

TEXTE

03/2019

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

Arbeitsbericht 5: Auswirkungen eines Substitutions-szenarios auf die Kritikalität der Rohstoffe in den betrachteten Umwelttechnologien

TEXTE 03/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 93 316 0
UBA-FB 002705/ANH,5

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

Arbeitsbericht 5: Auswirkungen eines Substitutions-szenarios auf die
Kritikalität der Rohstoffe in den betrachteten 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, 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:

Juli 2017

Redaktion:

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

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

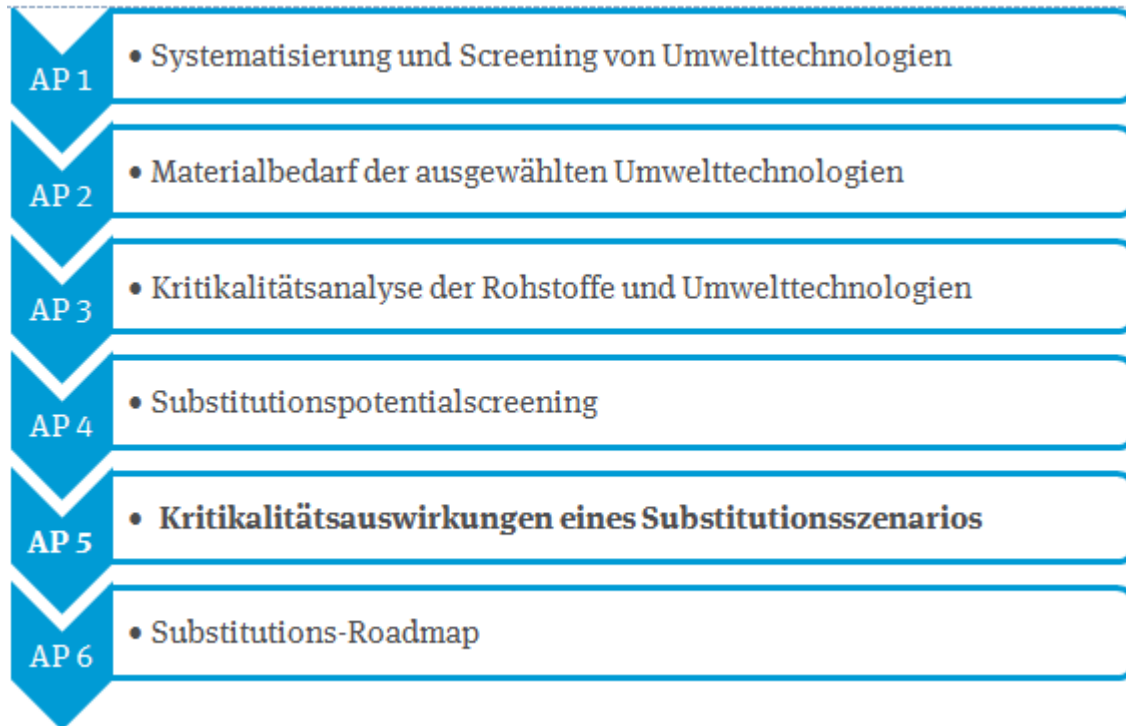
Dessau-Roßlau, Januar 2019

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

Einordnung des Arbeitsberichtes 5:

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 5 zeigt die Auswirkungen eines Substitutionsszenarios von 20 prioritär eingestuften Umwelttechnologien auf die Kritikalität der Rohstoffe auf das Green-Economy-Szenario auf. Hierzu wird ein Substitutionsszenario hinsichtlich der möglichen Marktdurchdringung der Substitutionsmöglichkeiten definiert. Weiterhin werden die Rohstoffbedarfe je Umwelttechnologie im Substitutionsszenario ermittelt und ausgewiesen. Ebenso wird der Rohstoffbedarf des Green-Economy-Szenarios mit dem des Substitutionsszenarios verglichen.

Anmerkung: Der Arbeitsbericht stellt den aktuellen Stand zur Abgabe des Berichtes (Juli 2017) dar.

Übersicht der Umwelttechnologien*

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

UT Nr.	UT Name
107	Synchron-Generatoren
108	Asynchron-Generatoren in WKA
110	Reluktanzgeneratoren
111	HTS-Generatoren

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis.....	15
1 Ziele des 5. Arbeitspakets.....	16
2 Methodik.....	18
3 Kritikalitätsauswirkungen des Substitutionsszenarios der 20 relevanten Umwelttechnologien.....	19
3.1 Nicht in Substitutionsszenario betrachtete Umwelttechnologien.....	19
3.2 RFID (UT Nr. 5).....	19
3.2.1 Substitutionsszenario.....	20
3.2.2 Rohstoffbedarfe	20
3.3 Membranelektrolyse (UT Nr. 13).....	21
3.3.1 Substitutionsszenario.....	21
3.3.2 Rohstoffbedarfe	22
3.4 Weiße LED Leuchtmittel (UT Nr. 27)	22
3.4.1 Substitutionsszenario.....	22
3.4.2 Rohstoffbedarfe	23
3.5 Hybridmotoren (UT Nr. 37).....	24
3.5.1 Substitutionsszenario.....	24
3.5.2 Rohstoffbedarfe	25
3.6 Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38).....	25
3.6.1 Substitutionsszenario.....	26
3.6.2 Rohstoffbedarfe	27
3.7 Fahrzeug-Abgas-Katalysator (UT Nr. 43)	28
3.7.1 Substitutionsszenario.....	28
3.7.2 Rohstoffbedarfe	29
3.8 Bleifreie Lote (UT Nr. 56).....	29
3.8.1 Substitutionsszenario.....	30
3.8.2 Rohstoffbedarfe	30
3.9 Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie (UT Nr. 60)	31
3.9.1 Substitutionsszenario.....	31
3.9.2 Rohstoffbedarfe	31
3.10 Dünnschicht-PV (UT Nr. 87)	32
3.10.1 Substitutionsszenario.....	32
3.10.2 Rohstoffbedarfe	33

3.11	Tandemzellen (UT Nr.90).....	33
3.11.1	Substitutionsszenario.....	33
3.11.2	Rohstoffbedarfe	34
3.12	CSP (UT Nr. 93)	34
3.12.1	Substitutionsszenario.....	34
3.12.2	Rohstoffbedarfe	34
3.13	Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen (UT Nr. 98)	35
3.13.1	Substitutionsszenario.....	35
3.13.2	Rohstoffbedarfe	36
3.14	Lithium-Ionen-Stromspeicher (UT Nr. 100)	36
3.14.1	Substitutionsszenario.....	36
3.14.2	Rohstoffbedarfe	37
3.15	Permanentmagnet-Generatoren (synchron) (UT Nr. 106)	38
3.15.1	Substitutionsszenario.....	38
3.15.2	Rohstoffbedarfe	38
4	Entwicklung der einzelnen Rohstoffbedarfe in den betrachteten Umwelttechnologien.....	40
4.1	Silber	40
4.2	Gold.....	41
4.3	Palladium.....	42
4.4	Platin	42
4.5	Rhodium	44
4.6	Dysprosium.....	45
4.7	Neodym.....	46
4.8	Praseodym.....	48
4.9	Terbium	50
4.10	Cer.....	52
4.11	Lithium.....	53
4.12	Zinn	53
4.13	Gallium	54
4.14	Indium	55
4.15	Titandioxid (TiO ₂).....	56
4.16	Magnesium	56
4.17	Silizium.....	57
4.18	Mangan.....	57
4.19	Kupfer.....	58

5	Kritikalitätsentwicklung.....	61
6	Fazit / Zusammenfassung.....	64
7	Anhang.....	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1:	Silberbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	40
Abbildung 4-2:	Silberbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	41
Abbildung 4-3:	Goldbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	41
Abbildung 4-4:	Palladiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	42
Abbildung 4-5:	Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	43
Abbildung 4-6:	Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	44
Abbildung 4-7:	Rhodiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	44
Abbildung 4-8:	Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	45
Abbildung 4-9:	Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	46
Abbildung 4-10:	Neodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	47
Abbildung 4-11:	Neodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	48
Abbildung 4-12:	Praseodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	49
Abbildung 4-13:	Praseodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	50
Abbildung 4-14:	Terbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	51
Abbildung 4-15:	Terbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	52
Abbildung 4-16:	Cerbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	53
Abbildung 4-17:	Lithiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	53
Abbildung 4-18:	Zinnbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	54
Abbildung 4-19:	Galliumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	54
Abbildung 4-20:	Galliumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	55

Abbildung 4-21:	Indiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	56
Abbildung 4-22:	TiO ₂ -Bedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	56
Abbildung 4-23:	Magnesiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	57
Abbildung 4-24:	Siliziumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	57
Abbildung 4-25:	Manganbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050	58
Abbildung 4-26:	Kupferbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025	59
Abbildung 4-27:	Kupferbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien nach Technologiegruppen.....	16
Tabelle 2:	Substitutionsszenario der UT Nr. 5 (RFID).....	20
Tabelle 3:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 5 (RFID) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)	21
Tabelle 4:	Substitutionsszenario der UT Nr. 13 (Membranelektrolyse)	21
Tabelle 5:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 13 (Membranelektrolyse) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	22
Tabelle 6:	Substitutionsszenario der UT Nr. 27 (Weiße LED Leuchtmittel).....	23
Tabelle 7:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 27 (Weiße LED Leuchtmittel) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	23
Tabelle 8:	Substitutionsszenario der UT Nr. 37 (Hybridmotoren).....	24
Tabelle 9:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 37 (Hybridmotoren) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	25
Tabelle 10:	Substitutionsszenario der UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotor) für BEV.....	26
Tabelle 11:	Substitutionsszenario der UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotor) für PHEV	27
Tabelle 12:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 38 (Elektromotoren: BEV und PHEV) Substitutions-szenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	27
Tabelle 13:	Substitutionsszenario der UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysator).....	28
Tabelle 14:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysator) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	29
Tabelle 15:	Substitutionsszenario der UT Nr. 56 (bleifreie Lote).....	30
Tabelle 16:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 56 (bleifreie Lote) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	30
Tabelle 17:	Substitutionsszenario der UT Nr. 60 (HL-Permanentmagnete in der Industrie).....	31
Tabelle 18:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 60 (HL-Permanentmagnete in der Industrie) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)	32
Tabelle 19:	Substitutionsszenario der UT Nr. 87 (Dünnschicht-PV).....	32
Tabelle 20:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 87 (Dünnschicht-PV) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	33
Tabelle 21:	Substitutionsszenario der UT Nr. 90 (Tandemzellen).....	33

Tabelle 22:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 90 (Tandemzellen) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	34
Tabelle 23:	Substitutionsszenario der UT Nr. 93 (CSP).....	34
Tabelle 24:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 93 (CSP) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)	35
Tabelle 25:	Substitutionsszenario der UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen).....	35
Tabelle 26:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t).....	36
Tabelle 27:	Substitutionsszenario der UT Nr. 100 (Lithium-Ionen-Stromspeicher).....	37
Tabelle 28:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 100 (Lithium-Ionen-Stromspeicher) Substitutions-szenario versus ursprünglicher Technologie in Green- Economy (in t).....	37
Tabelle 29:	Substitutionsszenario der UT Nr. 106 (Permanentmagnet- Generatoren, synchron).....	38
Tabelle 30:	Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 106 (Permanentmagnet- Generatoren, synchron) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t).....	38
Tabelle 31:	Gesamtscore Substitutionsszenario versus Green-Economy-Szenario.....	62
Tabelle 32:	Absolute und prozentuale Veränderung der Kritikalität der einzelnen Rohstoffe im Substitutionsszenario versus Green-Economy-Szenario	63

Abkürzungsverzeichnis

Ag	Silber
ASM	Asynchronmotor
Au	Gold
BEV	Battery Electric Vehicle (vollelektrisches Elektrofahrzeug)
Ce	Cer
Co	Kobalt
CSP	Concentrated Solar Power Kraftwerke
Cu	Kupfer
Dy	Dysprosium
Fe	Eisen
Ga	Gallium
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybrid-Elektrofahrzeug)
HTS	Hochtemperatur-Supraleiter
In	Indium
Li	Lithium
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Nd	Neodym
OLED	Organic Light Emitting Diode
Pd	Palladium
PHEV	Plugin-Hybrid-Elektrofahrzeug
Pr	Praseodym
Pt	Platin
RFID	Radio Frequency Identification
Rh	Rhodium
Si	Silizium
Sn	Zinn
Tb	Terbium
TiO₂	Titandioxid
UT	Umwelttechnologie

1 Ziele des 5. Arbeitspakets

Ziel des 5. Arbeitspakets „Kritikalitätsauswirkungen“ ist es, die Auswirkungen eines veränderten Substitutionsszenarios auf die Kritikalität der Rohstoffe im Vergleich zum Green-Economy-Szenario zu ermitteln. Hierfür wurde zunächst ein Substitutionsszenario abgestimmt, in dem die 20 in AP 4 ausgewählten Umwelttechnologien hinsichtlich ihrer Substitutionsmöglichkeiten analysiert wurden. Die 20 betrachteten Umwelttechnologien sind in folgender Tabelle nach Technologiegruppen dargestellt.

Tabelle 1: Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien nach Technologiegruppen

UT Nr.	UT Name
Elektronik	
24	Grüne Rechenzentren
56	Bleifreie Lote
Katalysatoren	
43	Fahrzeug-Abgas-Katalysator
53	Industriekatalysatoren
Permanentmagnete	
35	Pedelecs (Motor und Batterie)
37	Hybridmotoren (HEV)
38	Elektroantriebsmotoren (BEV und PHEV)
60	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen
106	Permanentmagnet-Generator (synchron) - High-Speed (Windkraft)
Generatoren ohne Permanentmagnete	
107	Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen
108	Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen
Speichertechnologien	
98	Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge
100	Lithium-Ionen-Stromspeicher
Solartechnologien	
87	Dünnschicht-Solarzellen
90	Tandemzellen
93	CSP-Technologie
Sonstige Technologien	
5	RFID
13b	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehr Kathode
27	weiße LED
83	Kraftwerke – GuD/Gas

Anschließend wurden die Rohstoffbedarfe für das Substitutionsszenario mit denen des Green-Economy-Szenarios verglichen und die Auswirkungen auf die Kritikalität der Rohstoffe betrachtet.

Als Ergebnis von AP 5 wird ein übergeordneter Score bezüglich der Kritikalität der Rohstoffe in dem Substitutionsszenario dargestellt und mit dem Green-Economy-Szenario verglichen.

In Kapitel 2 wird kurz die Methodik erläutert, wie in diesem Arbeitspakt 5 „Kritikalitätsauswirkungen“ vorgegangen wurde. In Kapitel 3 werden die untersuchten Umwelttechnologien mit ihren Substitutionsmöglichkeiten und den dazugehörigen Rohstoffbedarfen einzeln beschrieben. Kapitel 4 setzt die „Rohstoffbrille“ auf und zeigt die Entwicklung der einzelnen Rohstoffbedarfe in den einzelnen Umwelttechnologien und den beiden Szenarien (Green-Economy und Substitution).

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse des Gesamtscores der Kritikalität des Green-Economy-Szenarios und des Substitutionsszenarios dargestellt. Die Herangehensweise zur Berechnung des Gesamtscores wird in Kapitel 2 erläutert.

Kapitel 6 gibt abschließend eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Kritikalitätsauswirkungen im Substitutionsszenario im Überblick.

In diesem Bericht wird auf die Beschreibung der einzelnen Umwelttechnologien und potentiellen Substitutionsmöglichkeiten verzichtet. Diese sind ausführlich im 2. und 4. Zwischenbericht dargelegt.

2 Methodik

Zur Analyse der Kritikalitätsauswirkung eines Substitutionsszenarios wurde in einem mehrstufigen Prozess vorgegangen. Zunächst wurde das Substitutionsszenario gemeinsam mit dem Auftraggeber abgestimmt. In diesem Szenario sind Annahmen getroffen, wie hoch der Anteil der jeweiligen als zukünftig realisierbar eingeschätzten Substitutionstechnologien in einem Substitutionsszenario ausfallen könnte. Darauf aufbauend wurde ermittelt wie sich dies auf die Rohstoffbedarfe der einzelnen Technologien auswirkt. Hierzu werden die globalen Bedarfe der Umwelttechnologie im Substitutionsszenario mit den Bedarfen der ursprünglichen Technologien im globalen Green-Economy-Szenario 2025 und 2050 verglichen. Mit diesem Schritt wird deutlich, welche globalen Potentiale zur Rohstoffeinsparung 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 nutzt hier eine Rangbildung nur wenig, da ein Gesamtscore vor allem die Änderung der Massen der einzelnen kritischen Rohstoffe abbilden muss. Ziel war es nun, eine Aggregation der drei Indikatoren über alle Rohstoffe durchzuführen, um einen Gesamtscore für das gesamte Szenario der Umwelttechnologien bzw. deren Rohstoffbedarf zu erhalten.

In einem ersten Versuch wurde eine Normierung der einzelnen Indikatoren für jeden Rohstoff vorgenommen und diese addiert. Hier wurden alle Werte der einzelnen Rohstoffe geteilt durch den Wert des Rohstoffs mit dem höchsten Wert. Anschließend wurde dies mit der Masse multipliziert, da dies den Hauptunterschied zwischen den beiden Szenarien ausmacht. Da hier die Ränge der einzelnen Rohstoffe im Gegensatz zur vorherigen Bewertung in AP 3 sehr verzerrt wurden - nur noch die Masse spielte eine Rolle - wurde dies verworfen. Das gleiche Ergebnis wurde bei der Multiplikation statt der Addition der Faktoren erhalten. Die normierte Summe zeigt deutlich weniger Abweichungen zu AP 3, hat aber dennoch vereinzelt deutliche Verschiebungen (z. B. steigt Gold von Platz 15 auf Platz 8). Das Produkt der drei Indikatoren, ohne Mitbetrachtung der Masse (diese ist im Indikator „strategische Bedeutung“ in Bezug auf die Primärproduktion bereits enthalten), hat nur kleinere Rangverschiebungen zur Folge, weshalb diese dritte Aggregationsmethode weiterverfolgt wurde.

Da der Gesamtscore mit normierten Werten sehr klein ist, wurde die Aggregation durch Multiplikation ohne vorherige Normierung durchgeführt. Dies wurde 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:

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

Der Gesamtscore des Green-Economy-Szenarios und des Substitutionsszenarios wird in Kapitel 5 dargestellt.

3 Kritikalitätsauswirkungen des Substitutionsszenarios der 20 ten Umwelttechnologien

In diesem Kapitel werden die Kritikalitätsauswirkungen der 20 relevanten Umwelttechnologien vorgestellt.

Aus den 20 ausgewählten Umwelttechnologien wurden 6 Technologien nicht weiter in der tätsauswirkung betrachtet. Eine kurze Begründung, warum diese 6 Technologien nicht weiter im stitutionsszenario betrachtet wurden, gibt Kapitel 3.1.

3.1 Nicht in Substitutionsszenario betrachtete Umwelttechnologien

Folgende Umwelttechnologien wurden nicht weiter im Substitutionsszenario betrachtet:

Grüne Rechenzentren (UT Nr. 24): Für die in Rechenzentren eingesetzten Prozessoren und Speichertypen wird mittelfristig kein technisches Substitutionspotential erwartet. Die für Hochleistungscomputer verwendete siliziumbasierte Mikroelektronik unterliegt gleichwohl einem stetigen Innovationsprozess. Dadurch können sich zukünftig technologische Veränderungen der Mikroelektronik ergeben, welche auch den Bedarf an einzelnen Rohstoffen beeinflussen. Allerdings sind diese Veränderungen aus heutiger Sicht nicht hinreichend vorhersehbar. Radikale technologische Innovationen (z. B. Quantenelektronik, Photonik), die bis 2050 in Rechenzentren zum Einsatz kommen könnten, sind gegenwärtig noch im Laborstadium und werden deshalb in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Industriekatalysatoren (UT Nr. 53): 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 des Szenarios haben.

Pedelec-Motoren (UT Nr. 35 – nur Motoren): Pedelec-Motoren besitzen besonders die Anforderung, möglichst leicht und kompakt gebaut zu sein. Somit werden die Motoren eingesetzt, die die höchste Effizienz aufweisen. Dies ist aus heutiger Sicht nur mit einem NdFeB-Permanentmagnet-Motor zu erreichen. Die Experten des Fachgesprächs (Oktober 2016) haben dieser Einschätzung zugestimmt.

Synchron-/Asynchron-Generatoren WKA (UT Nr. 107/108): 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 WKA 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.

Kraftwerke GuD/Gas (UT Nr. 83): 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.

3.2 RFID (UT Nr. 5)

Die RFID-Technologie wurde im Green-Economy-Szenario als Hilfsmittel zur effizienteren tierung im Recyclingprozess für Verpackungsmaterialien identifiziert. Die in diesem Kontext wendbaren RFID Systeme bestehen aus passiven Transpondern (sogenannten „Smart Labels“) sowie

einem aktiven Lesegerät, welches vom Transponder berührungslos Daten auslesen kann. Diese Smart Labels enthalten neben dem eigentlichen Mikrochip (Silizium) auch noch eine Antenne mit giespezifischer Form und Materialzusammensetzung. Die zur Verpackungskennzeichnung geeigneten Transponder bestehen typischerweise aus Kupfer, Silber oder Aluminium. Als relevante Rohstoffe wurden Kupfer und Silber identifiziert. Substitutionsmöglichkeiten für diese Materialien bestehen in folgenden Technologien:

- ▶ Abfallvermeidung
- ▶ Abfallsortierung mit Hilfe von optischen Sensoren und IT-Systemen
- ▶ RFID-Transponder mit Aluminium-basierten Antennen

Während die beiden erstgenannten Substitutionsmöglichkeiten gänzlich ohne RFID-Technologie auskommen bedingen diese Alternativen jedoch systemübergreifende technische und logistische Veränderungen im gesamten Recyclingprozess. Es wird deshalb im Rahmen dieser Studie nur die dritte Substitutionsmöglichkeit berücksichtigt. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass die Nutzung von aluminium-basierten RFID-Transpondern im Anwendungskontext prinzipiell technisch machbar und ökonomisch sinnvoll ist. Die Nutzung von Silizium-basierten Mikrochips als zentrale Komponente des RFID-Transponders bleibt unverändert.

3.2.1 Substitutionsszenario

Das Substitutionsszenario für RFID zur Abfallsortierung wurde angenommen und mit dem Auftraggeber abgestimmt wie in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 2: Substitutionsszenario der UT Nr. 5 (RFID)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Aluminium-basierte Antennen	96 %	100 %
Gesamt	96 %	100 %

Die Substitutionsmöglichkeiten für RFID zur Abfallsortierung sind neben der Vermeidung von Abfällen (dies erfordert die Umsetzung von politischen und technischen Maßnahmen) hauptsächlich die Nutzung computergesteuerter Verfahrenstechniken zur Materialerkennung im Sortierprozess. Diese Substitutionsmöglichkeiten funktionieren gänzlich ohne RFID Transponder. Allerdings könnte die Nutzung von Aluminium-basierten RFID-Transpondern in einzelnen Marktsegmenten dennoch sinnvoll sein, z. B. zur Identifikation und Abtrennung bestimmter wertstoffhaltiger Abfälle, die anders nicht erfasst werden können. Diese Möglichkeit wird im Substitutionsszenario als Übergangstechnologie betrachtet und wird langfristig wahrscheinlich wieder an Bedeutung verlieren.

3.2.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 3: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 5 (RFID) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Kupfer	180	0	4.500	4.500
Silber	80	0	2.000	2.000
Nickel	20	20	20	20
Silizium	100	100	100	100

Die Nutzung von RFID-Transpondern zur Kennzeichnung von Verpackungen zur Ermöglichung einer automatisierten Abfallsortierung würde im Green-Economy-Szenario zu einem erheblichen Rohstoffbedarf beitragen, insbesondere für Kupfer und Silber. Diese Metalle wären aufgrund ihrer geringen Menge pro Transponder auch schwierig rezyklierbar, weil diese Metalle wiederum von den eigentlich zu rezyklierenden Kunststoffen abgetrennt werden müssten. Im Substitutionsszenario werden diese Metalle deshalb durch Aluminium substituiert, welches in dieser Form ebenfalls schlecht rezyklierbar ist, aber eine geringere Rohstoffkritikalität aufweist. Nickel und Silizium sind von dieser Substitution nicht betroffen, weil davon ausgegangen wird, dass die für diesen Anwendungszweck nutzbaren RFID Chips weiterhin aus Silizium bestehen werden. Es wird angenommen, dass bis 2025 eine teilweise und bis 2050 eine vollständige (100 %) Substitution erreichbar ist.

3.3 Membranelektrolyse (UT Nr. 13)

Die Nutzung von Sauerstoffverzehrkathoden (SVK) für die Chlor-Alkali-Elektrolyse ist eine Umwelttechnologie, weil sie gegenüber den bisher industriell genutzten Membranverfahren 30 % der elektrischen Energie einspart. Sauerstoffverzehrkathoden bestehen aus Verbundmaterialien mit silberbasierten Katalysatoren sowie 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 %. Die Nutzung von SVK hat kaum eine Dissipation der verwendeten Metalle zur Folge, so dass auch kein relevanter Ressourcenverbrauch eintritt, sondern lediglich eine temporäre „Ressourcenfixierung“.

Substitutionsmöglichkeiten bestehen in folgenden Technologien:

- ▶ Deacon-Verfahren
- ▶ Substitution der Chlorchemie

3.3.1 Substitutionsszenario

Das Substitutionsszenario für die Membranelektrolyse wurde angenommen und mit dem Auftraggeber abgestimmt wie in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 4: Substitutionsszenario der UT Nr. 13 (Membranelektrolyse)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Deacon-Verfahren	5 %	5 %
Substitution der Chlorchemie	10 %	30 %
Gesamt	15 %	35 %

Beim Deacon-Verfahren erfolgt eine Umsetzung von Salzsäure mit Sauerstoff zu Chlor und Wasser. Nach dem gegenwärtigen Stand der Technik wird Rutheniumdioxid (RuO_2) als Katalysator eingesetzt, welches auf einem Träger aus Titandioxid (TiO_2) aufgebracht ist. Allerdings kann das Deacon-Verfahren kein nennenswerter gesamtökonomischer Ersatz für die Chlor-Alkali-Elektrolyse sein, weil die

Herstellung des Edukts Salzsäure im industriellen Maßstab nur so möglich ist. Die zweite Alternative, Substitution der Chlorchemie, ist als langfristiger technisch-ökonomischer Transformationsprozess nur durch Substitution der Produkte der Chlorchemie sowie der davon abhängenden Kuppelprodukte möglich.

3.3.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 5: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 13 (Membranelektrolyse) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Nickel	387	913	455	1.404
Silber	1.102	2.597	1.296	3.996

Die Rohstoffbedarfe für Nickel sind im Green-Economy-Szenario eher moderat, während es bei Silber bis 2050 zu einem erheblichen Rohstoffbedarf kommt. Gemessen an der Rohstoffproduktion von mähem Silber in 2015 würde der Rohstoffbedarf für die Chlor-Alkali-Elektrolyse mittels zehrkathode in 2050 bei etwa 15 % der gegenwärtigen weltweiten Produktionsmengen liegen¹. Die genannten Substitutionsalternativen könnten dazu beitragen, den Silber- und Nickelbedarf in 2050 um etwa 40 % zu reduzieren.

3.4 Weiße LED Leuchtmittel (UT Nr. 27)

Die Nutzung von weißen LED Leuchtmitteln ist eine Umwelttechnologie im Sinne des Green-Economy-Szenarios, weil sie die bisher verwendeten quecksilberhaltigen Energiesparlampen (Fluoreszenzlampen) bzw. die technologisch veralteten Glühfadenlampen ablösen. Der Betrachtungsrahmen dieser Studie liegt jedoch nicht auf dem Materialinventar einer einzelnen wLED sondern auf dem Gesamtsystem (inklusive integrierter Vorschalt elektronik & Kühlkörper). Die Materialzusammensetzung dieser Leuchtmittel umfasst deshalb nicht nur die Halbleiter und Phosphor zur Lumineszenzkonversion, sondern auch Gehäusematerialien und Elektronikkomponenten. Diese Komplettgeräte bestehen neben den Kunststoffkomponenten typischerweise aus Aluminium, Kupfer und Silber sowie einer Reihe weiterer Substanzen. Als relevanteste Rohstoffe wurden Kupfer und Silber identifiziert.

Substitutionsmöglichkeiten für weiße LED Leuchtmittel bestehen in folgenden Technologien:

- ▶ Glasbasierte wOLED Leuchtmittel
- ▶ Phosphor aus cadmiumfreien Quantum-Dot in herkömmlichen wLED Leuchtmitteln

3.4.1 Substitutionsszenario

Das Substitutionsszenario für wLED Leuchtmittel wurde angenommen und mit dem Auftraggeber abgestimmt wie in folgender Tabelle dargestellt:

¹ USGS (2016): Mineral Commodity Summaries 2016 –Silver, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/mcs-2016-silve.pdf>

Tabelle 6: Substitutionsszenario der UT Nr. 27 (Weiße LED Leuchtmittel)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
wOLED (glasbasiert)	10 %	60 %
Cadmiumfreie Quantum-Dots	50 %	30 %
Gesamt	60 %	90 %

Die Nutzung der Zukunftstechnologie wOLED für Beleuchtungszwecke erfordert aufgrund ihrer flächigen Beschaffenheit komplett neu designte Leuchtkörper (Luminaire). Es wird deshalb von einer eher langsamen Marktdiffusion ausgegangen. Hingegen ist der Einsatz von cadmiumfreien Quantum-Dots in herkömmlichen wLED Leuchtmitteln ohne weitere technische Änderung der Luminaire möglich und deshalb kurzfristig marktreif. Im Substitutionsszenario wird diese Technologie deshalb als mittelfristige Übergangstechnologie betrachtet, bevor sie zugunsten der wOLED wieder abnimmt. Langfristig ist zu erwarten, dass punktförmige (wLED) und flächige (wOLED) Beleuchtungsquellen koexistieren werden und je nach Einsatzgebiet Strahler bzw. diffuse Beleuchtung gewählt werden.

3.4.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 7: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 27 (Weiße LED Leuchtmittel) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Kupfer	130.200	140.000	130.200	140.000
Zinn	5.487	5.900	5.487	5.900
Silber	3.534	3.800	3.534	3.800
Nickel	512	550	512	550
Gallium	163	78	181	195
Yttrium	71	19	179	192
Indium	163	184	162	174
Gold	25	12	28	30
Cer	4	1	11	12
Gadolinium	3	1	8,4	9,0
Platin/Iridium	47	50	47	50
Europium	1	0	3,3	3,6

Im Green-Economy-Szenario resultiert der höchste Rohstoffbedarf für Kupfer, Zinn, Silber und Nickel aus den in den Leuchtmitteln integrierten elektronischen Komponenten der Ansteuerelektronik. Diese Komponenten werden von den im Substitutionsszenario betrachteten technischen Alternativen nicht wesentlich verändert (Zwar ist davon auszugehen, dass wOLEDs mit einer anderen Steuerelektronik betrieben werden als wLEDs, aber die Notwendigkeit zur Umwandlung von 230 V Netzspannung in Niedervolt-Gleichspannung bleibt bestehen). Daher bleibt auch der Rohstoffbedarf für diese Metalle unverändert. Bei der Nutzung von wOLEDs entfallen die Halbleitermaterialien und REE-Oxide für

Phosphore. Bei Indium hingegen ist durch wOLEDs sogar eine Zunahme des Rohstoffbedarfs möglich, falls es nicht gelingt die transparenten ITO Elektroden innerhalb der OLEDs durch Indium-freie Materialien zu substituieren. Bei der Nutzung von cadmiumfreien Quantum-Dots für wLEDs ändert sich lediglich die Beschaffenheit der Phosphorschicht, so dass hierdurch ausschließlich REE-Oxide (Yttrium, Cer, Gadolinium, Europium) in der Phosphorschicht eingespart werden.

3.5 Hybridmotoren (UT Nr. 37)

Die Elektromotoren in Hybridfahrzeugen sind in ihrer ursprünglichen Technologie als NdFeB-Permanentmagnete in die Szenarienberechnung eingegangen. Als relevante Rohstoffe wurden die Seltenen Erden (Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym), Gallium und Kupfer identifiziert.

Substitutionsmöglichkeiten bestehen in folgenden Technologien:

- ▶ Asynchronmotor (ASM)
- ▶ Asynchronmotor mit hoher Drehzahl (ASM mit hohen rpm)
- ▶ Externally / Electrically excited synchronous Motor (EESM)
- ▶ Switched reluctance motor (SRM)
- ▶ Reduzierter Seltene Erden-Gehalt
- ▶ Sonstige Permanentmagnete (z. B. Ferritmagnete)

3.5.1 Substitutionsszenario

Im folgenden Schritt wurde abgeschätzt, welche Substitutionsalternative die Ursprungstechnologie im Green-Economy-Szenario substituieren könnte. Das Substitutionsszenario für die Elektromotoren in Hybridfahrzeugen wurde angenommen wie in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 8: Substitutionsszenario der UT Nr. 37 (Hybridmotoren)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
ASM	5 %	15 %
ASM mit hohen rpm	0 %	5 %
EESM	0 %	5 %
Sonstige PM-Magnete	0 %	5 %
SRM	0 %	5 %
Reduzierter SEE-Gehalt	50 %	50 %
Gesamt	55 %	85 %

Ein mögliches Szenario mit Substitutionsmöglichkeiten zeigt, dass in 2025 im Vergleich zum Green-Economy-Szenario 55 % der Ursprungstechnologie durch andere Technologien ersetzt werden können. In 2050 beläuft sich das Potential auf 85 %.

Die Einschätzungen basieren auf folgenden Annahmen:

- ▶ Der ASM befindet sich heute bereits im Pilotstadium für HEV. Da dieser Motorentyp im BEV heute schon im Einsatz ist (z. B. Tesla), wird hier die höchste Durchdringung im Vergleich zu den anderen SEE-freien Motoren im Pilotstadium angenommen. Im HEV ist sowohl ein konventioneller wie auch ein E-Motor eingebaut. Daher ist hier der Raumbedarf der Motoren von besonderer Bedeutung. Für das Substitutionspotential in 2050 werden 15 % angenommen.
- ▶ Es zeichnet sich bereits heute ab, dass es wahrscheinlich einen Mix an verschiedenen Motorentypen in 2050 geben wird. Die Motorentypen ASM mit hohen rpm, EESM, SRM und sonstige PM-Magnete sind aufgrund ihrer geringeren Leistung und dem gleichzeitigen Bedarf

an E-Motor und Verbrennungsmotor mit einem kleinen Marktanteil (jeweils 5 % in 2050) in das Substitutionsszenario eingegangen.

- Der reduzierte SEE-Gehalt ohne schwere SEE ist bereits im Markt vertreten (z. B. Honda). In 2025 und 2050 wird angenommen, dass jedes zweite HEV mit diesem Motor ausgestattet ist, da eine hohe Leistungsdichte im E-Motor mit SEE-Permanentmagnet gegeben ist. Es wird daher angenommen, dass die Mehrzahl der HEV auch in 2050 mit NdFeB-Permanentmagnet-Motoren ausgestattet sein wird (die Mehrzahl davon mit reduziertem SEE-Gehalt).

3.5.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 9: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 37 (Hybridmotoren) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	476	232	1.057	1.548
Gallium	9	9	9	13
Kupfer	155.413	284.012	148.012	216.721
Neodym	4.068	3.456	4.017	5.882
Praseodym	1.070	909	1.057	1.548
Terbium	95	46	211	310

In den Bedarfen der obigen Tabelle wird ersichtlich, dass mit Ausnahme von Kupfer die Bedarfe an relevanten Rohstoffen im Substitutionsszenario für HEV sinken. In 2050 ist ein deutlich niedrigerer Bedarf im Substitutionsszenario im Vergleich zum Green-Economy-Szenario bei den schweren Seltenen Erden Dysprosium (-85 %) und Terbium (-85 %) sowie bei den leichten Seltenen Erden Neodym (-41 %) und Praseodym (-41 %) und auch bei Gallium (-35 %) zu erreichen. Die deutliche Reduzierung der schweren Seltenen Erden (Dy, Tb) begründet sich zum einen in den technologischen Substitutionen der Motoren ohne SEE-Permanentmagnete (ASM, EESM, Sonstige PM-Magnete), die keinerlei Seltene Erden benötigen. Zum anderen wird in der Alternative der Motoren mit reduziertem SEE-Gehalt vollständig auf schwere Seltene Erden verzichtet. Somit können die Bedarfe der kritischen Seltenen Erden durch den Einsatz von Substitutionsalternativen deutlich reduziert werden.

Der Kupferbedarf steigt in 2050 um ca. 30 %. Dies ist auf die Substitutionstechnologien ohne Seltene Erden zurückzuführen, die aufgrund der niedrigeren Effizienz und Leistungsdichte einen erhöhten Bauraumbedarf und somit erhöhten Kupferbedarf aufweisen. Da die HEV sowohl einen Verbrennungsmotor als auch einen Elektromotor benötigen, ist hier der Bedarf nach kompakten SEE-Permanentmagnet-Motoren größer. Daher wird die Marktdurchdringung mit Substitutionsalternativen ohne Seltene Erden geringer eingeschätzt als bei den BEV.

3.6 Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38)

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

Die Elektroantriebsmotoren in BEV und PHEV sind in ihrer ursprünglichen Technologie als NdFeB-Permanentmagnete in die Szenarienberechnung eingegangen. Als relevante Rohstoffe wurden die

Seltenen Erden (Dysprosium, Terbium, Neodym, Praseodym), Gallium und Kupfer identifiziert. Substitutionsmöglichkeiten bestehen in folgenden Technologien:

- ▶ Asynchronmotor (ASM)
- ▶ Asynchronmotor mit hoher Drehzahl (ASM mit hohen rpm)
- ▶ Externally / Electrically excited synchronous Motor (EESM)
- ▶ Switched reluctance motor (SRM)
- ▶ Reduzierter Seltene Erden-Gehalt
- ▶ Sonstige Permanentmagnete (z. B. Ferritmagnete)

3.6.1 Substitutionsszenario

Im folgenden Schritt wurde abgeschätzt, welche Substitutionsalternative die Ursprungstechnologie substituieren könnte. Das Substitutionsszenario für die Elektroantriebsmotoren in BEV und PHEV unterscheidet sich, da in den PHEV die kompakte Bauform von größerer Bedeutung ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass in einem PHEV sowohl ein konventioneller Verbrennungsmotor als auch ein Elektroantriebsmotor verbaut sind. Die beiden Substitutionsszenarien sind in den folgenden Tabellen dargestellt:

Tabelle 10: Substitutionsszenario der UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotor) für BEV

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
ASM	10 %	15 %
ASM mit hohen rpm	0 %	5 %
EESM	10 %	20 %
Sonstige PM-Magnete	0 %	5 %
SRM	0 %	5 %
Reduzierter SEE-Gehalt	50 %	35 %
Gesamt	70 %	85 %

Die Einschätzungen zu den BEV basieren auf folgenden Annahmen:

- ▶ Der ASM ist bereits heute im Markt verbreitet (Tesla S). Daher wird der Einsatz der Technologie in 2025 mit 10 % und 2050 mit 15 % angenommen.
- ▶ Der 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.
- ▶ Es zeichnet sich bereits heute ab, dass es wahrscheinlich einen Mix an verschiedenen Motorentypen in 2050 geben wird. Die Motorentypen ASM mit hohen rpm, SRM und sonstige PM-Magnete befinden sich heute noch nicht im Markt und sind daher mit einem Markteintritt in 2050 mit 5 % eingegangen.
- ▶ Ein reduzierter SEE-Gehalt in BEV-E-Motoren ist bereits heute verbaut (BMW i3). Daher ist der Anteil in 2025 von 50 % und 2050 von 35 % angenommen. Im vollelektrischen Pkw ist kein weiterer konventioneller Motor verbaut, was mehr Bauraum für den Motor zulässt.

Daher ist der Marktanteil für die SEE-freie Motoren größer angenommen als bei den hybriden Motoren.

Das Substitutionsszenario für den PHEV wurde abweichend zum BEV wie folgt angenommen:

Tabelle 11: Substitutionsszenario der UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotor) für PHEV

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
ASM	5 %	15 %
ASM mit hohen rpm	0 %	5 %
EESM	0 %	5 %
Sonstige PM-Magnete	0 %	5 %
SRM	0 %	5 %
Reduzierter SEE-Gehalt	50 %	50 %
Gesamt	55 %	85 %

Die Einschätzungen zu den PHEV basieren auf folgenden Annahmen:

- ▶ Der ASM befindet sich heute im Pilotstadium. Es wird ein Marktanteil an PHEV in 2025 von 5 % angenommen und in 2050 von 15 %. Da dieser Motorentyp im BEV heute schon im Einsatz ist (Tesla), wird hier die höchste Durchdringung im Vergleich zu den anderen SEE-freien Motoren im Pilotstadium angenommen. Da in PHEV sowohl ein konventioneller wie auch ein E-Motor benötigt werden, ist hier der Raumbedarf der Motoren von besonderer Bedeutung.
- ▶ Es zeichnet sich bereits heute ab, dass es wahrscheinlich einen Mix an verschiedenen Motorentypen in 2050 geben wird. Die Motorentypen ASM mit hohen rpm, SRM und sonstige PM-Magnete befinden sich heute noch nicht im Markt und sind daher mit einem Markteintritt in 2050 mit 5 % in das Substitutionsszenario eingegangen.
- ▶ Der reduzierte SEE-Gehalt ohne schwere SEE ist bereits im Einsatz (Honda). Für 2025 und 2050 wird angenommen, dass jedes zweite PHEV mit diesem Motor ausgestattet ist. Im HEV 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 (die Mehrzahl davon mit reduziertem SEE-Gehalt).

3.6.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 12: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 38 (Elektromotoren: BEV und PHEV) Substitutions-szenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	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

Es wird deutlich, dass mit Ausnahme von Kupfer die Bedarfe an relevanten Rohstoffen im Substitutionsszenario im Vergleich zum Green-Economy-Szenario in 2025 und 2050 sinken. Die Seltenen Erden Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium weisen in 2050 mit über 60 % einen deutlich niedrigeren Bedarf im Substitutionsszenario auf. Auch der Galliumbedarf sinkt um fast die Hälfte. Dieser verminderte Bedarf geht zum einen auf Substitutionstechnologien zurück, die keine Permanentmagnete mit Seltenen Erden einsetzen, wie der ASM, EESM oder die sonstigen Permanentmagnete. Die SEE-Permanentmagnete mit reduziertem Seltenem Erden-Gehalt dämpfen ebenfalls den Bedarf nach Seltenen Erden deutlich (bis zu 50 % in 2050). Somit können die Bedarfe an kritischen Seltenen Erden durch den Einsatz von Substitutionsalternativen deutlich reduziert werden.

Der Kupferbedarf steigt in 2050 um ca. 50 %. Dies ist auf die Substitutionstechnologien ohne Seltene Erden zurückzuführen, die aufgrund der niedrigeren Effizienz und Leistungsdichte einen erhöhten Bauraumbedarf und somit erhöhten Kupferbedarf aufweisen.

3.7 Fahrzeug-Abgas-Katalysator (UT Nr. 43)

Die Umwelttechnologie der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren bildet die Abgasreinigung von Personenkraftwagen mittels Katalysator ab. Hierbei werden die schädlichen Komponenten des Abgases (Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x) sowie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)) in weniger schädliche bzw. unschädliche Verbindungen umgewandelt. Hierbei spielen die Metalle Platin, Palladium (Oxidation von HC), Rhodium (Reduktion von NO_x) und Cer (Speicher für NO_x) eine zentrale Rolle und sind die relevanten Rohstoffe dieser Technologie.

Substitutionsmöglichkeiten bestehen durch:

- ▶ Palladium wird durch das (aus Sicht der VDI 4800 Blatt 2) weniger kritische Platin ersetzt
- ▶ Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR (Selective Catalytic Reduction/Selektive Katalytische Reduktion)
- ▶ Zeolith-SCR
- ▶ Luftsteuerung

3.7.1 Substitutionsszenario

Im folgenden Schritt wurde abgeschätzt, welche Substitutionsalternative die Ursprungstechnologie substituieren könnte. Das Substitutionsszenario für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator wurde angenommen wie in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 13: Substitutionsszenario der UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysator)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Pt ersetzt Pd	15 %	30 %
Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR	5 %	10 %
Zeolith-SCR	5 %	10 %
Luftsteuerung	5 %	10 %
Gesamt	30 %	60 %

Die Einschätzungen zum Abgaskatalysator basieren auf folgenden Annahmen:

- ▶ Katalysatoren wurden ursprünglich mit Platin gebaut und deshalb kann Palladium wieder durch Platin ersetzt werden. Hierbei wird aber von einer moderaten Änderung ausgegangen, da der Preis von Platin immer noch höher ist als von Palladium, aber im Zuge der steigenden

Kritikalität des Palladiums ein Preisangleich angenommen wird. Dies führt zu 15 % Substitution für 2025 und zu 30 % Substitution für 2050.

- ▶ SCR sind eine Technologie, welche nur Dieselfahrzeuge betrifft. Aus diesem Grund wird nur von einer geringen Substitution von 5 % bzw. 10 % für 2025 bzw. 2050 ausgegangen.
- ▶ Die bessere Steuerung der Luftzufuhr für die Katalyse basiert auf einer besseren Messung der Abgasströme. Hier ist Potential vorhanden, aber die Implementierung wird langsam von staten gehen, weil die Preisentwicklung von Cer hier keine Impulse gibt. Aus diesem Grund wird von einer geringen Substitution von 5 % bzw. 10 % für 2025 bzw. 2050 ausgegangen.

3.7.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 14: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysator) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Palladium	261	208	307	297
Platin	176	215	130	126
Rhodium	35	33	35	34
Cer	7.588	7.269	7.665	7.417

Der Bedarf an Palladium sinkt so wie der Bedarf von Platin steigt. Prozentual hat dies aber größere Auswirkungen, da der Grundbedarf von Palladium größer ist als der von Platin. Aus diesem Grund entsprechen die 46 t (2025) bzw. 89 t (2050) eine Senkung von 15 % bzw. 30 % für Palladium, aber eine Steigerung von 35 % bzw. 71 % für Platin. Für Rhodium wird eine geringe Senkung von 2 % bzw. 3 % erreicht, was durch den geringen Substitutionsanteil und die geringe Substitutionsmenge in der Technologie erklärbar ist. Für Cer werden 77 t bzw. 148 t Einsparung erzielt, was allerdings einer geringen Einsparung von 1 % bzw. 2 % entspricht, da der Cer-Bedarf deutlich höher ist als der Bedarf an Edelmetallen. Da Elektromobilität als Substitution bereits in den ursprünglichen Szenarien enthalten ist, ist auch die damit verbundene Reduzierung an Edelmetallmengen bereits im Szenario enthalten und führt dazu, dass hier nur noch geringe Veränderungen durch Substitutionen erreicht werden können.

3.8 Bleifreie Lote (UT Nr. 56)

Bleifreie Lote dienen der Substitution bleihaltiger Lote und bestehen im Green-Economy-Szenario überwiegend aus Zinn/Silber Legierungen. Aus Kostengründen wird vor allem die Verringerung des Silberanteils angestrebt. Substitutionsmöglichkeiten für Silber in bleifreien Loten existieren durch den teilweisen Ersatz des Silbers mit anderen Legierungsbestandteilen, z. B. Kupfer und Nickel. Weiterhin kommen auch andere Verbindungstechnologien als Lote in Frage. Diese nutzen als Kontaktmaterial zwar z.T. ebenfalls Silber, aber wesentlich geringere Mengen als in Loten. Als potentielle Substitutionsmöglichkeiten wurden folgende Technologien identifiziert:

- ▶ Zinn-Bismut-Legierungen (z. B. 57Bi-42Sn-1Ag)
- ▶ Silber-Sintern
- ▶ Mikro-Reibrührschweißen
- ▶ Molekulare Elektronik

3.8.1 Substitutionsszenario

Das Substitutionsszenario für die bleifreien Lote wurde angenommen und mit dem Auftraggeber abgestimmt wie in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 15: Substitutionsszenario der UT Nr. 56 (bleifreie Lote)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Zinn-Bismut-Legierungen	5 %	5 %
Silber-Sintern	10 %	20 %
Mikro-Reibrührschweißen	5 %	10 %
Molekulare Elektronik	0 %	25 %
Gesamt	20 %	60 %

Ein mögliches Szenario mit Substitutionsmöglichkeiten zeigt, dass in 2025 im Vergleich zum Green-Economy-Szenario 20 % der Ursprungstechnologie durch andere Technologien (Zinn-Bismut-Legierungen, Silber-Sintern und Mikro-Reibrührschweißen) ersetzt werden können. In 2050 beläuft sich das Potential auf 60 %. Allerdings sind die technischen Eigenschaften der genannten Substitutionstechnologien gegenüber den bleihaltigen Loten und den bleifreien Loten mit Silberanteil für viele Anwendungsbereiche nicht völlig befriedigend. Verminderte thermische und mechanische Alterungsbeständigkeit könnten zu einem Anstieg der Defektrate bei gelöteten Produkten (v.a. Elektronikprodukte) und damit zu verfrühter Obsoleszenz beitragen. Langfristig werden Veränderungen im Bedarf nach bleifreien Loten weniger durch die Substitution von Legierungsbestandteilen als vielmehr durch technologische Innovation im Bereich der zu kontaktierenden Produkte (z. B. Übergang zu organischer Elektronik, Photonik) zu erwarten sein.

3.8.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 16: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 56 (bleifreie Lote) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Zinn	196.596	249.665	225.360	477.951
Silber	6.276	9.875	6.480	13.743
Kupfer	1.224	1.527	1.440	3.054
Zink	61	76	72	153

Bei allen hier betrachteten Rohstoffen können durch Einsatz der Substitutionstechnologien in der industriellen Fertigung Reduktionen bei deren Gesamtbedarf erzielt werden. Bei Zinn reduziert sich der Bedarf bis 2050 um knapp die Hälfte, da in der Substitutionsmöglichkeit Silber-Sintern und bei der molekularen Elektronik gar keine Lote mehr als Kontaktierungsmaterial eingesetzt werden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass sich der Bedarf für Zinn und Silber durch die Verwendung von Bismuthaltigen Lotlegierungen nur minimal reduzieren wird, weil deren Einsatzmöglichkeiten aus technischen Gründen limitiert sind. Das größte Substitutionspotential für alle in Lotlegierungen verwendeten Metalle würde sich durch die weite Verbreitung von Produkten der Polymerelektronik

ergeben. Diese technologische Innovation ist jedoch aus heutiger Sicht noch nicht hinreichend vorhersehbar, das damit weitgreifende Veränderungen im technischen Kontext und hinsichtlich der Funktionen einhergehen würden. Heute bekannte Polymerelektronik enthält zwar keine Lötverbindungen, aber dafür silber-basierte Dünnschicht-Leiterbahnen mit größerer flächiger Ausdehnung als heutige kupfer-basierte Leiterplatten. Dadurch könnte sich, zumindest bei Elektronikprodukten, der Silberverbrauch von den Lötstellen in die Leiterbahnen verlagern. Solche Verlagerungseffekte (auch Reboundeffekte sind möglich) konnten im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden.

3.9 Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie (UT Nr. 60)

Diese Umwelttechnologie umfasst Hochleistungs-Permanentmagnete, die für Elektromotoren im industriellen Einsatz für die Industrieautomatisierung eingesetzt werden. Als Referenztechnologie wurde in den bisherigen Szenarien der Einsatz von NdFeB-Permanentmagneten angenommen.

Folgende Technologien wurden im Rahmen des Projektes als Substitutionsalternativen identifiziert:

- ▶ Niederspannungsmotoren (z. B. Synchronreluktanzmotoren)
- ▶ Reduzierter Seltene-Erden-Gehalt (Materialeffizienz)

3.9.1 Substitutionsszenario

Das Substitutionsszenario für die Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie wurde angenommen und mit dem Auftraggeber abgestimmt wie in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 17: Substitutionsszenario der UT Nr. 60 (HL-Permanentmagnete in der Industrie)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Niedrigspannungsmotor	5 %	15 %
Reduzierter SEE-Gehalt	60 %	83 %
Gesamt	65 %	98 %

Ein mögliches Szenario mit Substitutionsmöglichkeiten zeigt, dass in 2025 im Vergleich zum Green-Economy-Szenario 65 % der Ursprungstechnologie durch andere Technologien (Niedrigspannungsmotor und reduzierter SEE-Gehalt) ersetzt werden können. In 2050 beläuft sich das Potential auf fast 100 %. Der Niedrigspannungsmotor kann nur in bestimmten Anwendungen als Substitut für den Permanentmagnet-Motor eingesetzt werden und besitzt daher ein Potential von maximal 15 % in 2050. Es wird davon ausgegangen, dass eine weitere SEE-Einsparung durch Materialeffizienz im NdFeB-Permanentmagnet bis 2050 möglich ist. Im Substitutionsszenario wird angenommen, dass in 2050 über 80 % der HL-Permanentmagnete Seltene Erden-Permanentmagnete mit reduziertem SEE-Gehalt sein werden.

3.9.2 Rohstoffbedarfe

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

Tabelle 18: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 60 (HL-Permanentmagnete in der Industrie)
Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	74	165	86	257
Kupfer	12.005	36.015	12.005	36.015
Neodym	273	612	317	952
Praseodym	81	182	94	283
Terbium	15	33	17	51

Die vorangegangene Tabelle mit den Rohstoffbedarfen zeigt auf, dass es deutliche Potentiale zur Rohstoffminderung durch Substitutionen für die Seltenen Erden gibt. In 2025 könnten knapp 15 % der Seltenen Erden eingespart werden. In 2050 liegt das Einsparpotential bei ca. 35 % der Seltenen Erden.

Die erhöhte Rohstoffeinsparung bei den Seltenen Erden rührt daher, dass bei den Niedrigspannungsmotoren (Synchronreluktanzmotoren) der Bedarf an Seltenen Erden komplett entfällt und die erhöhte Materialeffizienz bei der Substitutionsmöglichkeit „reduzierter SEE-Gehalt“ den SEE-Bedarf deutlich reduziert. Die Einsparung bezieht sich gleichermaßen auf die schweren und leichten Seltenen Erden. Der Kupferbedarf wird als gleichbleibend angenommen. In der Substitutionsalternative des Niedrigspannungsmotors wird von einem gleichbleibenden Kupferbedarf ausgegangen, während der Bedarf an Seltenen Erden entfällt.

3.10 Dünnschicht-PV (UT Nr. 87)

Die Dünnschicht-Photovoltaik umfasst eine Reihe von Technologielinien an Solarzellen; allen ist gemein, dass sie mit deutlich geringeren Schichtdicken operieren als „klassische“ Zellen, die auf kristallinem Silizium basieren. Betrachtet wurden Halbleiter aus amorphem Silizium (a-Si), Cadmiumtellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS). Die Substitutionsanstrengungen konzentrieren sich auf CIGS-Zellen, da erwartet wird, dass CdTe-Zellen mittel- bis langfristig keine große Rolle mehr spielen und a-Si-Zellen unter Ressourcengesichtspunkten eher als Substitutionsoption gegenüber anderen Zelltypen angesehen werden.

3.10.1 Substitutionsszenario

Die mögliche partielle Substitution von Indium durch Gallium sowie der Einsatz Indium-freier TCOs wurde bereits in den angenommenen zukünftigen Materialbedarfen im Green-Economy-Szenario berücksichtigt. Damit verbleibt als mögliche weitere Substitution der Einsatz von Solarzellen basierend auf einem Halbleiter aus Kupfer-Zink-Zinnsulfid (CZTS). Diese befinden sich noch im Laborstadium, ein möglicher Einsatz wird daher vorsichtig und eher längerfristig erwartet.

Tabelle 19: Substitutionsszenario der UT Nr. 87 (Dünnschicht-PV)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
CZTS-Zellen	5 %	20 %
Gesamt	5 %	20 %

Durchbrüche bei anderen Technologielinien können momentan nicht abgesehen werden. Alternativ ist auch eine stärkere Marktdurchdringung etwa der a-Si-Zellen möglich, die die Materialbedarfe insgesamt entschärfen würde.

3.10.2 Rohstoffbedarfe

Im Folgenden werden die sich ergebenden globalen Rohstoffbedarfe unter Annahme des oben vorgestellten Substitutionsszenario berechnet und dem zu Grunde liegendem Green-Economy-Szenario gegenüber gestellt.

Tabelle 20: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 87 (Dünnschicht-PV) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Gallium	6,2	3,1	6,5	3,9
Indium	87,2	7,7	91,8	9,6
Selen	33,7	16,2	35,5	21,2
Silizium	35,5	61,1	35,5	61,1
Zink	0,5	3,4	0,0	0,0
Zinn	3,3	20,7	0,0	0,0

CZTS-Zellen bedingen keinen Einsatz von Gallium, Indium oder Selen. Daher wird der Gesamtbedarf dieser Rohstoffe entsprechend der Durchdringung von CZTS-Zellen reduziert, im hier angenommenen Fall also um 20 %. Der Siliziumbedarf bleibt in gleicher Höhe bestehen. Durch den Einsatz von CZTS-Zellen sind andererseits aber zusätzlich Bedarfe an Zink und Zinn notwendig.

3.11 Tandemzellen (UT Nr.90)

Tandemzellen werden wahrscheinlich auch langfristig nur in konzentrierenden Photovoltaikanlagen eingesetzt werden, damit ihr hoher Wirkungsgrad wirtschaftlich genutzt werden kann. Als Referenzzelle wird eine Kombination aus GaInP/GaInAs/Ge angenommen. Auch andere Halbleiterkombinationen sind durchaus denkbar, insbesondere Silizium- und Perowskit-basierte Halbleiter. Diese sind jedoch mit erheblichen Wirkungsgradverlusten verbunden und werden daher mittelfristig nicht erwartet.

Funktional könnten in einigen Anwendungsbereichen zudem optional auch solarthermische Kraftwerke oder kristalline Siliziumsolarzellen eingesetzt werden. Sollte sich deren Entwicklung dynamischer gestalten als angenommen, könnten konzentrierende Photovoltaikanlagen zusätzliche Marktanteile verlieren.

3.11.1 Substitutionsszenario

Das Substitutionsszenario umfasst den Einsatz Indium-freier TCOs sowie die Verwendung von Aluminium an Stelle von Silber in den Spiegeln.

Tabelle 21: Substitutionsszenario der UT Nr. 90 (Tandemzellen)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Substitution von Indium aus ITOs	45 %	90 %
Silber in Spiegeln durch Aluminium + Substitution von Indium aus ITO	5 %	10 %
Gesamt	50 %	100 %

Es wird angenommen, dass bis 2025 die Hälfte, im Jahre 2050 alle neu errichteten Anlagen mit Indium-freien TCOs ausgestattet sind. Die Substitution von Silber durch Aluminium in den Spiegeln wird sich auf Grund der Wirkungsgradverluste von 5 % wohl nur begrenzt durchsetzen.

3.11.2 Rohstoffbedarfe

Diese Substitutionsoptionen reduzieren potentiell den Bedarf an Silber und Indium, den der anderen enthaltenen Rohstoffe (insbesondere Gallium und Germanium) jedoch nicht. Die sich ergebenden Bedarfe sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 22: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 90 (Tandemzellen) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Gallium	0,019	0,082	0,019	0,081
Germanium	0,386	1,634	0,385	1,626
Indium	0,005	0,014	0,006	0,027
Silber	0,006	0,024	0,006	0,027
Silizium	475	2.010	474	2.000

Einzig für Indium können bedeutende relative Einsparungen erwartet werden. Für Gallium und Germanium erhöhen sich im Substitutionsszenario durch die Wirkungsgradverluste auf Grund des (sehr begrenzten) Einsatzes von Aluminiumspiegeln die Materialbedarfe leicht. Ein weitergehender Einsatz dieser Substitution würde den Bedarf an Silber zusätzlich reduzieren. Absolut gesehen bewegen sich die Änderungen im Rohstoffbedarf auf einem sehr niedrigen Niveau.

3.12 CSP (UT Nr. 93)

Concentrated Solar Power (CSP-)Anlagen können in unterschiedlichen Formen ausgeführt werden, deren häufigste Parabolrinnenkraftwerke sind. Der Großteil der kritischen Rohstoffe wird in den Legierungen der hochtemperaturbelasteten Komponenten eingesetzt. Daneben wird Kupfer zur Stromleitung und Silber in den Spiegeln verwendet.

3.12.1 Substitutionsszenario

Als mögliche Substitution kommt allein der Einsatz von Aluminium- an Stelle von Silberspiegeln in Frage. Auf Grund von Wirkungsgradverlusten von 5 % wird jedoch nicht erwartet, dass diese Substitution sich breit durchsetzt. Die Substitution der einzelnen CSP-Technologien untereinander soll hier genau so wenig betrachtet werden wie der Einsatz konzentrierender PV-Anlagen.

Tabelle 23: Substitutionsszenario der UT Nr. 93 (CSP)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Ersatz von Silber durch Aluminium	5 %	10 %
Gesamt	5 %	10 %

3.12.2 Rohstoffbedarfe

Die identifizierte Substitutionsoption berührt nur einen geringen Teil der in einer CSP-Anlage enthaltenen Rohstoffe. Die sich ergebenden Bedarfe sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 24: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 93 (CSP) Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Chrom	8.822	36.968	8.800	36.784
Kupfer	12.832	53.772	12.800	53.504
Magnesium	12.030	50.411	12.000	50.160
Mangan	8.020	33.607	8.000	33.440
Molybdän	802	3.361	800	3.344
Nickel	3.769	15.795	3.760	15.717
Silber	49	196	52	217
Titandioxid	161	651	167	697
Vanadium	16	102	7,6	32
Zink	2.470	9.785	2.600	10.868

Durch die Substitution des Silbers in den Spiegeln kann die Abhängigkeit von Silber im Bedarfsfall komplett umgangen werden; die hier angenommene Durchdringung von Aluminiumspiegeln reduziert den Silberbedarf im Jahr 2050 immerhin um rund 20 t, was einer Reduktion von 10 % entspricht. Auch der Bedarf nach Zink sinkt um 10 % in 2050 (-1.083 t). Die Verwendung von Aluminiumspiegeln senkt jedoch den Wirkungsgrad der Anlage, so dass sie entsprechend größer dimensioniert werden muss, um die gleiche Leistung bereitzustellen. Damit steigt der Bedarf der anderen eingesetzten Rohstoffe.

3.13 Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen (UT Nr. 98)

In Batterien der Elektromobilität kommen verschiedene Zellchemien von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) zum Einsatz. Als Referenzzelle soll hier eine Anode aus Lithiumtitanat und eine Elektrode aus Lithium-Manganoxid angenommen werden. Es ist durchaus möglich, dass sich eine andere Zellchemie durchsetzt, da jede ihre spezifischen Vor- und Nachteile sowie Entwicklungspotentiale besitzt.

3.13.1 Substitutionsszenario

Die Substitution unterschiedlicher Zelltypen der LIB untereinander soll hier nicht betrachtet werden. Möglich erscheint die Substitution von Kupfer als Stromleiter durch Aluminium (geringeres Gewicht wird hier durch größeren Platzbedarf erkaufte). Der Einsatz eines Doppelschichtkondensators würde es ermöglichen, die Batterie kleiner zu dimensionieren und kann somit als Teilsubstitution angesehen werden. Dagegen würde eine Brennstoffzelle nur noch eine sehr kleine Batterie zur Energiezwischenspeicherung benötigen, die hier deshalb vernachlässigt werden kann.

Tabelle 25: Substitutionsszenario der UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Kupfer durch Aluminium	30 %	40 %
Doppelschichtkondensator	5 %	10 %
Brennstoffzelle	0 %	20 %
Gesamt	35 %	70 %

Die Gesamtsubstitutionsrate liegt mit 70 % in 2050 hoch. Dabei muss beachtet werden, dass in der ersten Substitutionsoption die Batterie bis auf die Kupferableiter nicht verändert wird. Insbesondere

der Anteil von Brennstoffzellen hängt stark von systemischen Entwicklungen wie etwa der Entwicklung einer Tankstellen-Infrastruktur ab; erhöhter Einsatz von Wasserstoff in der langfristigen stationären Energiespeicherung könnte den Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeugen ebenfalls befördern.

3.13.2 Rohstoffbedarfe

Durch funktionale Substitution können die in einer LIB aufgewendeten Rohstoffe eingespart werden; die Substitutionstechnologie schafft ihrerseits jedoch neue Rohstoffbedarfe. Die sich ergebenden Szenarien sind in der nachstehenden Tabelle gegenüber gestellt.

Tabelle 26: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen)
Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Kupfer	239.653	803.632	340.428	1.978.031
Lithium	73.715	315.676	74.459	404.713
Mangan	442.422	2.182.837	446.891	2.798.509
Titandioxid	918.577	4.532.111	927.856	5.810.399
Nickel	1.121	12.244	0	0
Platin	0	347	0	0

Die Brennstoffzelle hat offensichtlich das Potential, den Bedarf an kritischen Rohstoffen in LIB deutlich zu reduzieren; den Einsatz an Mangan im Jahr 2050 beispielsweise um rund 560.000 t, den von Lithium um 80.000 t. Dafür wird jedoch ein zusätzlicher Bedarf an Platin erzeugt. Durch den Einsatz der Substitutionsalternative des Doppelschichtkondensators werden ebenfalls Lithium (ca. 8.000 t) und Mangan (ca. 55.000 t) eingespart. Der Doppelschichtkondensator benötigt allerdings zusätzlich Nickel (in 2050 knapp 12.000 t).

3.14 Lithium-Ionen-Stromspeicher (UT Nr. 100)

Auch für Lithium-Ionen Batterien (LIB) für die stationäre Stromspeicherung sind verschiedene Zellchemien möglich. Angenommen wird Lithium-Manganoxid und Graphit als Elektrodenmaterial in der Ausgangstechnologie im Green-Economy-Szenario.

3.14.1 Substitutionsszenario

Ebenso wie bei der Betrachtung von LIB in der Elektromobilität sollen auch hier die unterschiedlichen Zellchemien nicht als Substitutionen betrachtet werden. Möglich ist in der stationären Energiespeicherung jedoch der Einsatz anderer Batterietypen: Sowohl Natrium-Schwefel- als auch insbesondere Redox-Flow-Batterien sind denkbar. Alternativ könnten in stationärer Anwendung auch Wasserstoff-Brennstoffzellen zum Einsatz kommen.

Tabelle 27: Substitutionsszenario der UT Nr. 100 (Lithium-Ionen-Stromspeicher)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Kupfer durch Aluminium	20 %	20 %
Natrium-Schwefel-Batterie	5 %	5 %
Redox-Flow-Batterie	10 %	20 %
Wasserstoff-Brennstoffzelle	0 %	5 %
Gesamt	35 %	50 %

Neben der Materialsubstitution „Kupfer durch Aluminium“ erscheinen die Redox-Flow-Batterien als aussichtreichste Alternative zu LIB. Der Einsatz von Wasserstoffbrennstoffzellen hängt in starkem Maße von systemischen Faktoren ab. Sollte sich die Langzeitenergiespeicherung über Wasserstoff durchsetzen, könnte ihr Anteil auch steigen.

3.14.2 Rohstoffbedarfe

Wie auch im Fall der LIB für die Elektromobilität ergeben sich unter Annahme des Substitutionsszenarios deutlich veränderte Materialbedarfe:

Tabelle 28: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 100 (Lithium-Ionen-Stromspeicher) Substitutions-szenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Kupfer	108.125	212.358	135.156	283.144
Lithium	7.833	13.514	9.215	19.305
Mangan	109.008	188.065	128.244	268.665
Phosphatgestein	1.991	3.435	2.342	4.907
Vanadium	24.113	101.031	0,0	0,0
Scandium	0,0	0,3	0,0	0,0
Cer	0,0	0,6	0,0	0,0
Lanthan	0,0	2,3	0,0	0,0
Zirkonium	0,0	4,4	0,0	0,0
Gadolinium	0,0	0,1	0,0	0,0
Yttrium	0,0	0,2	0,0	0,0
Chrom	0,0	165	0,0	0,0

Es wird ersichtlich, dass die Substitutionsmöglichkeiten den Einsatz kritischer Rohstoffe (Kupfer, Lithium, Mangan, Phosphatgestein) in LIB entsprechend ihrer Marktdurchdringung reduzieren können. Dies führt im angenommenen Substitutionsszenario im Jahr 2050 zu Einsparungen von knapp 5.800 t Lithium und guten 80.000 t Mangan. Jedoch würde insbesondere der breite Einsatz von Brennstoffzellen zu einem Einsatz anderer kritischer Rohstoffe führen (Cer, Lanthan, Zirkonium, Gadolinium, Yttrium, Chrom).

3.15 Permanentmagnet-Generatoren (synchron) (UT Nr. 106)

Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen werden insbesondere auf Grund ihres sehr hohen Wirkungsgrades eingesetzt. Sie bedingen den Einsatz der Seltenerdmetalle Dysprosium und Neodym.

3.15.1 Substitutionsszenario

Dysprosium lässt sich durch das (etwas weniger kritische) Terbium substituieren. Zudem läuft eine Reihe von Forschungsvorhaben, um Permanentmagnete zu entwickeln, die ohne beziehungsweise mit einem verringertem Einsatz Seltener Erden auskommen. So könnte durch nanostrukturierte Werkstoffe der Bedarf an Dysprosium und Neodym um etwa ein Drittel reduziert werden. Andere Forschungsbemühungen zielen auf den Einsatz von Eisen-Kobalt- oder Eisen-Nickel-Verbindungen.

Im Gegensatz zu diesen Ansätzen könnte der Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern in Generatoren (HTS-Generatoren) in hohen Leistungsklassen zusätzlich zu Materialeinsparungen höhere Wirkungsgrade liefern. Dafür wird im Supraleiter Yttrium eingesetzt.

Tabelle 29: Substitutionsszenario der UT Nr. 106 (Permanentmagnet-Generatoren, synchron)

Substitution	Substitution zu GE 2025	Substitution zu GE 2050
Dysprosium durch Terbium	30 %	50 %
FeCo- oder FeNi-basierte Materialien	5 %	5 %
Nanokomposite	0 %	5 %
Nanostrukturen	0 %	5 %
HTS-Generatoren	5 %	30 %
Gesamt	40 %	95 %

3.15.2 Rohstoffbedarfe

Die sich unter Annahme der oben vorgestellten Substitutionen ergebenden Rohstoffbedarfe sind im Folgenden im Vergleich zu denen des Green-Economy-Szenarios dargestellt.

Tabelle 30: Globale Rohstoffbedarfe UT Nr. 106 (Permanentmagnet-Generatoren, synchron)
Substitutionsszenario versus ursprünglicher Technologie in Green-Economy (in t)

	Substitutionsszenario		Green-Economy	
	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	45	32	75	270
Kupfer	72.032	132.107	79.227	189.299
Neodym	951	1.844	1.056	2.975
Terbium	23	135	0	0
Nickel	6.236	14.900		
Yttrium	0,6	8,1	0	0
Kobalt	8.207	19.610	0	0

Vor allem der Bedarf an Dysprosium kann im Substitutionsszenario deutlich reduziert werden (um insgesamt 88 % im Jahr 2050 gegenüber dem Green-Economy-Szenario), allerdings unter Aufwendung von Terbium. Insbesondere der Einsatz von HTS-Generatoren in den zukünftig an Bedeutung gewinnenden Hochleistungsanwendungen birgt große Potentiale zur Reduktion der Bedarfe an

Seltenen Erden. Aus dieser Substitutionsoption ergibt sich auch der Großteil der im Jahr 2050 potentiell eingesparten gut 1.100 t Neodym. Daraus ergäben sich jedoch neue Bedarfe insbesondere an Yttrium. Die Alternative der FeCo- und FeNi-basierten Materialien ist frei von Seltenen Erden. Allerdings werden hier die kritischen Rohstoffe Nickel und Kobalt eingesetzt.

4 Entwicklung der einzelnen Rohstoffbedarfe in den betrachteten Umwelttechnologien

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Bedarfe der betrachteten relevanten Rohstoffe in den beiden Szenarien (Green-Economy und Substitution) visualisiert.

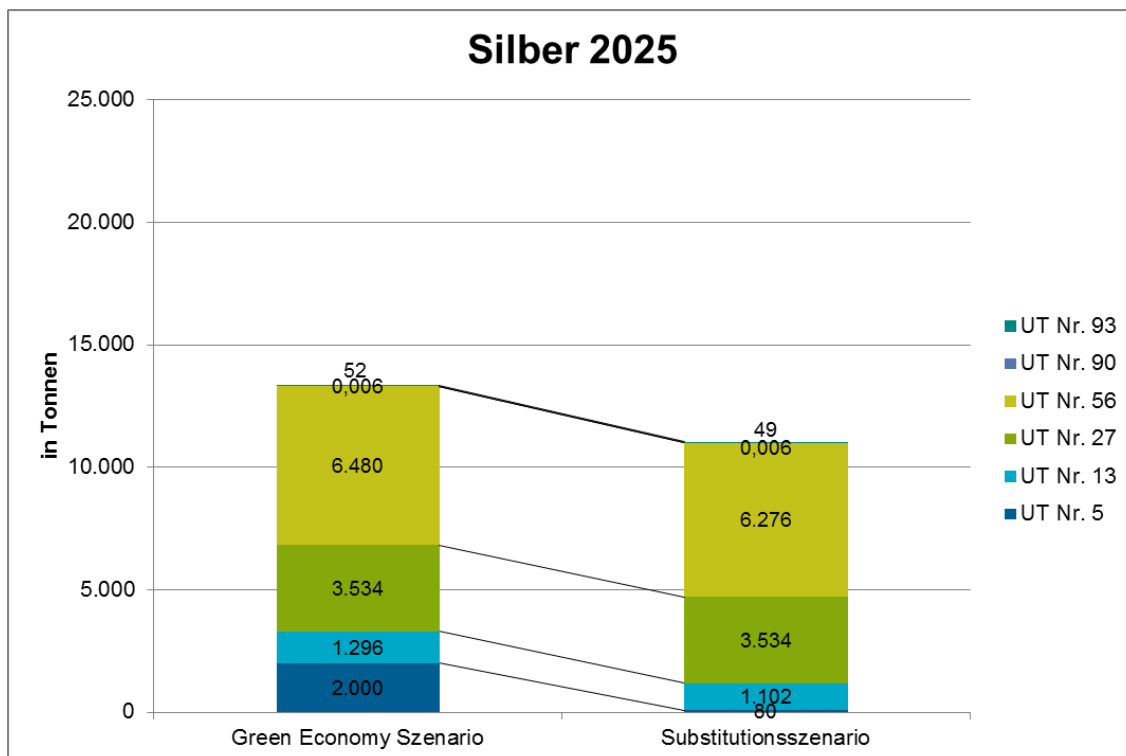
Ruthenium und Iridium – beide als relevante Rohstoffe im Laufe des Projektes eingestuft – finden in den in diesem Arbeitspaket untersuchten Umwelttechnologien keine Anwendung mehr. Daher werden sie in den folgenden Unterkapiteln nicht dargestellt.

4.1 Silber

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

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 17 % bzw. 2.300 t (siehe Abbildung 4-1). Die größten Einsparungen können bei UT Nr. 5 (RFID) erzielt werden (-1.920 t).

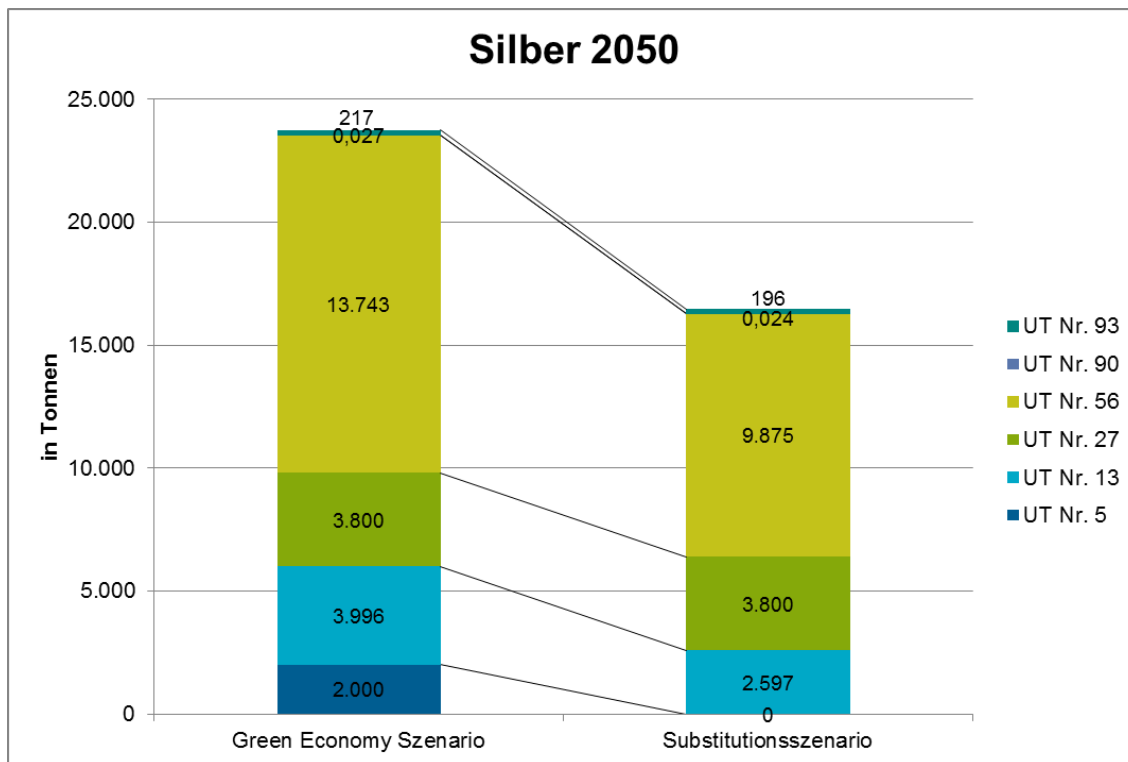
Abbildung 4-1: Silberbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei über 30 % bzw. knapp 7.300 t (siehe Abbildung 4-2). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei UT Nr. 56 (bleifreie Lote) mit ca. 3.900 t und UT Nr. 5 (RFID) mit 2.000 t.

Abbildung 4-2: Silberbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



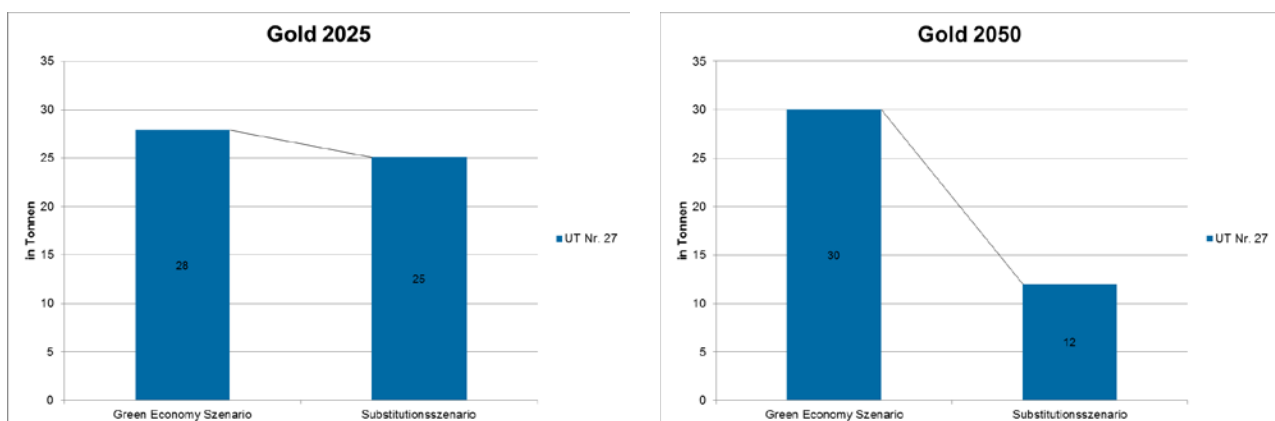
Quelle: Eigene Abbildung

4.2 Gold

Gold wird in den betrachteten Umwelttechnologien bezüglich der Substitutionsmöglichkeiten nur noch in UT Nr. 27 (Weiße 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 t und in 2050 bei 60 % bzw. 18 t (siehe Abbildung 4-3).

Abbildung 4-3: Goldbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



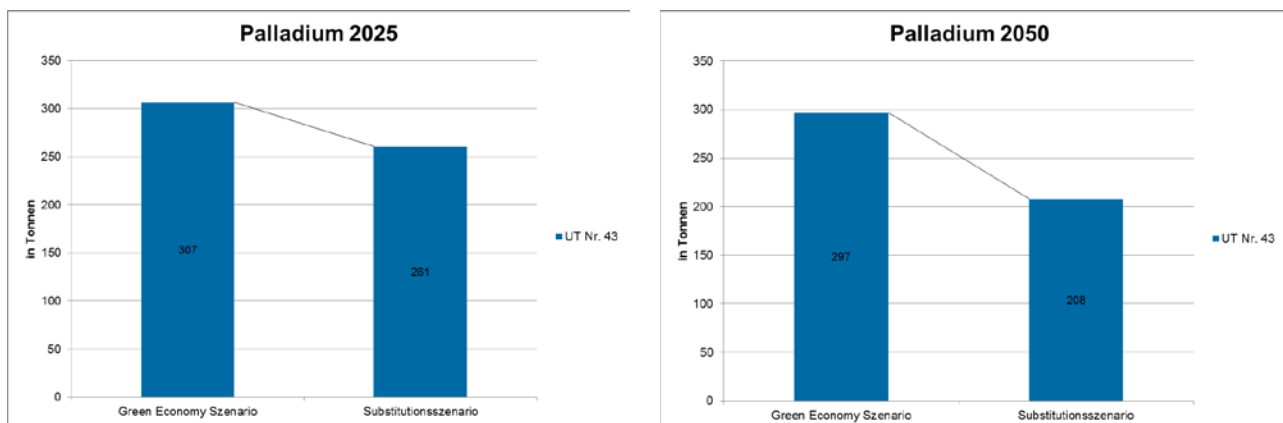
Quelle: Eigene Abbildung

4.3 Palladium

Palladium wird in den betrachteten Umwelttechnologien bezüglich der Substitutionsmöglichkeiten nur noch in UT Nr. 54 (Fahrzeug-Abgas-Katalysator) eingesetzt. Der Bedarf an 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 bei 15 % bzw. 46 t und in 2050 bei 30 % bzw. 89 t (siehe Abbildung 4-4).

Abbildung 4-4: Palladiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



Quelle: Eigene Abbildung

4.4 Platin

Der Bedarf von Platin steigt im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050.

In 2025 liegt der Mehrbedarf im Substitutionsszenario bei 26 % bzw. 46 t (siehe Abbildung 4-5). Dieser zusätzliche Bedarf generiert sich aus UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren), wo Palladium teilweise durch Platin ersetzt wird.

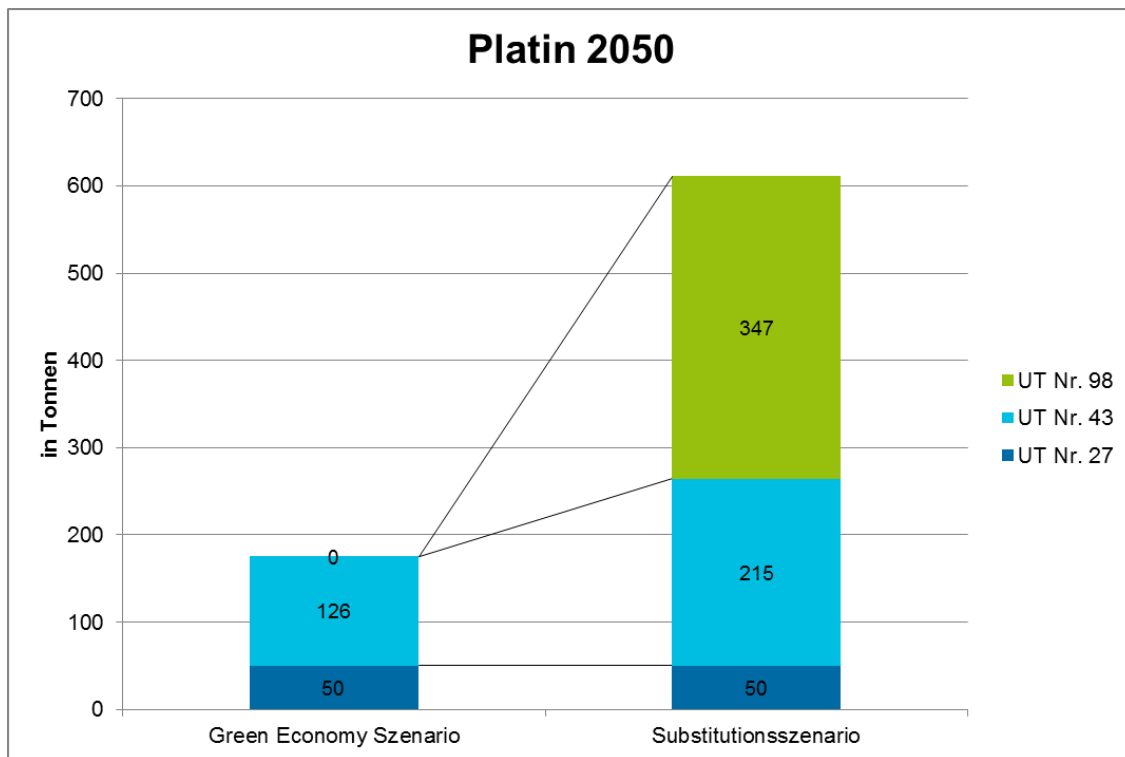
Abbildung 4-5: Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

2050 liegt der Mehrbedarf an Platin im Substitutionsszenario bei knapp 250 % bzw. 436 t (siehe Abbildung 4-6). Der zusätzliche Bedarf beruht auf UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren) mit 89 t (Palladium wird teilweise durch Platin ersetzt). Der größte Mehrbedarf in 2050 stammt aus UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge) aufgrund der Substitution von Lithium-Ionen-Batterien mit Brennstoffzellen (+knapp 350 t).

Abbildung 4-6: Platinbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



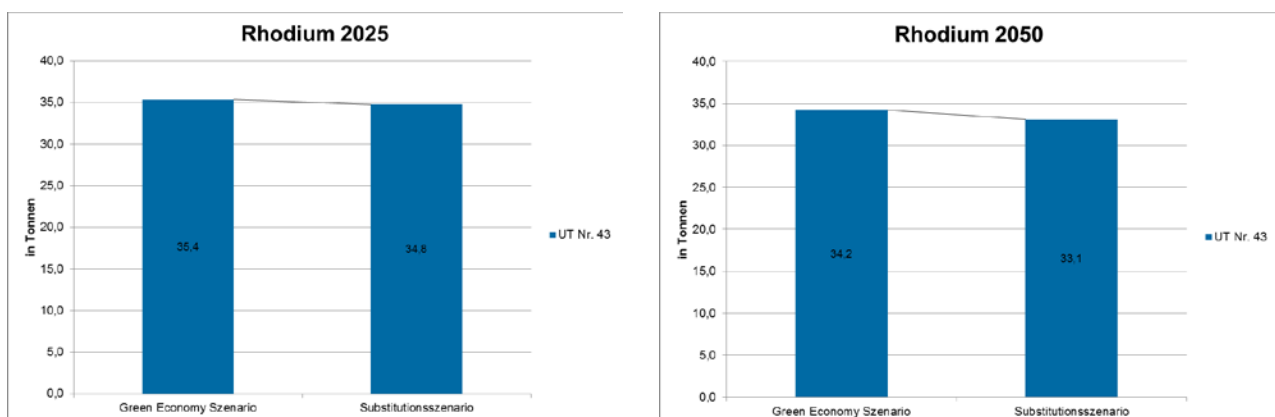
Quelle: Eigene Abbildung

4.5 Rhodium

Rhodium wird in den betrachteten Umwelttechnologien bezüglich der Substitutionsmöglichkeiten nur noch in UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren) eingesetzt. Der Bedarf von Rhodium kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 marginal reduziert werden.

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 2 % bzw. 0,6 t und in 2050 bei 3 % bzw. 1,1 t (siehe Abbildung 4-7).

Abbildung 4-7: Rhodiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



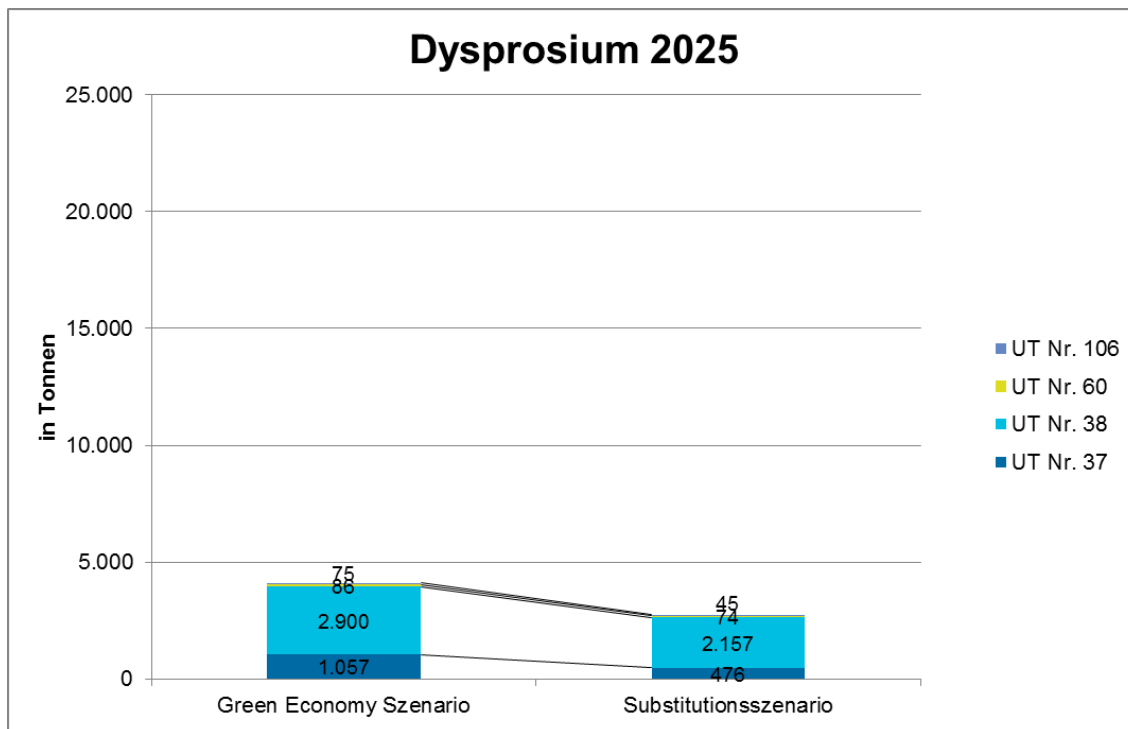
Quelle: Eigene Abbildung

4.6 Dysprosium

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

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 33 % bzw. knapp 1.300 t (siehe Abbildung 4-8). Die größten Einsparungen können bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit 742 t und bei UT Nr. 37 (Hybridmotoren) mit 50 t erzielt werden.

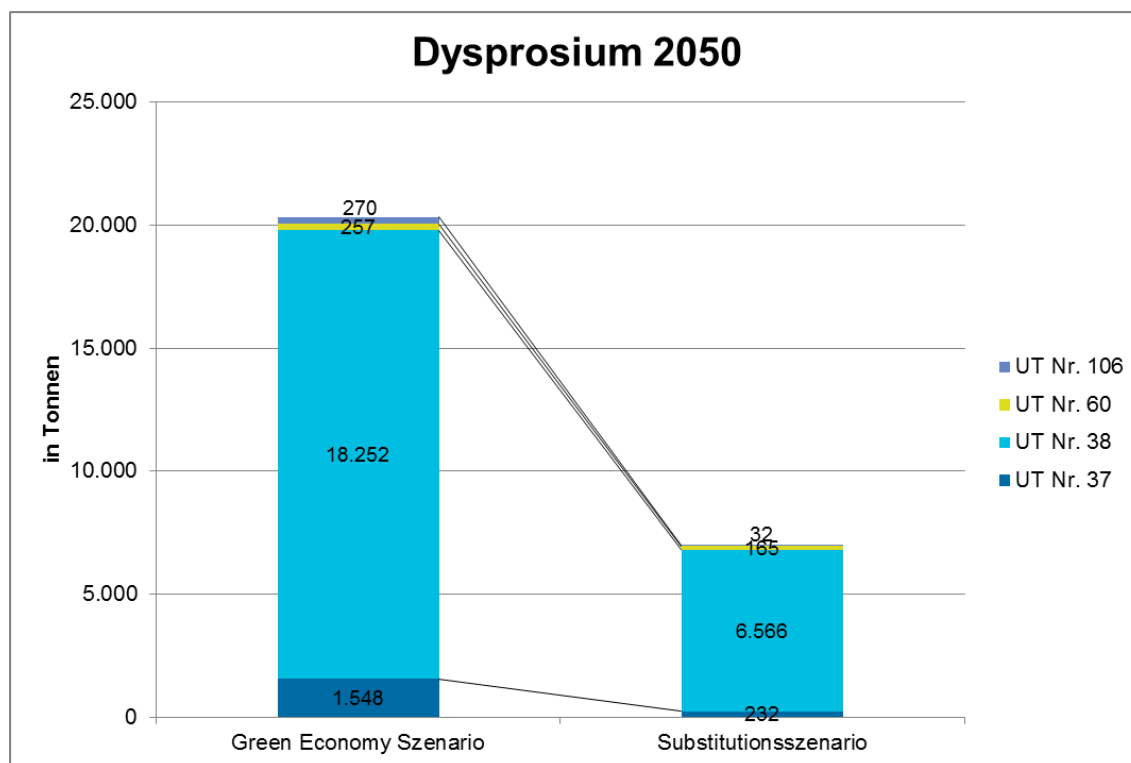
Abbildung 4-8: Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 66 % bzw. 13.300 t (siehe Abbildung 4-9). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit 11.700 t und bei UT Nr. 37 (Hybridmotoren) mit 1.300 t.

Abbildung 4-9: Dysprosiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



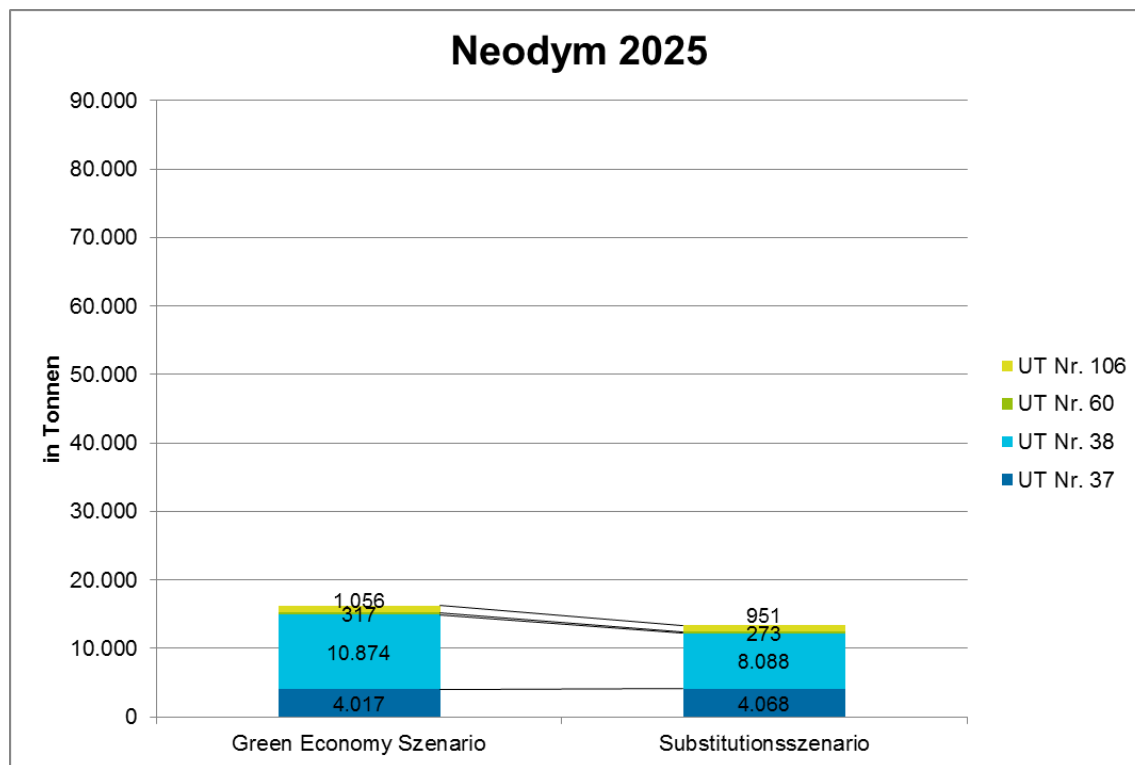
Quelle: Eigene Abbildung

4.7 Neodym

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

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 18 % bzw. knapp 2.900 t (siehe Abbildung 4-10). Die größten Einsparungen können bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit 2.800 t erzielt werden.

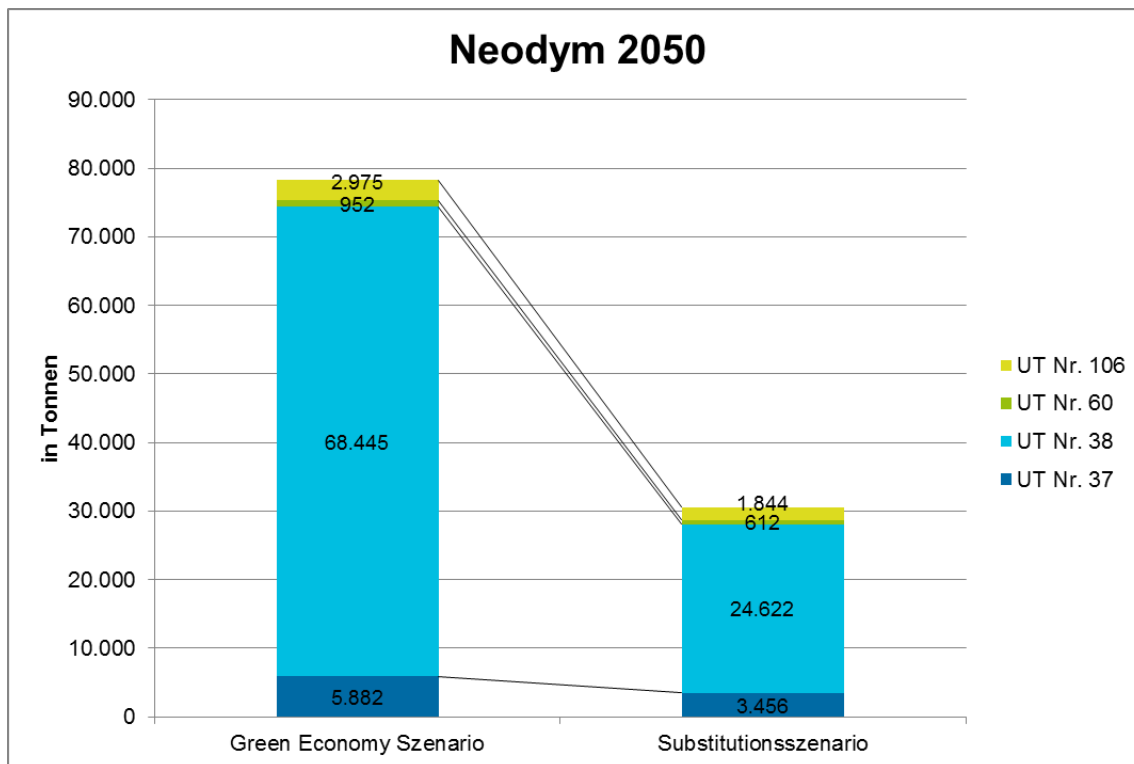
Abbildung 4-10: Neodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 61 % bzw. knapp 48.000 t (siehe Abbildung 4-11). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit 43.800 t, UT Nr. 37 (Hybridmotoren) mit 2.400 t und UT Nr. 106 (Permanentmagnet-Generatoren in WKA) mit 1.100 t.

Abbildung 4-11: Neodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



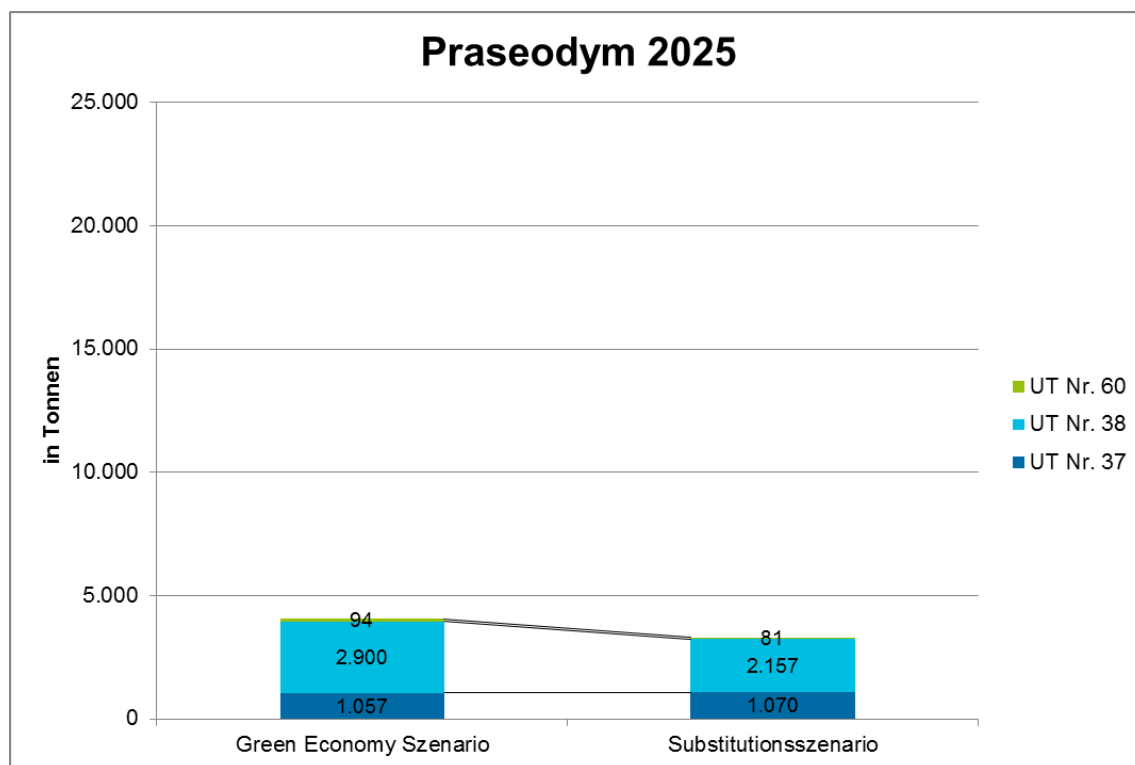
Quelle: Eigene Abbildung

4.8 Praseodym

Der Praseodymbedarf kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 deutlich reduziert werden.

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 18 % bzw. 740 t (siehe Abbildung 4-12). Die größten Einsparungen können bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit 740 t erzielt werden. Die Einsparung von 13 t bei UT Nr. 60 (Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie) heben sich mit dem Mehrbedarf von 13 t bei UT Nr. 37 (Hybridmotoren) wieder auf.

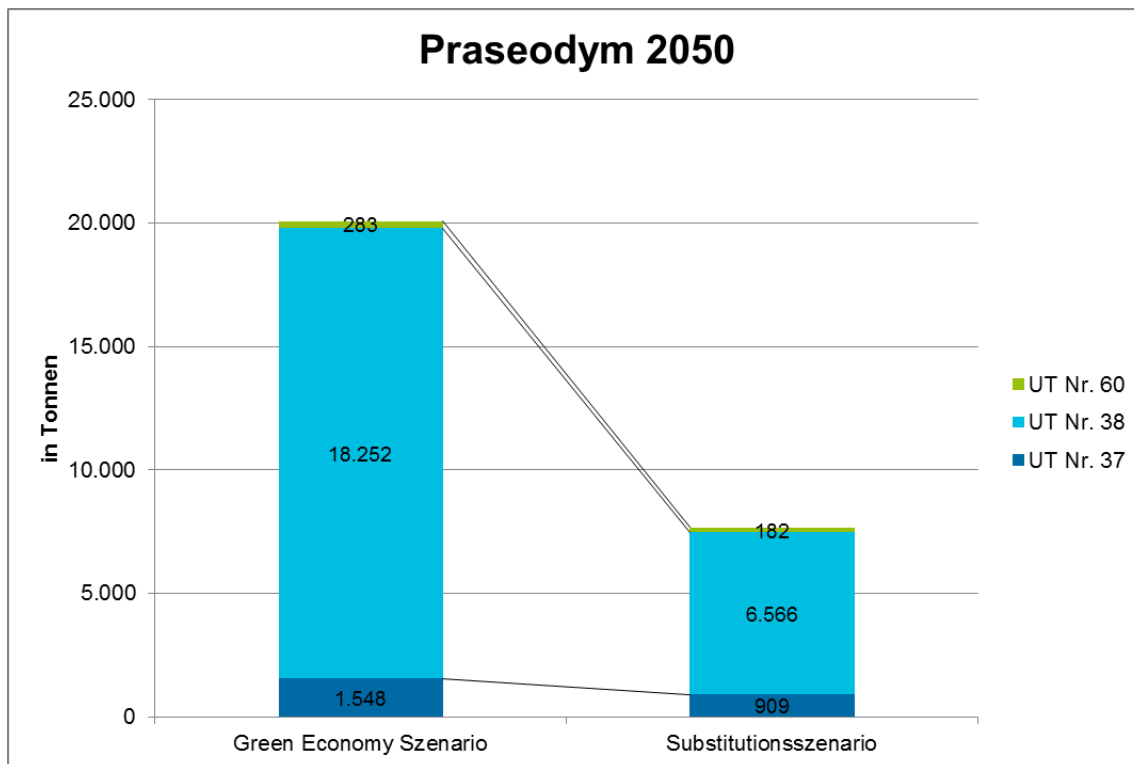
Abbildung 4-12: Praseodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 62 % bzw. knapp 12.500 t (siehe Abbildung 4-13). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit knapp 12.000 t.

Abbildung 4-13: Praseodymbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



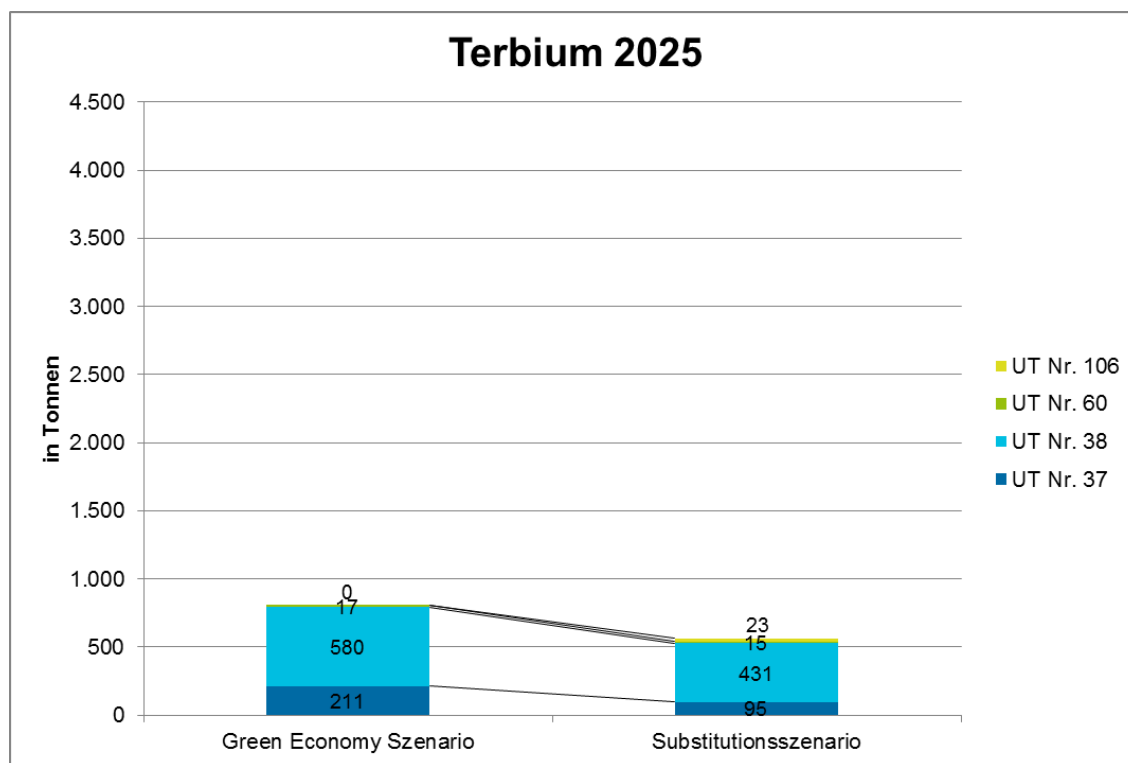
Quelle: Eigene Abbildung

4.9 Terbium

Der Terbiumbedarf kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 deutlich reduziert werden.

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 30 % bzw. 245 t (siehe Abbildung 4-14). Die größten Einsparungen können bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit knapp 150 t und UT Nr. 37 (Hybridmotoren) mit 116 t erzielt werden. Ein Mehrbedarf an Terbium von 23 t ist in UT Nr. 106 (Permanentmagnet-Generatoren in WKA) zu verzeichnen.

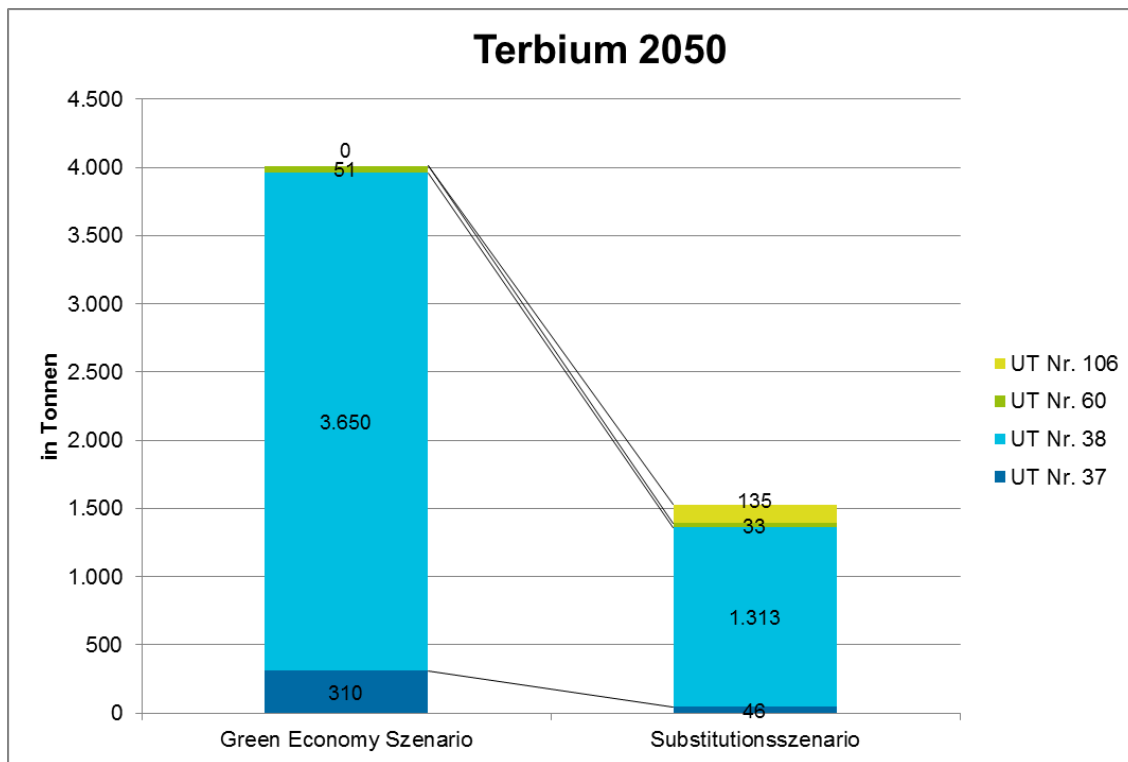
Abbildung 4-14: Terbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 62 % bzw. knapp 2.500 t (siehe Abbildung 4-15). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei UT Nr. 38 (Elektromotoren BEV und PHEV) mit 2.300 t.

Abbildung 4-15: Terbiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



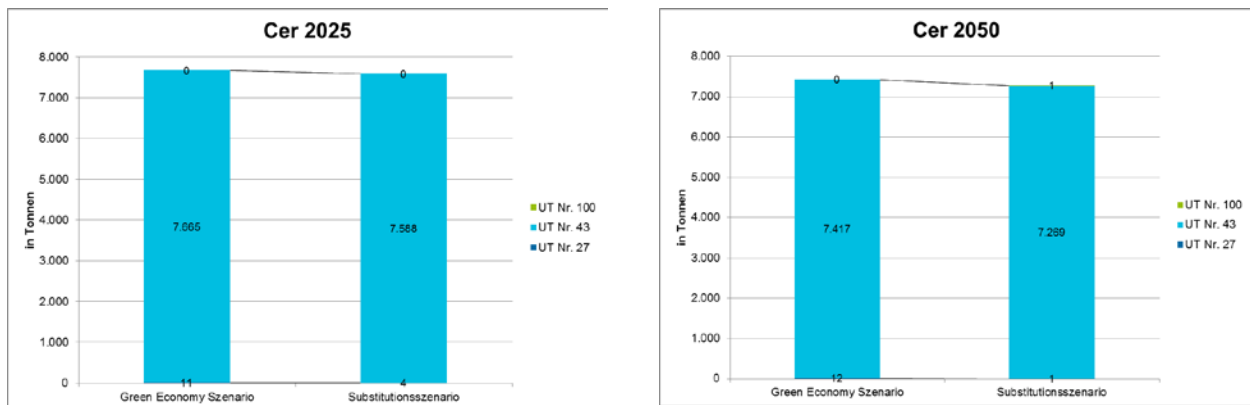
Quelle: Eigene Abbildung

4.10 Cer

Der Cerbedarf kann im Substitutionsszenario sowohl in 2025 als auch in 2050 nur marginal reduziert werden.

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 1 % bzw. 83 t und 2050 bei 2 % bzw. 159 t (siehe Abbildung 4-16). Der Cerbedarf wird getrieben durch UT Nr. 43 (Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren). Hier liegen auch die größten Einsparpotentiale mit 77 t in 2025 und 148 t in 2050. Im Green-Economy-Szenario wurde von einer weitgehenden Elektrifizierung bis 2050 ausgegangen. Daher unterscheiden sich die Cerbedarfe in 2025 und 2050 nur marginal.

Abbildung 4-16: Cerbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



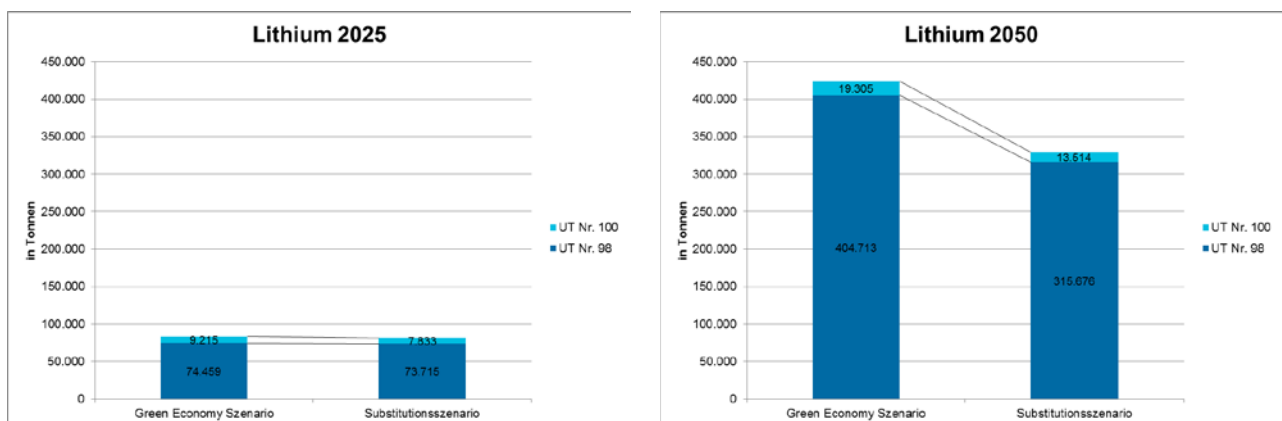
Quelle: Eigene Abbildung

4.11 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 t und in 2050 bei 22 % bzw. knapp 95.000 t (siehe Abbildung 4-17). Die größten Einsparungen in 2025 können bei UT Nr. 100 (Lithium-Ionen-Stromspeicher) mit knapp 1.400 t erzielt werden. In 2050 liegt das größte Einsparpotential bei UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen) mit 89.000 t.

Abbildung 4-17: Lithiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



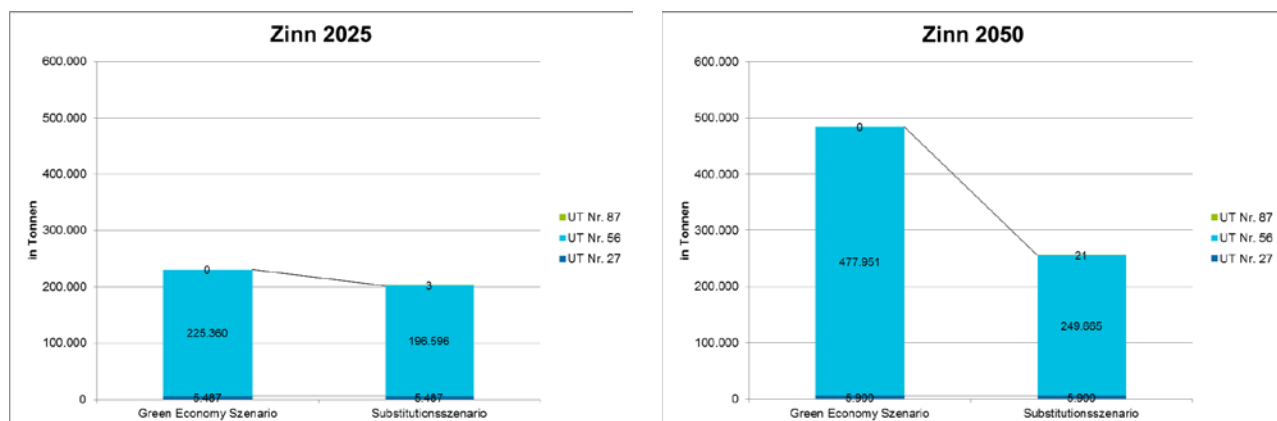
Quelle: Eigene Abbildung

4.12 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 t und in 2050 bei 47 % bzw. knapp 230.000 t (siehe Abbildung 4-18). Die Einsparung in 2025 ist auf UT Nr. 56 (Bleifreie Lote) mit knapp 29.000 t zurückzuführen. Hier benötigt die Substitutionsalternative „Silber-Sintern“ kein Zinn mehr und die Alternative „Zinn-Bismut-Legierung“ deutlich weniger Zinn als in der ursprünglichen Technologie. In 2050 liegt das Einsparpotential ebenso bei UT Nr. 56 mit knapp 230.000 t.

Abbildung 4-18: Zinnbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



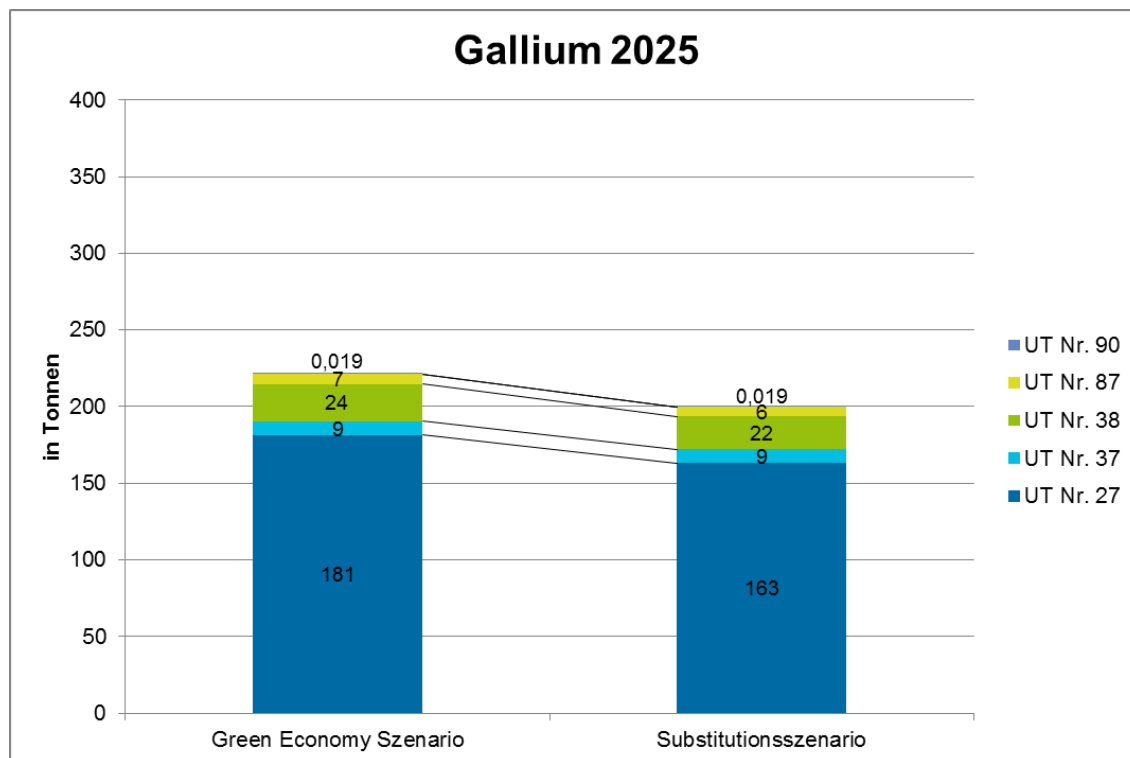
Quelle: Eigene Abbildung

4.13 Gallium

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 t (siehe Abbildung 4-19). Diese Einsparungen können v.a. bei UT Nr. 27 (Weiße LED) mit 18 t erzielt werden.

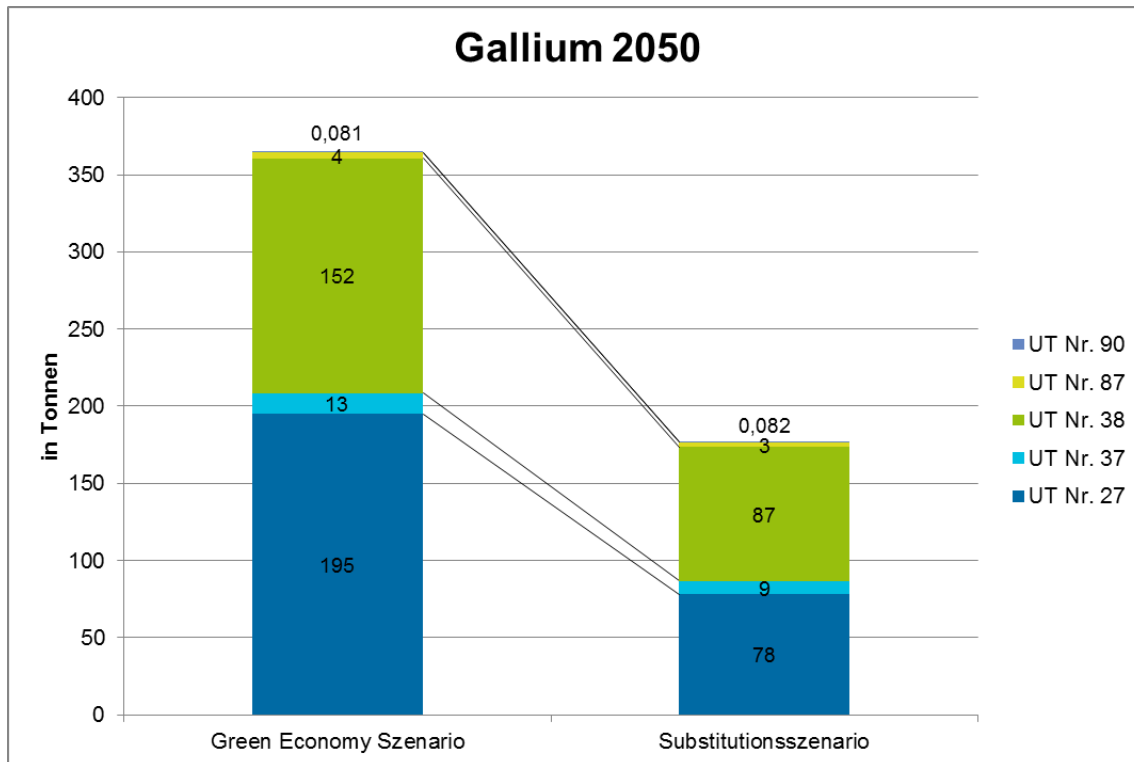
Abbildung 4-19: Galliumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

In 2050 liegt das Gallium-Einsparpotential im Substitutionsszenario bei über 50 % bzw. 188 t (siehe Abbildung 4-20). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei UT Nr. 27 (Weiße LED) mit 117 t und UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotoren) mit 65 t.

Abbildung 4-20: Galliumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



Quelle: Eigene Abbildung

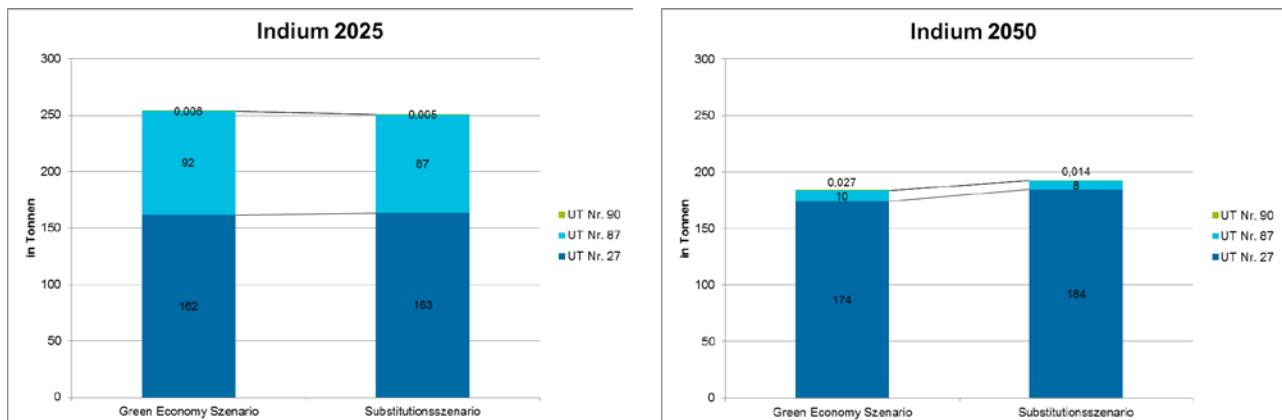
4.14 Indium

Der Indiumbedarf kann im Substitutionsszenario in 2025 minimal reduziert werden, steigt aber in 2050 leicht an.

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 1 % bzw. 3 t. In 2050 steigt der Indiumbedarf hingegen um 5 % bzw. 8,5 t (siehe Abbildung 4-21).

In 2025 ist eine leichte Abnahme bei UT Nr. 87 (Dünnschicht-PV) mit knapp 5 t möglich, allerdings auch eine leichte Zunahme von knapp 2 t bei UT Nr. 27 (Weiße LED) zu verzeichnen. In 2050 steigt der Indiumbedarf im Substitutionsszenario durch einen Mehrbedarf in der Substitutionsalternative der weißen OELDS (+10 t).

Abbildung 4-21: Indiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



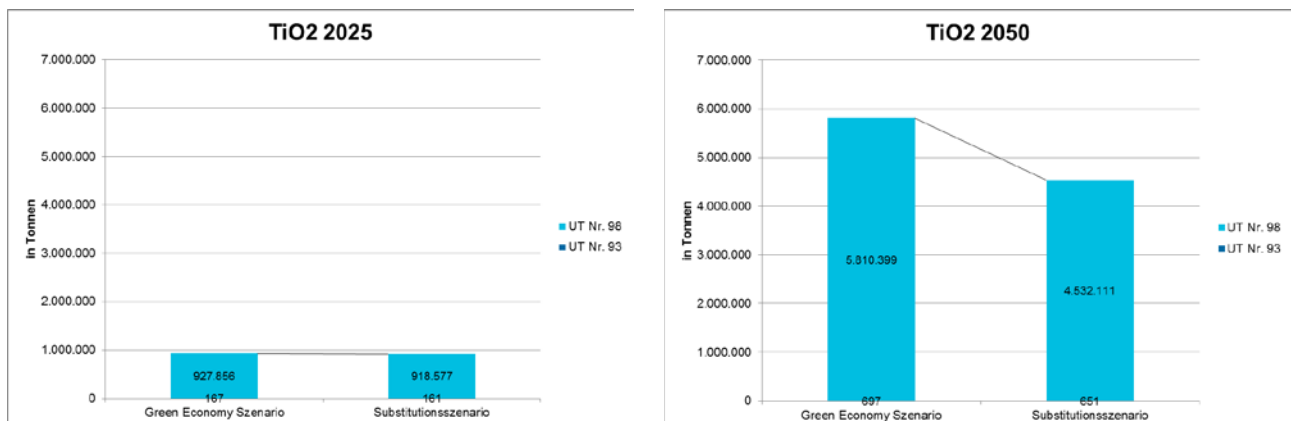
Quelle: Eigene Abbildung

4.15 Titandioxid (TiO₂)

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 t und in 2050 bei 22 % bzw. rund 1.300.000 t (siehe Abbildung 4-22).

In 2025 ist eine Abnahme des TiO₂-Bedarfs im Substitutionsszenario bei UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen) mit knapp 9.300 t (bzw. 1 %) möglich. In 2050 liegt das Einsparpotential an TiO₂ im Substitutionsszenario ebenfalls v.a. bei UT Nr. 98 mit rund 1.300.000 t.

Abbildung 4-22: TiO₂-Bedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050

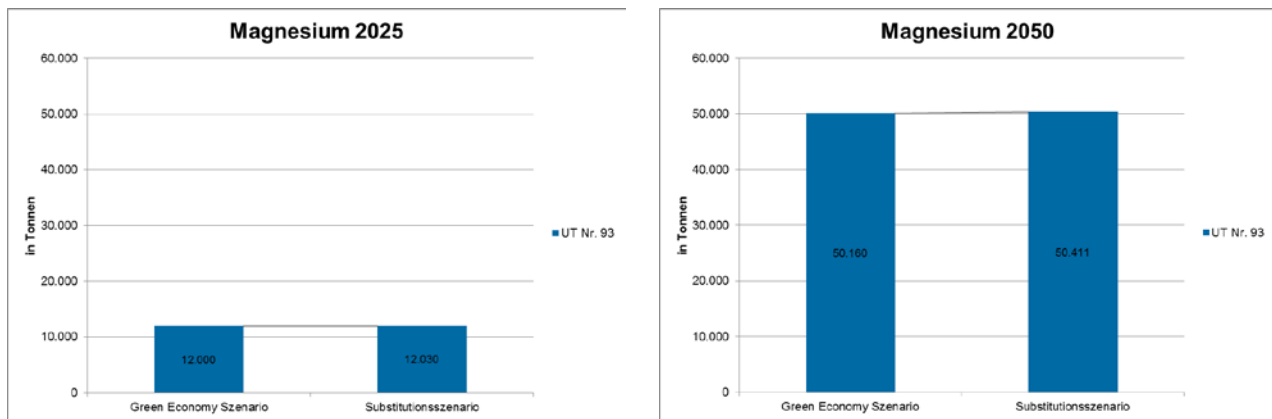
Quelle: Eigene Abbildung

4.16 Magnesium

Der Magnesiumbedarf zeigt im Substitutionsszenario in 2025 und 2050 kaum Veränderungspotential. In 2025 kann es zu einem minimalen Mehrbedarf von 0,5 % bzw. 30 t im Substitutionsszenario kommen, in 2050 liegt der Mehrbedarf bei 0,5 % bzw. 250 t (siehe Abbildung 4-23).

In den untersuchten Umwelttechnologien weist nur UT Nr. 93 (CSP) einen Magnesiumbedarf aus. Der leichte Mehrbedarf an Magnesium wird durch den Einsatz der Substitutionsalternative „Ersatz von Silber durch Aluminium“ erzeugt.

Abbildung 4-23: Magnesiumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



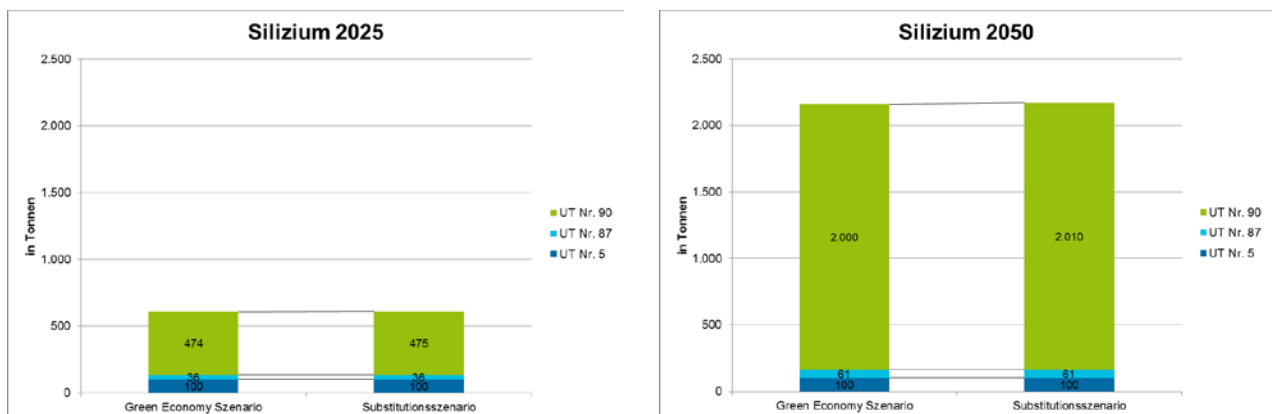
Quelle: Eigene Abbildung

4.17 Silizium

Der Siliziumbedarf zeigt im Substitutionsszenario in 2025 und 2050 kaum Veränderungspotential. In 2025 kann es zu einem minimalen Mehrbedarf von 0,2 % bzw. 1,2 t im Substitutionsszenario kommen, in 2050 liegt der Mehrbedarf bei 0,5 % bzw. 10 t (siehe Abbildung 4-24).

Dieses Bild gilt für alle drei Umwelttechnologien, die einen Siliziumbedarf aufweisen: UT Nr. 5 (RFID), UT Nr. 87 (Dünnschicht-PV), UT Nr. 90 (Tandemzellen).

Abbildung 4-24: Siliziumbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



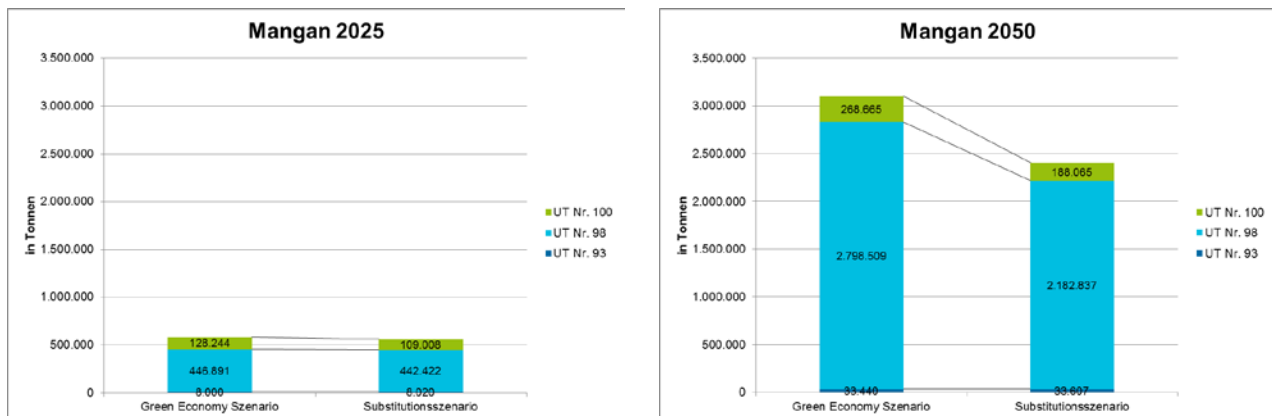
Quelle: Eigene Abbildung

4.18 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 t und in 2050 bei 22 % bzw. rund 700.000 t (siehe Abbildung 4-25).

In 2025 ist eine Abnahme des Manganbedarfs im Substitutionsszenario v.a. bei UT Nr. 100 (Lithium-Ionen-Stromspeicher) mit rund 19.000 t möglich. In 2050 liegt dagegen das größte Einsparpotential an Mangan bei UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen) mit 615.000 t.

Abbildung 4-25: Manganbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025 und 2050



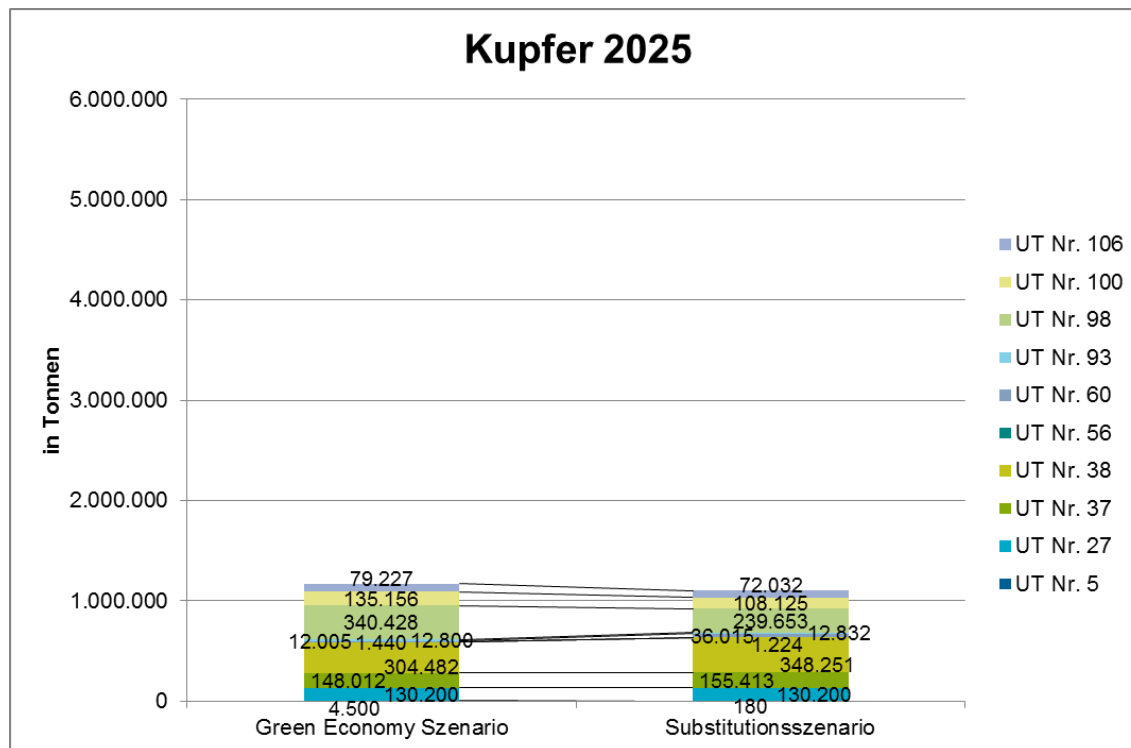
Quelle: Eigene Abbildung

4.19 Kupfer

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

In 2025 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 6 % bzw. knapp 65.000 t (siehe Abbildung 4-26). Die größte Einsparung kann bei UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen) mit rund 100.000 t erzielt werden. Ein Mehrbedarf an Kupfer ist im Substitutionsszenario v.a. bei UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotoren) mit +44.000 t zu verzeichnen.

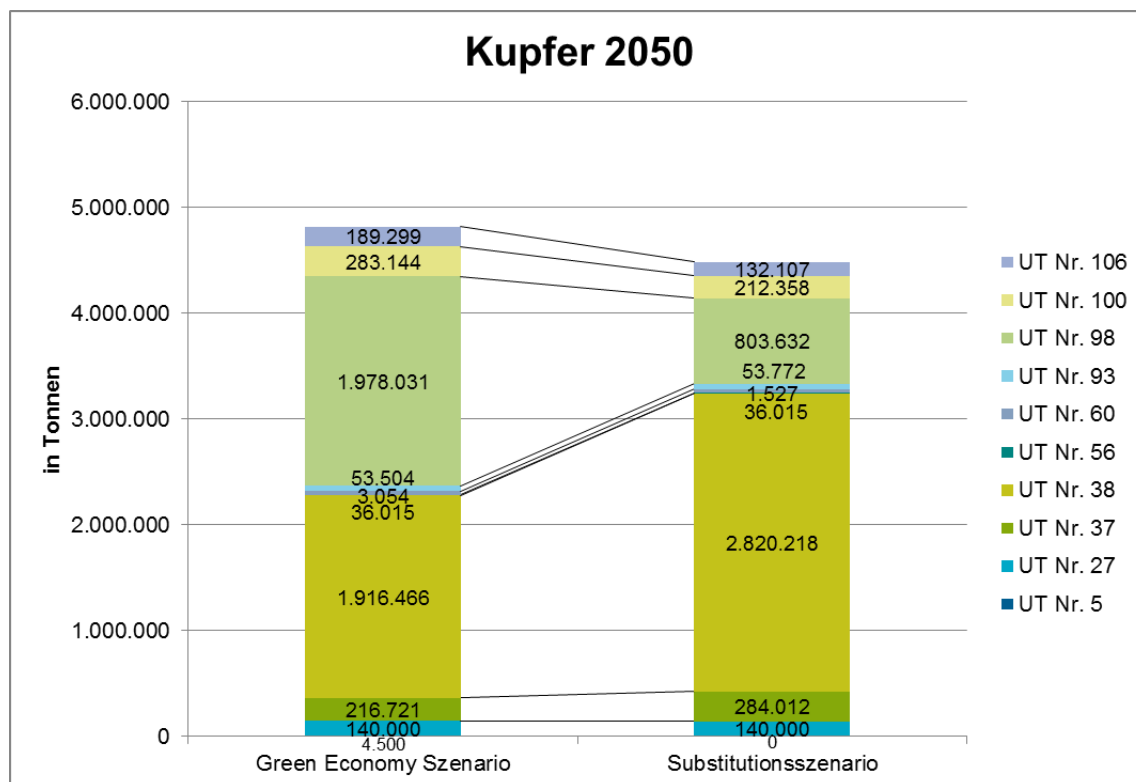
Abbildung 4-26: Kupferbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2025



Quelle: Eigene Abbildung

In 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario bei 7 % bzw. knapp 340.000 t (siehe Abbildung 4-27). Die größten Einsparpotentiale liegen in 2050 bei UT Nr. 98 (Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen) mit ca. 1.200.000 t. Ein Kupfer-Mehrbedarf verzeichnet v.a. UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotoren) mit rund 900.000 t.

Abbildung 4-27: Kupferbedarf der betrachteten Umwelttechnologien im Green-Economy- und Substitutionsszenario in 2050



Quelle: Eigene Abbildung

5 Kritikalitätsentwicklung

Der Gesamtscore gibt eine Gesamtaussage über die Kritikalität der relevanten Rohstoffe in den 40 Umwelttechnologien, welche in AP 3 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 % der globalen Primärförderung in 2013 entspricht. Im Substitutionsszenario sind im Vergleich zum Green-Economy-Szenario zwei zusätzliche Rohstoffe als relevant eingestuft: Kobalt und Vanadium. Daher liegen in der folgenden Analyse 23 Rohstoffe im Fokus.

Die Herleitung des Gesamtscores ist in Kapitel 2 (Methodik) 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 ist der Gesamtscore der relevanten Rohstoffe zum einen für das Green-Economy-Szenario und zum anderen für das Substitutionsszenario in 2025 und 2050 ausgewiesen. Der Gesamtscore für das Green-Economy-Szenario und das Substitutionsszenario ist am Ende der Tabelle ausgewiesen. In diesen 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 %. Die absoluten und prozentualen Veränderungen der Kritikalitätsentwicklung der einzelnen Rohstoffe sind in Tabelle 32 ausgewiesen. Dieser Vergleich zeigt, dass nach dem heutigen Stand die Kritikalität der relevanten Rohstoffe für die ausgewählten Umwelttechnologien nur begrenzt reduziert werden kann.

Tabelle 31: Gesamtscore Substitutionsszenario versus Green-Economy-Szenario

	Substitutionsszenario		Green-Economy-Szenario	
	2025	2050	2025	2050
Cer	0,42	0,41	0,43	0,42
Dysprosium	16,73	43,18	24,96	123,46
Gallium	7,06	6,24	7,81	12,86
Gold	1,10	1,02	1,13	1,24
Indium	4,59	3,52	4,65	3,36
Iridium	110,34	213,78	110,34	213,78
Kobalt	0,19	0,47	0,01	0,04
Kupfer	0,73	2,13	0,76	2,25
Lithium	3,09	12,49	3,17	16,06
Magnesium	0,08	0,55	0,08	0,55
Mangan	0,02	0,07	0,02	0,09
Neodym	2,35	5,81	2,83	13,76
Palladium	157,81	248,95	166,75	266,25
Platin	67,81	164,33	58,24	73,71
Praseodym	2,04	5,14	2,48	12,48
Rhodium	151,89	249,28	153,11	251,63
Ruthenium	127,80	238,80	127,80	238,80
Silber	9,78	14,46	11,55	20,01
Silizium (Metall)	0,36	0,49	0,36	0,49
Terbium	26,16	70,89	37,51	186,11
Vanadium	1,20	5,04	0,00	0,00
Zinn	4,16	5,23	4,73	9,73
Titan als TiO ₂	0,13	0,64	0,13	0,83
GESAMTSCORE	695,9	1.292,9	718,9	1.447,9

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 %)	
	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 %
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 %

6 Fazit / Zusammenfassung

In diesem Arbeitspaket (AP 5 Kritikalitätsauswirkungen) wurden die Auswirkungen eines Substitutionsszenarios für die 40 Umwelttechnologien im Fokus auf die Bedarfe der relevanten Rohstoffe betrachtet. Statt der 20 im vorigen AP ausgewählten Umwelttechnologien wurden hier nur 14 näher betrachtet. Diese 14 UTs zeichnen sich einerseits durch einen relevanten Rohstoffbedarf kritischer Materialien und andererseits durch diverse realisierbare Substitutionsalternativen aus. Die Begründung für den Ausschluss der übrigen sechs findet sich in Kapitel 3.1. Zum einen wurden für diese 14 ausgewählten Umwelttechnologien die Rohstoffbedarfe in einem Substitutionsszenario abgeschätzt (Kapitel 3 und Kapitel 4). Zum anderen wurde ein übergeordneter Kritikalitätsscore (Versorgungsrisiko, ökologisches Schadenspotential und strategische Bedeutung) je relevantem Rohstoff und des Gesamtszenarios von 40 Umwelttechnologien ermittelt (Kapitel 5).

Der umfassende Blick auf den übergreifenden Gesamtscore der zwei untersuchten Szenarien „Green-Economy“ und „Substitution“ der 40 Umwelttechnologien gibt einen Überblick über die Kritikalität der Rohstoffe. Dieser übergeordnete Score zeigt zwar, dass eine Reduktion der Kritikalität durch Substitutionen möglich ist; diese aber nur begrenzte Reduktionen zur Folge hat (-3 % in 2025; -11 % in 2050).

Daher ist die Betrachtung der einzelnen Umwelttechnologien von Bedeutung. Beim Blick auf die einzelnen untersuchten Umwelttechnologien ist zu erkennen, 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:

- ▶ RFID (UT Nr. 5): Deutliche Reduktion von Kupfer und Silber in 2025 und 2050
- ▶ Weiße LED (UT Nr. 27): Deutliche Reduktion von Cer in 2025 (-60 %)
- ▶ Hybridmotoren (UT Nr. 37): Deutliche Reduktion von Dysprosium und Terbium in 2025 (-55 %)
- ▶ Elektromotoren in BEV und PHEV (UT Nr. 38): Deutliche Reduktion von Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium in 2050 (-64 %)
- ▶ Permanentmagnete in Windkraftanlagen (UT Nr. 106): 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-PV (UT Nr. 87), 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.

Im nun folgenden Arbeitspaket 6 wird eine Roadmap entwickelt, wie die identifizierten relevanten Substitutionsmöglichkeiten konkret unterstützt und umgesetzt werden können.

7 Anhang

Im folgenden Anhang 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.

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
	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
	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
Li	UT Nr. 98	73.715	315.676	74.459	404.713	-1%	-22%	-745	-89.037
	UT Nr. 100	7.833	13.514	9.215	19.305	-15%	-30%	-1.382	-5.792
	Gesamt Li	81.547	329.190	83.674	424.018	-3%	-22%	-2.127	-94.828

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
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
Rh	UT Nr. 43	35	33	35	34	-1,7%	-3%	-0,6	-1,1
Si	UT Nr. 5	100	100	100	100	0,0%	0%	0	0
	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