UT Name	Höchstes Rohstoff-ranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
53	Industriekatalysatoren	1 (Rhodium)	4,8	6 relevante Rohstoffe
43	Fahrzeug-Abgas-Katalysator	1 (Rhodium)	6,0	4 relevante Rohstoffe
24	Grüne Rechenzentren	2 (Palladium)	9,7	9 relevante Rohstoffe
37	Hybridmotoren	5 (Terbium)	9,5	6 relevante Rohstoffe
38	Elektroantriebsmotoren	5 (Terbium)	9,5	6 relevante Rohstoffe
60	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen	5 (Terbium)	9,6	5 relevante Rohstoffe
106	Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft)	6 (Dysprosium)	11,0	3 relevante Rohstoffe
35	Pedelecs	6 (Dysprosium)	13,2	6 relevante Rohstoffe
87	Dünnschicht-Solarzellen	7 (Indium)	11,3	3 relevante Rohstoffe
90	Tandemzellen	7 (Indium)	11,5	4 relevante Rohstoffe
27	weiße LED	7 (Indium + Platin)	11,6	8 relevante Rohstoffe
13b	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkathode	12 (Silber)	12,0	1 relevanter Rohstoff
56	Bleifreie Lote	12 (Silber + Zinn)	13,7	3 relevante Rohstoffe
5	RFID	12 (Silber)	15,7	3 relevante Rohstoffe
93	CSP-Technologie	12 (Silber)	17,8	5 relevante Rohstoffe
100	Lithium-Ionen-Stromspeicher	15 (Lithium)	17,7	3 relevante Rohstoffe
98	Li-Ionen Batterien für PHEV	15 (Lithium)	18,3	4 relevante Rohstoffe
107	Synchron-Generatoren	17 (Kupfer)	17,0	103.603 t
83	Kraftwerke – GuD/Gas	17 (Kupfer)	17,0	100.837 t
108	Asynchron-Generatoren in WKA	17 (Kupfer)	17,0	25.824 t
105	Speicherkraftwerke - Pumpspeicherkraftwerk	17 (Kupfer)	17,0	672 t
91	Si-Dickschichtzellen	17 (Kupfer)	17,5	2 relevante Rohstoffe
39	Karosserie	18 (Silizium)	19,5	2 relevante Rohstoffe
52	Phosphorrückgewinnung	19 (Magnesium)	19,0	1 relevanter Rohstoff
50+51	Membrantechnik	20 (TiO₂)	20,0	1 relevanter Rohstoff
2	Kompressoren	Keine Rohstoffrelevanz		
8	Aerogele	Keine Rohstoffrelevanz		

UT Nr.	UT Name	Höchstes Rohstoff-ranking (Gesamtranking)	Mittelwert UT nach Gesamtranking	Kommentar
12	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Keine Rohstoffrelevanz		
16	Celitement	Keine Rohstoffrelevanz		
26	OLED	Keine Rohstoffrelevanz		
33	Automatische Stofftrennverfahren	Keine Rohstoffrelevanz		
40	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke	Keine Rohstoffrelevanz		
41	Leichtbau - Titan und Sc-Airframe	Keine Rohstoffrelevanz		
67	Nanobeschichtung von Oberflächen	Keine Rohstoffrelevanz		
68	Precision Farming	Keine Rohstoffrelevanz		
70	Me-Schlackenaufbereitung	Keine Rohstoffrelevanz		
110	Reluktanzgeneratoren	Keine Rohstoffrelevanz		
111	HTS-Generatoren	Keine Rohstoffrelevanz		
48	Dezentrale Wasseraufbereitung	Keine Rohstoffrelevanz		
49b	Wassereffizienztechnologien	Keine Rohstoffrelevanz		

Abbildung 8: Anhang: Bewertung des Versorgungsrisikos nach VDI-Richtlinie [VDI 4800 2016]

Rohstoff / Element	Anwendungsbereich	Geologische, technische und strukturelle Indikatoren					Geopolitische und regulatorische Indikatoren				Ökonomische Indikatoren			
		Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Grad der Koppelproduktion/ Nebenproduktion	Verbreitungsgrad funktionaler EoL-Recyclingtechnologien	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/ Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	Politisches Länderrisiko	Regulatorisches Länderrisiko	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	Grad der Nachfragesteigerung	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	Annualisierte Preisvolatilität	
Cer	Legierungsmetall	0	0,7	0,7	0	0	1	1	0,7	0,7	1	0,3	0,7	0,7
	Farboxid/Glasindustrie													
	Leuchtstoff													
Neodym	Permanentmagnete (Elektromotoren/Generatoren)	0	0,7	0,7	0	0	1	1	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,3
	Färbung von Emaille			1									0,3	
Dysprosium	Permanentmagnete (Elektromotoren)	0	0,7	0,7	0	0	1	1	0,7	0,7	1	0,7	0,7	1

Rohstoff / Element	Geologische, technische und strukturelle Indikatoren					Geopolitische und regulatorische Indikatoren					Ökonomische Indikatoren			
	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Grad der Koppelproduktion/ Nebenproduktion	Verbreitungsgrad funktionaler EoL-Recyclingtechnologien	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/ Anbaugelände	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	Politisches Länderrisiko	Regulatorisches Länderrisiko	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	Grad der Nachfragesteigerung	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	Annualisierte Preisvolatilität	
Metallische Rohstoffe														
Aluminium	0	0	0,3	0	0	0,7	1	0,5	0,3	0,3	0	0,7	0,7	
Antimon	1	0,3	0,7	0	0	0,7	1	0,7	0,7	0,7	0	0,7	1	
Beryllium	0	0	0,7	0	0	0,7	1	0,3	0,3	1	0,7	0,7	-	
Bismut	0,7	1	0,7	0	0	0,7	1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Chrom	1	0	0,3	0	0	1	1	0,7	0,3	0,7	0,3	1	0,7	
Cobalt	0,3	0,7	0,7	0	0	0,7	1	0,7	0,7	0,3	0,3	1	1	
Eisen	0,3	0	0,3	0	0	0,3	1	0,7	0,3	0,3	0	0,7	0,7	
Gallium	0	1	1	0	0	0,7	1	0,7	0,3	0,7	1	0,7	1	
Germanium	1	1	0,7	0	0	0,3	1	0,7	0,7	0,7	1	0,7	1	
Hafnium	0	1	0,7	0	0	1	1	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	1	
Indium	1	1	0,7	0	0	0,3	1	0,7	0,3	0,7	1	1	1	
Kupfer	0,7	0,3	0,3	0	0	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	1	
Lithium	0	0	1	0	0	1	1	0,3	0,3	0,7	0,3	0,7	0,7	
Magnesium	0	0,3	0,3	0	0	0,7	1	0,7	0,7	0,3	0,3	0,7	0,7	
Mangan	0,7	0	0,3	0	0	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3	0	1	1	
Molybdän	0,7	0	0,7	0	0	0,7	1	0,7	0,3	0,3	0	0,7	1	
Nickel	0,7	0,3	0,3	0	0	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1	1	
Niob	0,3	0,3	0,7	0	0	0,7	1	0,7	0,3	1	0	0,7	1	

Rohstoff / Element	Geologische, technische und strukturelle Indikatoren					Geopolitische und regulatorische Indikatoren					Ökonomische Indikatoren		
	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Grad der Koppelproduktion/ Nebenproduktion	Verbreitungsgrad funktionaler EoL-Recyclingtechnologien	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/ Anbaugebiete	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	Politisches Länderrisiko	Regulatorisches Länderrisiko	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	Grad der Nachfragersteigerung	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	Annualisierte Preisvolatilität
Palladium	0	0,7	0,7	0	0	1	1	0,7	0,7	0,7	0,3	0,7	1
Platin	0	0,3	0,7	0	0	1	1	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Rhenium	0,7	1	0,7	0	0	0,7	1	0,3	0	0,7	0,7	0,7	-
Selen	0,7	1	0,7	0	0	0,3	1	0,3	0	0,3	0	0,7	1
Silber	1	0,7	0,3	0	0	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,7	1
Silicium	0	0	0,7	0	0	0,3	1	0,7	0,7	0,3	0	0,7	0,7
Strontium	1	0	0,3	0	0	1	1	0,3	0,3	0,7	0	0,7	-
Tantal	0,3	0,3	0,7	0	0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	1
Tellur	0,7	1	0,7	0	0	0,3	1	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	1
Titan	0	0	0,3	0	0	0,7	1	0,7	0,7	0,3	0	0,3	1
Vanadium	0	1	0,7	0	0	1	1	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3	1
Wolfram	0,7	0	0,3	0	0	0,7	1	0,7	0,7	0,7	0,3	0,7	1
Zink	1	0,3	0,7	0	0	0,3	1	0,7	0,3	0,3	0	1	1
Zinn	1	0	0,7	0	0	0,7	1	0,7	0,7	0,3	0,3	0,7	1

7 Literaturverzeichnis

[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>)

[Öko-Institut 2015] Buchert, M. / Schüler, D. / Prakash, S. u.a.: Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen - 2. Zwischenbericht. Darmstadt, Freiburg, Berlin 2015.

[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. (http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf)

[VDI 4800 2016] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Gründruck