

TEXTE

03/2019

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

Arbeitsbericht 2: Abschätzung des Materialbedarfs der 40 prioritären Umwelttechnologien in den Szenarien Business-As-Usual und Green-Economy

TEXTE 03/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 93 316 0
UBA-FB 002705/ANH,2

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

Arbeitsbericht 2: Abschätzung des Materialbedarfs der 40 prioritären
Umwelttechnologien in den Szenarien Business-As-Usual und Green-
Economy

von

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

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

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

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

Abschlussdatum:

Dezember 2015

Redaktion:

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

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

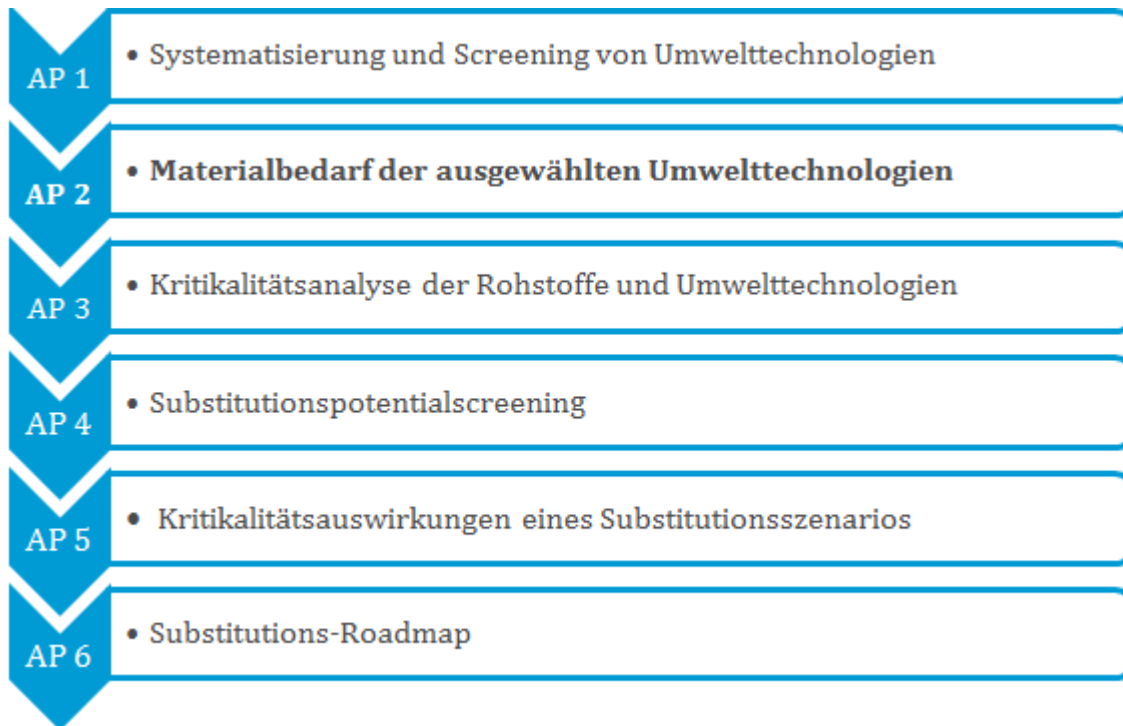
Dessau-Roßlau, Januar 2019

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

Einordnung des Arbeitsberichtes 2:

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 2 weist den Materialbedarf der 40 prioritären Umwelttechnologien in den Szenarien Green Economy und Business-As-Usual aus. Hierzu werden zum einen die Umwelttechnologien einzeln vorgestellt mit einer allgemeinen Technologiebeschreibung und der gewählten spezifischen Einheit für die Hochrechnung. Ebenso wird der Materialbedarf je spezifischer Einheit und absolut in den Stützjahren 2013, 2025 und 2050 sowie die nationale und globale Marktentwicklung beschrieben. Neben der Untersuchung der einzelnen Umwelttechnologien wird ein Überblick über die relevanten Rohstoffe in den untersuchten Umwelttechnologien zusammengestellt.

Anmerkung: Der Arbeitsbericht stellt den aktuellen Stand zur Abgabe des Berichtes (Dezember 2015) dar.

Übersicht der 40 Umwelttechnologien*

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

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

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	19
Tabellenverzeichnis	22
Abkürzungsverzeichnis	30
1 Ziele des 2. Arbeitspakets	32
2 Materialbedarfe der 40 Umwelttechnologien.....	33
2.1 Umwelttechnologien im Leitmarkt Umweltfreundliche Energien & Speicherung.....	33
2.1.1 UT Nr. 83: „Kraftwerke – GuD/Gas“	34
2.1.1.1 Technologiebeschreibung	34
2.1.1.2 Spezifische Einheit	35
2.1.1.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	35
2.1.1.4 Nationale und globale Marktentwicklung	36
2.1.1.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	37
2.1.1.6 Weiterer Untersuchungsbedarf	38
2.1.1.7 Quellen	38
2.1.2 UT Nr. 87: „Dünnschicht-Solarzellen“	38
2.1.2.1 Technologiebeschreibung	38
2.1.2.2 Spezifische Einheit	39
2.1.2.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	39
2.1.2.4 Nationale und globale Marktentwicklung	41
2.1.2.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	46
2.1.2.6 Weiterer Untersuchungsbedarf	46
2.1.2.7 Quellen	47
2.1.3 UT Nr. 90: „Tandemzellen“	47
2.1.3.1 Technologiebeschreibung	47
2.1.3.2 Spezifische Einheit	48
2.1.3.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	48
2.1.3.4 Nationale und globale Marktentwicklung	49
2.1.3.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	52
2.1.3.6 Weiterer Untersuchungsbedarf	52
2.1.3.7 Quellen	53
2.1.4 UT Nr. 91: „Si-Dickschichtzellen“	53
2.1.4.1 Technologiebeschreibung	53
2.1.4.2 Spezifische Einheit	53

2.1.4.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	53
2.1.4.4	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	55
2.1.4.5	Weiterer Untersuchungsbedarf	56
2.1.4.6	Quellen	56
2.1.5	UT Nr. 93: „CSP-Technologie“	56
2.1.5.1	Technologiebeschreibung	56
2.1.5.2	Spezifische Einheit	58
2.1.5.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	58
2.1.5.4	Nationale und globale Marktentwicklung	60
2.1.5.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	61
2.1.5.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	62
2.1.5.7	Quellen	62
2.1.6	UT Nr. 98: „Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge“	63
2.1.6.1	Technologiebeschreibung	63
2.1.6.2	Spezifische Einheit	64
2.1.6.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	64
2.1.6.4	Nationale und globale Marktentwicklung	66
2.1.6.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	68
2.1.6.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	69
2.1.6.7	Quellen	69
2.1.7	UT Nr. 100: „Lithium-Ionen-Stromspeicher“	70
2.1.7.1	Technologiebeschreibung	70
2.1.7.2	Spezifische Einheit	70
2.1.7.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	70
2.1.7.4	Nationale und globale Marktentwicklung	71
2.1.7.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	76
2.1.7.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	76
2.1.7.7	Quellen	77
2.1.8	UT Nr. 105: „Speicherkraftwerke“	77
2.1.8.1	Technologiebeschreibung	77
2.1.8.2	Spezifische Einheit	78
2.1.8.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	78
2.1.8.4	Nationale und globale Marktentwicklung	79

2.1.8.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	82
2.1.8.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	83
2.1.8.7	Quellen	83
2.1.9	UT Nr. 106: Permanentmagnet-Generator	84
2.1.9.1	Technologiebeschreibung	84
2.1.9.2	Spezifische Einheit	84
2.1.9.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	84
2.1.9.4	Nationale und globale Marktentwicklung	85
2.1.9.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	88
2.1.9.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	89
2.1.9.7	Quellen	89
2.1.10	UT Nr. 107: „Synchron-Generatoren“	89
2.1.10.1	Technologiebeschreibung	89
2.1.10.2	Spezifische Einheit	89
2.1.10.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	89
2.1.10.4	Nationale und globale Marktentwicklung	90
2.1.10.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	90
2.1.10.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	91
2.1.10.7	Quellen	91
2.1.11	UT Nr. 108: „Asynchron-Generatoren“	91
2.1.11.1	Technologiebeschreibung	91
2.1.11.2	Spezifische Einheit	92
2.1.11.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	92
2.1.11.4	Nationale und globale Marktentwicklung	92
2.1.11.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	93
2.1.11.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	93
2.1.11.7	Quellen	93
2.1.12	UT Nr. 110: „Reluktanzgeneratoren“	94
2.1.12.1	Technologiebeschreibung	94
2.1.12.2	Spezifische Einheit	94
2.1.12.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	94
2.1.12.4	Nationale und globale Marktentwicklung	94
2.1.12.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	94

2.1.12.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	95
2.1.12.7	Quellen	95
2.1.13	UT Nr. 111: „HTS-Generatoren“	95
2.1.13.1	Technologiebeschreibung	95
2.1.13.2	Spezifische Einheit	95
2.1.13.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	95
2.1.13.4	Nationale und globale Marktentwicklung	96
2.1.13.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	97
2.1.13.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	97
2.1.13.7	Quellen	97
2.2	Umwelttechnologien im Leitmarkt Energieeffizienz	97
2.2.1	UT Nr. 2: „Kompressoren“	100
2.2.1.1	Technologiebeschreibung	100
2.2.1.2	Spezifische Einheit	101
2.2.1.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	101
2.2.1.4	Nationale und globale Marktentwicklung	102
2.2.1.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	102
2.2.1.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	102
2.2.1.7	Quellen	102
2.2.2	UT Nr. 5: „RFID“	103
2.2.2.1	Technologiebeschreibung	103
2.2.2.2	Spezifische Einheit	105
2.2.2.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	106
2.2.2.4	Nationale und globale Marktentwicklung	106
2.2.2.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	108
2.2.2.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	109
2.2.2.7	Quellen	109
2.2.3	UT Nr. 8: „Aerogele“	110
2.2.3.1	Technologiebeschreibung	110
2.2.3.2	Spezifische Einheit	110
2.2.3.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	110
2.2.3.4	Nationale und globale Marktentwicklung	110
2.2.3.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	111

2.2.3.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	111
2.2.3.7	Quellen	111
2.2.4	UT Nr. 12: „Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle“	111
2.2.4.1	Technologiebeschreibung	111
2.2.4.2	Spezifische Einheit	114
2.2.4.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	114
2.2.4.4	Nationale und globale Marktentwicklung	114
2.2.4.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	114
2.2.4.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	115
2.2.4.7	Quellen	115
2.2.5	UT Nr. 13 b: „Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode“	115
2.2.5.1	Technologiebeschreibung	115
2.2.5.2	Spezifische Einheit	116
2.2.5.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	116
2.2.5.4	Nationale und globale Marktentwicklung	116
2.2.5.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	117
2.2.5.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	117
2.2.5.7	Quellen	118
2.2.6	UT Nr. 16: „Celitement“	118
2.2.6.1	Technologiebeschreibung	118
2.2.6.2	Spezifische Einheit	118
2.2.6.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	118
2.2.6.4	Nationale und globale Marktentwicklung	119
2.2.6.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	119
2.2.6.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	119
2.2.6.7	Quellen	119
2.2.7	UT Nr. 24: „Rechenzentren“	119
2.2.7.1	Technologiebeschreibung	119
2.2.7.2	Spezifische Einheit	120
2.2.7.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	121
2.2.7.4	Nationale und globale Marktentwicklung	122
2.2.7.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	125
2.2.7.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	130

2.2.7.7	Quellen	130
2.2.8	UT Nr. 26: „Weiße OLED“	130
2.2.8.1	Technologiebeschreibung	130
2.2.8.2	Spezifische Einheit	133
2.2.8.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	134
2.2.8.4	Nationale und globale Marktentwicklung	134
2.2.8.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	135
2.2.8.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	135
2.2.8.7	Quellen	135
2.2.9	UT Nr. 27: „Weiße LED“	136
2.2.9.1	Technologiebeschreibung	136
2.2.9.2	Spezifische Einheit	141
2.2.9.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	142
2.2.9.4	Nationale und globale Marktentwicklung	142
2.2.9.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	144
2.2.9.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	145
2.2.9.7	Quellen	145
2.3	Umwelttechnologien im Leitmarkt Rohstoff- & Materialeffizienz	146
2.3.1	UT Nr. 53: „Maßgeschneiderte Katalysatoren“	148
2.3.1.1	Technologiebeschreibung	148
2.3.1.2	Spezifische Einheit	149
2.3.1.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	149
2.3.1.4	Nationale und globale Marktentwicklung	149
2.3.1.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	150
2.3.1.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	152
2.3.1.7	Quellen	152
2.3.2	UT Nr. 56: „Bleifreie Lote“	152
2.3.2.1	Technologiebeschreibung	152
2.3.2.2	Spezifische Einheit	153
2.3.2.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	153
2.3.2.4	Nationale und globale Marktentwicklung	153
2.3.2.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	154
2.3.2.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	155

2.3.2.7	Quellen	155
2.3.3	UT Nr. 60: „Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen“	156
2.3.3.1	Technologiebeschreibung	156
2.3.3.2	Spezifische Einheit	156
2.3.3.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	156
2.3.3.4	Nationale und globale Marktentwicklung	156
2.3.3.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	156
2.3.3.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	157
2.3.3.7	Quellen	158
2.3.4	UT Nr. 67: „Nanobeschichtung von Oberflächen“	158
2.3.4.1	Technologiebeschreibung	158
2.3.4.2	Spezifische Einheit	158
2.3.4.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	158
2.3.4.4	Nationale und globale Marktentwicklung	158
2.3.4.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	158
2.3.4.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	158
2.3.4.7	Quellen	158
2.3.5	UT Nr. 68: „Precision Farming“	159
2.3.5.1	Technologiebeschreibung	159
2.3.5.2	Spezifische Einheit	159
2.3.5.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	160
2.3.5.4	Nationale und globale Marktentwicklung	161
2.3.5.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	161
2.3.5.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	161
2.3.5.7	Quellen	162
2.3.6	UT Nr. 70: „Sensoren für die Schlackenaufbereitung“	162
2.3.6.1	Technologiebeschreibung	162
2.3.6.2	Spezifische Einheit	163
2.3.6.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	163
2.3.6.4	Nationale und globale Marktentwicklung	163
2.3.6.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	163
2.3.6.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	163
2.3.6.7	Quellen	163

2.4	Umwelttechnologien im Leitmarkt Nachhaltige Mobilität	163
2.4.1	UT Nr. 35: „Pedelects“	165
2.4.1.1	Technologiebeschreibung	165
2.4.1.2	Spezifische Einheit	165
2.4.1.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	166
2.4.1.4	Nationale und globale Marktentwicklung	166
2.4.1.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	166
2.4.1.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	168
2.4.1.7	Quellen	168
2.4.2	UT Nr. 37: „Hybridmotoren“	169
2.4.2.1	Technologiebeschreibung	169
2.4.2.2	Spezifische Einheit	169
2.4.2.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	169
2.4.2.4	Nationale und globale Marktentwicklung	170
2.4.2.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	170
2.4.2.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	171
2.4.2.7	Quellen	171
2.4.3	UT Nr. 38: „Elektroantriebsmotoren“	172
2.4.3.1	Technologiebeschreibung	172
2.4.3.2	Spezifische Einheit	172
2.4.3.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	172
2.4.3.4	Nationale und globale Marktentwicklung	173
2.4.3.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	173
2.4.3.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	174
2.4.3.7	Quellen	174
2.4.4	UT Nr. 39: „Karosserie“	175
2.4.4.1	Technologiebeschreibung	175
2.4.4.2	Spezifische Einheit	175
2.4.4.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	175
2.4.4.4	Nationale und globale Marktentwicklung	176
2.4.4.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	177
2.4.4.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	177
2.4.4.7	Quellen	178

2.4.5	UT Nr. 40: „Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke“	178
2.4.5.1	Technologiebeschreibung	178
2.4.5.2	Spezifische Einheit	178
2.4.5.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	178
2.4.5.4	Nationale und globale Marktentwicklung	179
2.4.5.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	179
2.4.5.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	179
2.4.5.7	Quellen	179
2.4.6	UT Nr. 41: „Leichtbau – Titan und Sc.-Airframe“	180
2.4.6.1	Technologiebeschreibung	180
2.4.6.2	Spezifische Einheit	180
2.4.6.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	180
2.4.6.4	Nationale und globale Marktentwicklung	180
2.4.6.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	181
2.4.6.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	181
2.4.6.7	Quellen	181
2.4.7	UT Nr. 43: „Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren“	181
2.4.7.1	Technologiebeschreibung	181
2.4.7.2	Spezifische Einheit	182
2.4.7.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	182
2.4.7.4	Nationale und globale Marktentwicklung	182
2.4.7.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	183
2.4.7.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	184
2.4.7.7	Quellen	184
2.5	Umwelttechnologien im Leitmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft.....	185
2.5.1	UT Nr. 48: „Dezentrale Wasseraufbereitung“	187
2.5.1.1	Technologiebeschreibung	187
2.5.1.2	Spezifische Einheit	187
2.5.1.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	187
2.5.1.4	Nationale und globale Marktentwicklung	189
2.5.1.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	190
2.5.1.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	190
2.5.1.7	Quellen	190

2.5.2	UT Nr. 49.b: „Wassereffizienztechnologien“	191
2.5.2.1	Technologiebeschreibung	191
2.5.2.2	Spezifische Einheit	191
2.5.2.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	191
2.5.2.4	Nationale und globale Marktentwicklung	193
2.5.2.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	194
2.5.2.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	194
2.5.2.7	Quellen	194
2.5.3	UT Nr. 50 + Nr. 51: „Membrantechnik“	194
2.5.3.1	Technologiebeschreibung	194
2.5.3.2	Spezifische Einheit	195
2.5.3.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	195
2.5.3.4	Nationale und globale Marktentwicklung	197
2.5.3.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	200
2.5.3.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	200
2.5.3.7	Quellen	201
2.5.4	UT Nr. 52: „Phosphorrückgewinnung“	201
2.5.4.1	Technologiebeschreibung	201
2.5.4.2	Spezifische Einheit	203
2.5.4.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	203
2.5.4.4	Nationale und globale Marktentwicklung	204
2.5.4.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	207
2.5.4.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	208
2.5.4.7	Quellen	208
2.6	Umwelttechnologien im Leitmarkt Kreislaufwirtschaft.....	209
2.6.1	UT Nr. 33: „Automatische Stofftrennverfahren“	210
2.6.1.1	Technologiebeschreibung	210
2.6.1.2	Spezifische Einheit	211
2.6.1.3	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050	212
2.6.1.4	Nationale und globale Marktentwicklung	212
2.6.1.5	Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario	212
2.6.1.6	Weiterer Untersuchungsbedarf	212
2.6.1.7	Quellen	213

3	Nationale und internationale Szenario-Ergebnisse ausgewählter Rohstoffe.....	214
3.1	Dysprosium	214
3.2	Gallium	215
3.3	Indium	217
3.4	Lithium	218
3.5	Neodym.....	220
3.6	Palladium	221
3.7	Rhodium.....	223
3.8	Silber	224
3.9	Kupfer	226
3.10	Zinn	227
4	Schlussfolgerungen / Empfehlungen	229
5	Anhang 1: Materialien im Fokus AP 2.....	231

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Entwicklung des globalen Marktvolumens für Umweltfreundliche Energien & Speicherung in Mrd. Euro und jahresdurchschnittliche Wachstumsraten 2013 bis 2025 in %	33
Abbildung 2-2:	Weltmarktanteile deutscher Firmen im Leitmarkt Umweltfreundliche Energien & Speicherung 2013 und Trend bis 2025	34
Abbildung 2-3:	Entwicklung der Modulwirkungsgrade verschiedener PV	39
Abbildung 2-4:	Kapazitätsneubau und installierte Kapazität der Photovoltaik gesamt in Deutschland	43
Abbildung 2-5:	Entwicklung von Wirkungsgraden auf Zell-, Modul- und Systemebene.....	48
Abbildung 2-6:	Aufbau einer GaInP/GaInAs/Ge-Dreifachsolarzelle.....	49
Abbildung 2-7:	Errichtete Kapazität an CPV-Anlagen weltweit	50
Abbildung 2-8:	Stromgestehungskosten in Regionen mit einer Sonneneinstrahlung von 2000 - 2500 kWh/m ² a).....	51
Abbildung 2-9:	Halbleiter-Schichtdicken von Si-Dickschichtzellen	54
Abbildung 2-10:	Abhängigkeit der Teil- und des Gesamtwirkungsgrad von der Temperatur	57
Abbildung 2-11:	Qualitativer Vergleich verschiedener Energiespeicher für den Einsatz in der Elektromobilität (DSK: Doppelschichtkondensator; LA: Blei-Säure-Batterie).....	63
Abbildung 2-12:	Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batterie	64
Abbildung 2-13:	Prognose des Einflusses verschiedener Politikmaßnahmen	67
Abbildung 2-14:	Übersicht - Szenarien zum Markt der Elektromobilität.....	68
Abbildung 2-24:	2014 installierte Batteriekapazitäten am Netz.....	74
Abbildung 2-25:	Prognose installierter Batteriespeicher am Netz weltweit (IRENA, 2015)	75
Abbildung 2-17:	Größenentwicklung von WKA in Deutschland onshore	86
Abbildung 2-18:	Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Energieeffizienz 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)	98
Abbildung 2-19:	Entwicklung des Marktvolumens in Deutschland 2013-2025 – Leitmarkt Energieeffizienz (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)	99
Abbildung 2-20:	Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Energieeffizienz 2013 und Trend bis 2025.....	100
Abbildung 2-21:	Extrapolation der Anzahl von RFID Tags in Deutschland (pro Jahr)	108
Abbildung 2-22:	Beispiele für leuchtaktive, Iridium-haltige metall-organische Komplexmoleküle in OLEDs	133
Abbildung 2-23:	Materialzusammensetzung von wLED Chips mit 230 mg Masse	140

Abbildung 2-24:	Weltweite Produktion von superhellen wLED Chips in Mrd. mm ²	143
Abbildung 2-25:	Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Rohstoff- und Materialeffizienz 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)	147
Abbildung 2-26:	Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Rohstoff- und Materialeffizienz 2013 und Trend bis 2025	148
Abbildung 2-27:	YARA N-Sensor® auf dem Traktor montiert (Photo: tec 5, 2014; Zusätzlich rote Kreise mit freundlicher Genehmigung von tec5)	160
Abbildung 2-28:	Messkopf am YARA N-Sensor®	160
Abbildung 2-29:	Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Nachhaltige Mobilität 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %).....	164
Abbildung 2-30:	Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Nachhaltige Mobilität 2013 und Trend bis 2025	165
Abbildung 2-31:	Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktmarktes Nachhaltige Wasserwirtschaft 2013 bis 2025 in Mrd. Euro und jahresdurchschnittliches Wachstum in %.....	186
Abbildung 2-32:	Weltmarktanteile deutscher Firmen in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Nachhaltige Wasserwirtschaft 2013 bis 2015.....	187
Abbildung 2-33:	Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Kreislaufwirtschaft 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)	209
Abbildung 2-34:	Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Kreislaufwirtschaft 2013 und Trend bis 2025.....	210
Abbildung 3-1:	Absolute Materialbedarfe Dysprosium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	214
Abbildung 3-2:	Globaler Dysprosiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	215
Abbildung 3-3:	Globaler Dysprosiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	215
Abbildung 3-4:	Absolute Materialbedarfe Gallium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	216
Abbildung 3-5:	Globaler Galliumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	216
Abbildung 3-6:	Globaler Galliumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	217
Abbildung 3-7:	Absolute Materialbedarfe Indium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	217

Abbildung 3-8:	Globaler Indiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	218
Abbildung 3-9:	Globaler Indiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	218
Abbildung 3-10:	Absolute Materialbedarfe Lithium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	219
Abbildung 3-11:	Globaler Lithiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	219
Abbildung 3-12:	Globaler Lithiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	220
Abbildung 3-13:	Absolute Materialbedarfe Neodym [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	220
Abbildung 3-14:	Globaler Neodymbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario.....	221
Abbildung 3-15:	Globaler Neodymbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	221
Abbildung 3-16:	Absolute Materialbedarfe Palladium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	222
Abbildung 3-17:	Globaler Palladiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	222
Abbildung 3-18:	Globaler Palladiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	223
Abbildung 3-19:	Absolute Materialbedarfe Rhodium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	223
Abbildung 3-20:	Globaler Rhodiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario.....	224
Abbildung 3-21:	Globaler Rhodiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	224
Abbildung 3-22:	Absolute Materialbedarfe Silber [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	225
Abbildung 3-23:	Globaler Silberbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	225
Abbildung 3-24:	Globaler Silberbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	226
Abbildung 3-25:	Absolute Materialbedarfe Kupfer [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	226
Abbildung 3-26:	Globaler Kupferbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	227
Abbildung 3-27:	Globaler Kupferbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	227
Abbildung 3-28:	Absolute Materialbedarfe Zinn [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013	228
Abbildung 3-29:	Globaler Zinnbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario	228
Abbildung 3-30:	Globaler Zinnbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario	228

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Spezifische Materialinhalte für ein GuD-Kraftwerk in g pro MW	36
Tabelle 2-2:	Gesamtleistung in Deutschland installierter Gaskraftwerke in GW	36
Tabelle 2-3:	Jährlich installierte Leistung (inklusive Ersatzbauten) in Deutschland in MW	37
Tabelle 2-4:	Weltweit jährlich installierte Kapazität an GuD-Kraftwerken in MW	37
Tabelle 2-5:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 83: „Kraftwerke – GuD/Gas“	37
Tabelle 2-6:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 83: „Kraftwerke – GuD/Gas“	38
Tabelle 2-7:	Spezifischer Materialbedarf für a-Si Dünnschichtzellen in g/kWp	40
Tabelle 2-8:	Spezifischer Materialbedarf für CIGS Dünnschichtzellen in g/kWp	41
Tabelle 2-9:	Spezifischer Materialbedarf für CdTe Dünnschichtzellen in g/kWp	41
Tabelle 2-10:	Marktanteile verschiedener Technologielinien innerhalb der Photovoltaik	42
Tabelle 2-11:	Maximalabschätzung der Marktanteile der Dünnschicht-PV	42
Tabelle 2-12:	Jährliche nationale Neuinstallationen in MWp	44
Tabelle 2-13:	Maximalabschätzung der möglichen Zubauten der Dünnschicht-PV in Deutschland (in MW/a)	44
Tabelle 2-14:	Maximal anzunehmender absoluter Materialbedarf für Dünnschicht- Photovoltaik in Deutschland (in t/a)	44
Tabelle 2-15:	Überblick über die kumulierte installierte Leistung global in GW	45
Tabelle 2-16:	Jährliche globale Neuinstallationen in MWp	45
Tabelle 2-17:	Maximalabschätzung der möglichen Zubauten der Dünnschicht-PV weltweit (in MW/a)	45
Tabelle 2-18:	Maximal anzunehmender absoluter Materialbedarf für Dünnschicht- Photovoltaik weltweit (in t/a)	45
Tabelle 2-19:	Absoluter Materialbedarf für Dünnschicht-Photovoltaik in Deutschland (in t/a)	46
Tabelle 2-20:	Absoluter Materialbedarf der Dünnschicht-Photovoltaik global (in t/a)	46
Tabelle 2-21:	Spezifischer Materialbedarf einer GaInP/GaInAs/Ge-Tandemzellen in g/kWp (500fache Konzentration)	49
Tabelle 2-22:	Marktstudien zu CPV [in eckigen Klammern: selbst berechnete Werte]	51
Tabelle 2-23:	Kumulierte installierte Kapazität weltweit in MW	52
Tabelle 2-24:	Weltweit jährlich installierte Kapazität an CPV in MW (inklusive Ersatzbauten)	52
Tabelle 2-25:	Materialbedarfe für Tandemzellen in Konzentrierenden Photovoltaikanlagen global (in t/a)	52

Tabelle 2-26:	Spezifischer Materialbedarf für Si-Dickschichtzellen in g pro Kilowatt (peak)	54
Tabelle 2-27:	Jährliche nationale Neuinstallationen in MWp	55
Tabelle 2-28:	Globale Neuinstallationen der Photovoltaik und davon Si-Dickschicht in MW/a	55
Tabelle 2-29:	Absolute Materialbedarfe für Silizium-Dickschicht-Solaranlagen in Deutschland (in t/a)	55
Tabelle 2-30:	Absolute Materialbedarfe für Silizium-Dickschicht-Solaranlagen weltweit (in t/a)	56
Tabelle 2-31:	Materialbedarfe eines Parabolrinnenkraftwerks (g/kWp)	59
Tabelle 2-32:	Materialbedarfe eines Turmkraftwerks (g/kWp)	60
Tabelle 2-33:	Überblick über die prognostizierte kumulierte installierte Leistung global in GW	61
Tabelle 2-34:	Neuinstallationen global in GW/a	61
Tabelle 2-35:	Absoluter Materialbedarf für Parabolrinnenkraftwerke global (in t/a)	62
Tabelle 2-36:	Materialinhalte für eine PHEV-Batterie in g	66
Tabelle 2-37:	Materialinhalte für eine BEV-Batterie in g	66
Tabelle 2-38:	Neuzulassungen PHEV und BEV (national)	67
Tabelle 2-39:	Abgesetzte PHEV und BEV (global)	68
Tabelle 2-40:	Absoluter Materialbedarf für Lithium-Ionen-Batterien für BEV und PHEV in Deutschland (in t/a)	69
Tabelle 2-41:	Absoluter Materialbedarf für Lithium-Ionen-Batterien für BEV und PHEV global (in t/a)	69
Tabelle 2-42:	Spezifische Materialbedarfe (in g/kWh)	71
Tabelle 2-43:	Vergleich verschiedener Studien zum Einsatz stationärer Batteriespeicher in Deutschland	72
Tabelle 2-44:	Deutschlandweit installierte Kapazität an stationären LIB (in MWh pro Jahr)	73
Tabelle 2-45:	Vergleich verschiedener Prognosen zum Ausbau stationärer Batteriespeicher weltweit [selbst berechnete Größen]	75
Tabelle 2-46:	Weltweit installierte Kapazität an stationären LIB (in MWh pro Jahr)	76
Tabelle 2-47:	Nationale Materialbedarfe für stationäre Lithium-Ionen-Stromspeicher (in t/a)	76
Tabelle 2-48:	Globale Materialbedarfe für stationäre Lithium-Ionen-Stromspeicher (in t/a)	76
Tabelle 2-49:	Technische Kennzahlen verschiedener Druckluftspeicher-Technologien im Vergleich	78
Tabelle 2-50:	Spezifische Materialbedarfe von Speicherkraftwerken (in g/MW)	79

Tabelle 2-51:	Übersicht - Studien zum Potential von Pumpspeicherkraftwerken (Sternier & Stadler, 2015).....	80
Tabelle 2-52:	Jährliche Installationen von Pumpspeicherkraftwerken in Deutschland (in MW).....	81
Tabelle 2-53:	Übersicht - Studien zum Potential von Druckluftspeichern (Sternier & Stadler, 2015).....	81
Tabelle 2-54:	Jährliche Installationen von Pumpspeicherkraftwerken weltweit in MW/a.....	82
Tabelle 2-55:	Materialbedarf für Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland (in t/a)	83
Tabelle 2-56:	Absolute Materialbedarfe für Pumpspeicherkraftwerke global (in t/a)	83
Tabelle 2-57:	Spezifische Materialbedarfe für Permanentmagnet-Generatoren (in g/kW)	85
Tabelle 2-58:	Installierte Gesamtleistung WKA in Deutschland im Jahr 2050	86
Tabelle 2-59:	Marktanteile der Technologielinien am Markt der WKA im BAU-Szenario	87
Tabelle 2-60:	Marktanteile der Technologielinien am Markt der WKA im Green-Economy-Szenario	87
Tabelle 2-61:	Jährliche Installationen von WKA mit Permanentmagnet-Generatoren in Deutschland in MW/a.....	87
Tabelle 2-62:	Jährliche Installationen von WKA mit Permanentmagnet-Generatoren weltweit in MW/a.....	88
Tabelle 2-63:	Absolute Materialbedarfe für Permanentmagnetgeneratoren in WKA in Deutschland (in t/a)	88
Tabelle 2-64:	Absolute Materialbedarfe für Permanentmagnetgeneratoren in WKA weltweit (in t/a)	88
Tabelle 2-65:	Spezifische Materialbedarfe von Synchrongeneratoren zum Einsatz in WKA	90
Tabelle 2-66:	Jährliche Installationen von WKA mit Synchrongeneratoren in Deutschland in MW/a.....	90
Tabelle 2-67:	Jährliche Installationen von WKA mit Synchrongeneratoren weltweit in MW/a.....	90
Tabelle 2-68:	Absoluter Materialbedarf für Synchrongeneratoren in WKA in Deutschland (in t/a)	91
Tabelle 2-69:	Absoluter Materialbedarf für Synchrongeneratoren in WKA weltweit (in t/a)	91
Tabelle 2-70:	Jährliche Installationen von WKA mit Asynchrongeneratoren in Deutschland in MW/a.....	92
Tabelle 2-71:	Jährliche Installationen von WKA mit Asynchrongeneratoren weltweit in MW/a.....	93
Tabelle 2-72:	Absoluter Materialbedarf für Asynchrongeneratoren in WKA in Deutschland (in t/a)	93

Tabelle 2-73:	Absoluter Materialbedarf für Asynchrongeneratoren in WKA weltweit (in t/a)	93
Tabelle 2-73:	Spezifische Materialbedarfe für Reluktanzgeneratoren in WKA (in g/kW)	94
Tabelle 2-75:	Spezifische Materialbedarf für HTS-Generatoren in WKA (in g/kW)	96
Tabelle 2-76:	Absoluter Materialbedarf für HTS-Generatoren in WKA in Deutschland (in t/a)	96
Tabelle 2-77:	Absoluter Materialbedarf für HTS-Generatoren in WKA weltweit (in t/a)	96
Tabelle 2-78:	Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (1 kW installierte Kompressor-Motorenleistung) – Eigene Annahmen	101
Tabelle 2-79:	Zusammensetzung typischer RFID Tags basierend auf ISO/IEC TR 24729-2:2007	104
Tabelle 2-80:	Prognose der RFID Antennenmaterialien im UHF Bereich (868/915 MHz)	104
Tabelle 2-81:	Zusammensetzung eines RFID Tags (Beispiel)	105
Tabelle 2-82:	Materialbedarf für eine durchschnittliche Variante eines RFID Tags von 32 cm ²	105
Tabelle 2-83:	Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU)	106
Tabelle 2-84:	Marktpotentiale je Marktsegment nach (Erdmann et al. 2009)	106
Tabelle 2-85:	Szenarien der RFID Marktentwicklung nach (Erdmann et al. 2009)	107
Tabelle 2-86:	Prognosen (aus Literatur) und Trendextrapolation	107
Tabelle 2-87:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 5: „RFID“	108
Tabelle 2-88:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 5: „RFID“	109
Tabelle 2-89:	Extrapolation des Materialbedarfs für 32 cm ² RFID Tags in Deutschland	109
Tabelle 2-90:	Zusammensetzung eines Sol-Gels mit Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid Nanomaterialien	113
Tabelle 2-91:	Zusammensetzung eines Sol-Gels mit Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid Nanomaterialien (verwendetes Edukt)	113
Tabelle 2-92:	Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU)	114
Tabelle 2-93:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 12: „Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle“	114
Tabelle 2-94:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 12: „Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle“	115
Tabelle 2-95:	Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (1 Tonne Chlorgas) – Eigene Annahmen	116
Tabelle 2-96:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 13b: „Sauerstoffverzehrkatode“	117

Tabelle 2-97:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 13b: „Sauerstoffverzehrkathode“	117
Tabelle 2-98:	Referenz-Server-Einheiten (ASU), nach Borderstep 2010	120
Tabelle 2-99:	Entwicklung der globalen Serverzahlen (2008 – 2050) (Basis Szenario)	121
Tabelle 2-100:	Entwicklung der globalen Serverzahlen (2008 – 2050) (Green Economy)	122
Tabelle 2-101:	Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU) – Eigene Annahmen.....	122
Tabelle 2-102:	Entwicklung der Serverzahlen (2008 – 2050) in Deutschland (Business-As-Usual)	124
Tabelle 2-103:	Entwicklung der Serverzahlen (2008 – 2050) in Deutschland (Green Economy)	125
Tabelle 2-104:	Schritte zur Berechnung des Materialbedarfs der Rechenzentren	125
Tabelle 2-105:	Entwicklung des Materialbedarfs in Rechenzentren in Deutschland (2013-2050)	127
Tabelle 2-106:	Entwicklung des globalen Materialbedarfs in Rechenzentren (2013- 2050).....	129
Tabelle 2-107:	Berechneter Materialbedarf für wOLED Leuchtmittel zur Erzeugung von einem 800 Lumen Lichtstrom	132
Tabelle 2-108:	Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU).....	134
Tabelle 2-109:	Marktentwicklung im Sektor wOLED Beleuchtung.....	134
Tabelle 2-110:	Zusammensetzung eines typischen gelben Leuchtstoffs einer wLED (dye) (je Rohstoff)	137
Tabelle 2-111:	Zusammensetzung eines typischen gelben Leuchtstoffs einer wLED (dye).....	137
Tabelle 2-112:	Liste von Komponenten und Materialien in wLED Leuchtmitteln nach Hendrickson (2010).....	138
Tabelle 2-113:	Liste von Komponenten und Materialien in LED Leuchtmitteln nach Olivetti et al. (2012)	139
Tabelle 2-114:	Materialzusammensetzung eines wLED Leuchtmittels	139
Tabelle 2-115:	Typischer Gehalt eines wLED Chips an kritischen Metallen	140
Tabelle 2-116:	Konzentration von Metallen in Leiterplatten aus Netzteilen	140
Tabelle 2-117:	Berechneter Materialbedarf für ein 800 Lumen wLED Leuchtmittel mit E27 Fassung	141
Tabelle 2-118:	Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU).....	142
Tabelle 2-119:	Globale Marktentwicklung im Sektor wLED Beleuchtung (abgeleitet von Trends in den USA)	143
Tabelle 2-120:	Szenario zur EU-Marktentwicklung bei wLED Leuchtmitteln	144
Tabelle 2-121:	Prognose der Marktanteile für wLED Leuchtmittel nach Deubzer et al. (2012).....	144

Tabelle 2-122:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 27: „Weiße LED“	144
Tabelle 2-123:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 27: „Weiße LED“	145
Tabelle 2-124:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 53: „Maßgeschneiderte Katalysatoren“	151
Tabelle 2-128:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 53: „Maßgeschneiderte Katalysatoren“	152
Tabelle 2-126:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 56: „Bleifreie Lote“	154
Tabelle 2-127:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 56: „Bleifreie Lote“	155
Tabelle 2-131:	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050 (Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen).....	156
Tabelle 2-129:	Nationale Absatzzahlen nach BAU- und Green-Economy-Szenario	157
Tabelle 2-133:	Globale Absatzzahlen nach BAU- und Green-Economy-Szenario	157
Tabelle 2-131:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 60: „Hochleistungs- Permanentmagnete: übrige Anwendungen“	157
Tabelle 2-132:	Absoluter Materialbedarf je global (in t): UT Nr. 60: „Hochleistungs- Permanentmagnete: übrige Anwendungen“	157
Tabelle 2-133:	Materialbedarf je Pedelec	166
Tabelle 2-134:	Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario.....	167
Tabelle 2-135:	Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario	167
Tabelle 2-136:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 35: „Pedelects“	168
Tabelle 2-137:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 35: „Pedelects“	168
Tabelle 2-138 :	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050.....	169
Tabelle 2-139:	Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario.....	170
Tabelle 2-140:	Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario	171
Tabelle 2-141:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 37: „Hybridmotoren“	171
Tabelle 2-142:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 37: „Hybridmotoren“	171
Tabelle 2-143:	Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050.....	173
Tabelle 2-144:	Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario.....	173
Tabelle 2-145:	Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario	174
Tabelle 2-146:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 38: „Elektroantriebsmotoren“	174
Tabelle 2-147:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 38: „Elektroantriebsmotoren“	174
Tabelle 2-148:	Bedarf Mangan und Silizium in einem durchschnittlichen PKW (spezifische Einheit) 2013, 2025, 2050	175
Tabelle 2-149:	Annahmen zur nationalen Pkw-Zulassung und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Basisszenario für 2013, 2015, 2050	176

Tabelle 2-150:	Annahmen zur globalen Pkw Produktion und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Basisszenario für 2013, 2015, 2050	176
Tabelle 2-151:	Annahmen zur nationalen Pkw-Zulassung und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Green-Economy-Szenario für 2013, 2015, 2050	177
Tabelle 2-152:	Annahmen zur globalen Pkw-Produktion und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Green-Economy-Szenario für 2013, 2015, 2050	177
Tabelle 2-153:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 39: „Karosserie“	177
Tabelle 2-154:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 39: „Karosserie“	177
Tabelle 2-155:	Spezifischer Rohstoffbedarf UT Nr. 40 „Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke“	179
Tabelle 2-156:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 40: „AC-Triebwerke“	179
Tabelle 2-157:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 40: „AC-Triebwerke“	179
Tabelle 2-158:	Spezifischer Rohstoffbedarf für UT Nr. 41 „Leichtbau – Titan und Sc.-Airframe“	180
Tabelle 2-159:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 41: „Leichtbau“	181
Tabelle 2-160:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 41: „Leichtbau“	181
Tabelle 2-161:	Spezifischer Rohstoffbedarf für UT Nr. 43 „Fahrzeug-Abgas-Katalysator“	182
Tabelle 2-162:	Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario.....	183
Tabelle 2-163:	Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario	184
Tabelle 2-164:	Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 43: „Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren“	184
Tabelle 2-165:	Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 43: „Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren“	184
Tabelle 2-166:	Materialzusammensetzung von Kleinkläranagen.....	189
Tabelle 2-167:	Kleinkläranlagen - Markteinschätzungen für Deutschland.....	190
Tabelle 2-168:	Kleinkläranlagen - Markteinschätzungen weltweit	190
Tabelle 2-169:	Materialien für intelligente Wasserzähler.....	192
Tabelle 2-170:	Spezifischer Materialbedarf von intelligenten Wasserzählern.....	192
Tabelle 2-171:	Intelligente Wasserzähler - Markteinschätzungen für Deutschland	193
Tabelle 2-172:	Intelligente Wasserzähler - Markteinschätzungen weltweit.....	194
Tabelle 2-173:	Membranmaterialien für verschiedene Membranverfahren.....	195
Tabelle 2-174:	Materialbedarf für Membrantechnik – verschiedene Indikatoren	196
Tabelle 2-175:	Spezifischer Materialbedarf für keramische Filtrationsmembranen	197
Tabelle 2-176:	Membrantechnik - Markteinschätzungen für Deutschland	198
Tabelle 2-177:	Membranbelebungsanlagen weltweit.....	198

Tabelle 2-178:	Membrantechnik - Markteinschätzungen weltweit	199
Tabelle 2-179:	Weltweit installierte Kapazitäten keramischer Membrantechnologie in m ³ /d pro Jahr	200
Tabelle 2-180:	Materialbedarf für Membrantechnik weltweit	200
Tabelle 2-181:	Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung	202
Tabelle 2-182:	Chemische Mittel bei der Phosphor-Rückgewinnung	203
Tabelle 2-183:	Spezifischer Materialbedarf von Anlagen zur Phosphor- Rückgewinnung.....	204
Tabelle 2-184:	Phosphorrückgewinnung - Markteinschätzungen für Deutschland	206
Tabelle 2-185:	Rezyklierte Menge Phosphor in t in Deutschland.....	206
Tabelle 2-186:	Phosphorrückgewinnung - Markteinschätzungen weltweit.....	207
Tabelle 2-187:	Rezyklierte Menge Phosphor weltweit in t	207
Tabelle 2-188:	Materialbedarf für die Phosphorrückgewinnung für Deutschland in t	207
Tabelle 2-189:	Materialbedarf für die Phosphorrückgewinnung weltweit in t.....	208

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ASU	Average Server Unit – Referenz-Server-Einheit
BAU	Business-As-Usual
BEV	Battery Electric Vehicle – vollelektrisches Fahrzeug
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CAES	Compressed Air Energy Storage - Druckluftspeicher
CdTe	Cadmiumtellurid
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CFL	Kompaktfluoreszenzlampe
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Selen
CSP	Concentrated Solar Power
CPV	Concentrated Photovoltaics, konzentrierendes Solarkraftwerk
CZTS	Kupfer-Zink-Zinn-Schwefel-Selen
EW	Einwohner
FCEV	Fuelcell electric vehicle – Brennstoffzellenfahrzeug
g	Gramm
GaAs	Galliumarsenid
GE	Green Economy
GFK	Glass-fibre reinforced plastic – glasfaserverstärkter Kunststoff
GuD	Gas- und Dampfturbinen
GW	Gigawatt
HTS	High temperature superconductor – Hochtemperatursupraleiter
ITO	Indiumzinnoxid
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt, Peak
LCA	Life Cycle Assessment
LED	Light emitting diode – Leuchtdiode
lm	Lumen
Mio	Millionen
MW	Megawatt
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
OLED	Organic light emitting diode – organische Leuchtdiode
PGM	Platingruppenmetalle

PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PMG	Permanentmagnet-Generator
ppm	Parts per million
PSK	Pumpspeicherkraftwerke
REX	Range Extender
RFID	Radio Frequency Identification
SVK	Sauerstoffverzehrkatode
t	Tonnen
t/a	Tonnen pro Jahr
TCO	Transparentes leitfähiges Oxid (transparent conducting oxide)
UT	Umwelttechnologie
V	Volt
WKA	Windkraftanlagen

1 Ziele des 2. Arbeitspakets

Gegenstand dieses zweiten umfangreichen Zwischenberichts von SubSKrit ist die umfangreiche Dokumentation des 2. Arbeitspakets im laufenden Vorhaben. Ziel des 2. Arbeitspakets „Funktionaler Materialbedarf“ von SubSKrit ist die Ermittlung des spezifischen und absoluten Materialbedarfes der in AP1 zuvor als prioritär ausgewählten 40 Umwelttechnologien (UT). Aus 115 Umwelttechnologien wurden im ersten Arbeitsschritt des Projektes 40 Umwelttechnologien als prioritär eingestuft anhand der Kriterien „relatives Umweltentlastungspotential“, „globale Marktdynamik bis 2025“ und „Relevanz für die deutsche Wirtschaft bis 2025“. Die Auswahlmethodik und -entscheidung sind in Arbeitsbericht 1 detailliert beschrieben.

Zur Ermittlung des spezifischen Materialbedarfs wird für jede UT zunächst eine geeignete spezifische Einheit definiert. Bezogen auf diese spezifischen Einheiten wurde aus Recherche von Fachliteratur, eigenen Quellen der Partner sowie Experteninterviews der Materialbedarf je spezifischer Einheit ermittelt. Die Liste der Materialien in der Untersuchung wurde in Abstimmung mit dem UBA für diesen Arbeitsschritt bewusst groß gehalten (Liste der untersuchten Materialien: siehe Anhang). Bei der Erhebung dieser Daten wurde auf den intrinsischen Materialbedarf (in den jeweiligen Komponenten/Technologien etc.) abgehoben; d. h. evtl. zusätzlicher Materialbedarf durch Verarbeitungsrückstände, Produktionsausschuss etc. sind hier nicht berücksichtigt. Weiterhin wurden in diesem Arbeitspaket noch nicht mögliche Sekundärmetallanteile, die für die Deckung des Materialbedarfs u. U. eingesetzt werden, berücksichtigt.

Die entsprechend ermittelten spezifischen Materialbedarfe wurden anschließend ausgehend vom Jahr 2013 für 2025/2050 mit entsprechenden Szenarioannahmen auf nationaler als auch globaler Ebene (jeweils Anzahl spezifischer Einheiten) verbunden. Auf diese Weise wurden für die 40 UT für ein BAU-Szenario als auch für das Green-Economy-Szenario für die nationale als auch die globale Ebene die absoluten Materialbedarfe (in t) ermittelt. Diese differenzierten Ergebnisse sind unterteilt in die sechs Leitmärkte des GreenTech 4.0 Atlas (BMUB 2014) und im folgenden Kapitel 2 ausführlich dokumentiert. Die einzelnen Leitmärkte „Umweltfreundliche Energien & Speicherung“, „Energieeffizienz“, „Rohstoff- & Materialeffizienz“, „Nachhaltige Mobilität“, „Nachhaltige Wasserwirtschaft“ und „Kreislaufwirtschaft“ werden in den Unterkapiteln kurz beschrieben. Die Beschreibungstiefe und der Detaillierungsgrad liegen in den verschiedenen Umwelttechnologien sehr unterschiedlich vor, da die Informationslage der einzelnen UTs sehr unterschiedlich war.

In Abschnitt 3 werden für 10 ausgewählte Metalle die wesentlichen Szenarioergebnisse aus der jeweiligen Materialperspektive dargestellt. Außerdem erfolgt hier ein Gesamtüberblick der Szenarioergebnisse. Die ausführlichen Datentabellen hierzu finden sich im Anhang.

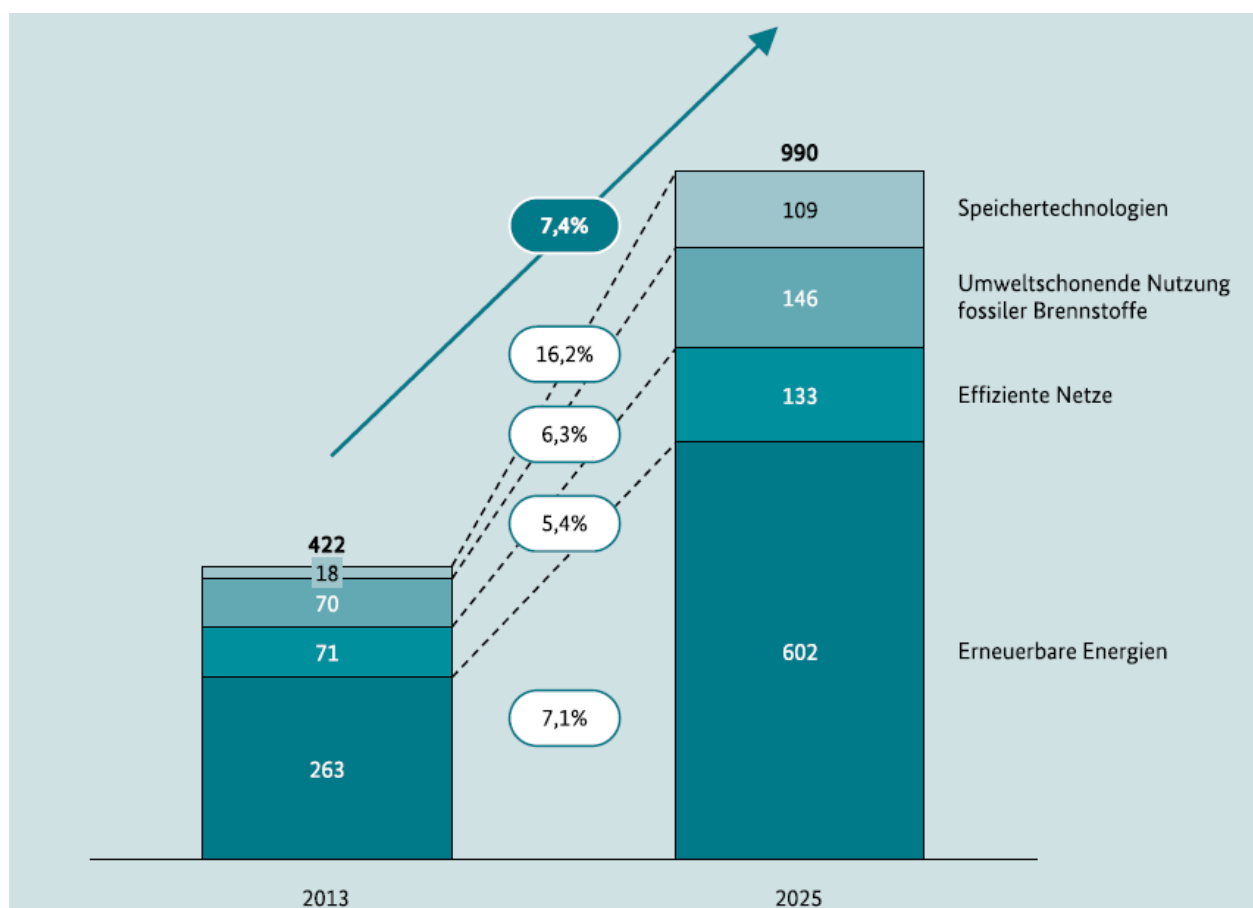
Kapitel 4 liefert Schlussfolgerungen aus den Arbeiten und Ergebnissen von AP2 und gibt Empfehlungen für das weitere Vorgehen im Projekt.

2 Materialbedarfe der 40 Umwelttechnologien

2.1 Umwelttechnologien im Leitmarkt Umweltfreundliche Energien & Speicherung

Der Leitmarkt umfasst die Marktsegmente Erneuerbare Energien, Umweltschonende Nutzung fossiler Brennstoffe, Speichertechnologien und Effiziente Netze. Das Volumen des Weltmarktes des Leitmarktes Umweltfreundliche Energien & Speicherung betrug 422 Mrd. Euro im Jahr 2013. Bis zum Jahr 2025 wird erwartet, dass das globale Marktvolumen auf 990 Mrd. Euro ansteigen und sich damit mehr als verdoppeln wird. Das größte Marktsegment sind die erneuerbaren Energien mit 263 Mrd. Euro. Es wächst jahresdurchschnittlich mit 7,1 % auf 602 Mrd. Euro im Jahr 2025. Das Volumen des Marktes im Bereich der Effizienten Netze steigt von 71 auf 133 Mrd. Euro, das Marktvolumen im Bereich der umweltschonenden Nutzung fossiler Brennstoffe von 70 auf 146 Mrd. Euro im Zeitraum von 2013 bis 2025. Die Speichertechnologien sind mit einem jährlich durchschnittlichen Wachstum von 16,2 % das Marktsegment innerhalb des Leitmarktes, das besonders dynamisch wächst.

Abbildung 2-1: Entwicklung des globalen Marktvolumens für Umweltfreundliche Energien & Speicherung in Mrd. Euro und jahresdurchschnittliche Wachstumsraten 2013 bis 2025 in %



Quelle: BMUB 2014

Das Marktvolumen für Umweltfreundliche Energien und Speicherung in Deutschland bezifferte sich 2013 auf 73 Mrd. Euro. Der Markt wächst mit jahresdurchschnittlich 6,9 %. Im Jahr 2025 wird ein Marktvolumen für Umweltfreundliche Energien & Speicherung in Deutschland in Höhe von 163 Mrd. Euro erwartet. (BMUB 2014) Mit Blick auf den Weltmarkt haben deutsche Unternehmen einen Anteil von 17 %. Angesichts der international zunehmenden Wettbewerbsintensität wird davon ausgegan-

gen, dass der Weltmarktanteil deutscher Firmen bis 2025 zurückgehen dürfte. Besonders betroffen sind Hochleistungskraftwerke, Photovoltaik, Onshore Windkraft und elektrochemische Speicherung von Energie. Der Weltmarktanteil im Bereich der Offshore Windkraft wird sich voraussichtlich nicht ändern, erhöhen dürfte sich der Weltmarktanteil deutscher Firmen im Segment der Wasserkraft (BMUB 2014).

Abbildung 2-2: Weltmarktanteile deutscher Firmen im Leitmarkt Umweltfreundliche Energien & Speicherung 2013 und Trend bis 2025

Weltmarktanteile ausgewählter Technologielinien 2013		Trend 2025
Hochleistungskraftwerke	27%	
Windkraft (Offshore)	26%	
Durchschnitt Leitmarkt	17%	
Wasserkraft	16%	
Photovoltaik	16%	
Windkraft (Onshore)	15%	
Elektrochemische Speicherung von Energie	15%	

 Zugewinn Marktanteil
  Verlust Marktanteil

Quelle: BMUB 2014

2.1.1 UT Nr. 83: „Kraftwerke – GuD/Gas“

2.1.1.1 Technologiebeschreibung

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

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

2.1.1.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit ist die elektrische Leistung [MW].

2.1.1.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Bedingt durch die hohen Temperaturen kommen für verschiedene Teile der Anlage Legierungsstähle zum Einsatz. Bezogen auf ein GuD-Kraftwerk mit 400 MW Leistung sind neben 8.800 Tonnen verstärktem Stahl 1.800 Tonnen Chromstahl verbaut. (European Commission Joint Research Centre, 2013) Der Chromgehalt liegt bei bis zu 17%. Um höhere Wirkungsgrade zu erreichen wird eine Erhöhung der Gasturbineintrittstemperatur angestrebt. Dies erfordert den Einsatz neuer Materialien, sowohl für die Gasturbine, als auch für andere Teile der Anlage, die diesen Temperaturen ausgesetzt sind. Zum einen könnten angepasste Legierungsstähle zum Einsatz kommen. Dies würde möglicherweise den Einsatz anderer Legierungselemente bedingen, die hier jedoch nicht klassifiziert werden konnten. In Hochtemperaturstählen typischerweise zum Einsatz kommende Legierungselemente umfassen neben Chrom und Nickel in geringeren Menge Silizium und Mangan. Die konkrete Auswahl der Legierungselemente und ihre Massenverhältnisse sind jedoch von einer Reihe von Faktoren abhängig, so dass hier über Chrom und Nickel hinaus keine Aussage getroffen werden kann. Da die auftretenden Temperaturen schon heute die maximal zulässigen Temperaturen etwa der Turbinenwerkstoffe übersteigen kommen Wärmedämmschichten zum Einsatz. Besonders geeignet erscheinen MCrAlY-Schichten (Bestandteile: Nickel, Chrom, Aluminium, Kobalt, Yttrium). Des Weiteren könnte verstärkt Keramik als Werkstoff verwendet werden. Schon heute kommen in Brennkammern vereinzelt faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (etwa aus Aluminiumoxid) zum Einsatz, die gezielt an Belastungen des Werkstoffes angepasst werden und die Sprödigkeit des Keramik deutlich senken können. Auch Turbinenschaufeln könnten in Zukunft aus Vollkeramik hergestellt werden, die sich faserverstärken ließen. Visionär ist die Nutzung sogenannter Carbon-Carbon-Composites, bei denen Kohlenstofffasern in eine ebenfalls aus Kohlenstoff bestehende Matrix eingebettet werden. Diese könnten Einsatztemperaturen von über 2.000 °C standhalten.

Darüber hinaus wird an neuen Kühlkonzepten geforscht. Wird bisher die Kühlluft durch Bohrungen auf die Profiloberfläche geleitet, könnte dazu in Zukunft ein poröser Werkstoff zum Einsatz kommen, so dass sich ein homogener Kühlfilm aufbaut.

Um geringe NO_x-Emissionen zu garantieren, kann statt der Eindüsung von Wasser oder Dampf (was die Wirkungsgrade senkt) möglicherweise eine katalytische Verbrennung zum Einsatz kommen. Vielversprechende Katalysatoren sind poröse Keramiken auf Palladium- oder Palladiumoxid-Basis.

Wie sich die Materialbedarfe durch diese Entwicklungen in Zukunft entwickeln, lässt sich schwer abschätzen. Daher werden die für 2013 angenommenen Materialbedarfe fortgeschrieben

Tabelle 2-1: Spezifische Materialinhalte für ein GuD-Kraftwerk in g pro MW

Material	2013	2025	2050
Chromstahl	4.500.000	4.500.000	4.500.000
Chrom	2.440	2.440	2.440
Kobalt	1.800	1.800	1.800
Kupfer	1.100.000	1.100.000	1.100.000
Nickel	15.750	15.750	15.750

Quelle: (European Commission Joint Research Centre, 2013)

2.1.1.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Mittel- bis langfristig wird in verschiedenen Studien übereinstimmend von einem Bedeutungszuwachs der GuD-Kraftwerkstechnik ausgegangen, wenngleich sich mit Blick auf Umfang, Region und Zeitperspektive unterschiedliche Einschätzungen ergeben¹.

Deutschland

Die im Netzentwicklungsplan Gas 2015 (FNB Gas, 2015) angegebene installierte Kapazität an Gaskraftwerken in Deutschland 2012 betrug 26,8 GW. Es wird erwartet, dass GuD-Kraftwerke auch mittelfristig eine wichtige Rolle in der Energieversorgung spielen werden. Dies spiegelt sich in den Szenarien des Netzentwicklungsplans wider. Die Abschätzungen der installierten Kapazität betragen im Jahr 2025 in den Szenarien mit hohem beziehungsweise niedrigem Gasbedarf 40,1 GW beziehungsweise 24 GW. In einer Studie im Auftrag des BMWI wurde die Entwicklung des Energiesystems Deutschlands bis 2050 modelliert. (ewi, gws, prognos, 2014) Diese Studie erwartet im Jahr 2025 kumulierte Kapazitäten zwischen 28 GW und 31 GW.

Das BAU- und das Green Economy-Szenario spiegeln diese Dynamik wider, wobei im BAU-Szenario die Gesamtleistung höher ausfällt als im Green Economy-Szenario. Von besonderer Bedeutung ist hier die Kopplung mit der Wärmeengewinnung.

Tabelle 2-2: Gesamtleistung in Deutschland installierter Gaskraftwerke in GW

	2013	2025	2050
BAU	26,8	31	48
GREEN	26,8	28	35

Quelle: (ewi, gws, prognos, 2014)

Die Lebensdauer eines GuD-Kraftwerks wird mit 35 Jahren angenommen (O. Mayer-Spohn, 2005), die Quote für jährliche Ersatzbauten beträgt 2,9 % der installierten Kapazität. Unter der Annahme, dass der Zubau zwischen den Stützjahren linear erfolgt, ergibt sich folgende Entwicklung:

¹ In den Prognosen wird selten zwischen einfachen Gaskraftwerken und kombinierten GuD-Kraftwerken unterschieden. Im Folgenden soll daher im Sinne einer Maximalabschätzung angenommen werden, dass zusätzlich errichtete Kraftwerke zur Gasverstromung als GuD-Kraftwerke ausgelegt werden.

Tabelle 2-3: Jährlich installierte Leistung (inklusive Ersatzbauten) in Deutschland in MW

	2013	2025	2050
BAU	765,7	1.249	1.616
GREEN	765,7	912	1.046

Global wird von einer mittel- und langfristig hohen Bedeutung von GuD-Kraftwerken ausgegangen. (BMUB 2014) sieht eine sehr hohe Marktdynamik (6,3 % Wachstum p.a.) für die Technologien zur umweltschonenden Nutzung fossiler Brennstoffe. Dieser Einschätzung entspricht auch (IEA, 2012). In einem am Klimaschutz orientierten Szenario wächst der Markt bis zum Jahr 2025 um 7,6% p.a.; die Gesamtleistung steigt damit von über 1.500 GW im Jahr 2013 auf mehr als 1.900 GW 2025. Dieses starke Wachstum lässt sich auf den globalen steigenden Energiebedarf zurückführen, der sich nicht rein aus erneuerbaren Energiequellen decken lässt. Langfristig flacht der Zubau ab: Im Jahr 2050 werden 2.150 GW Leistung installiert sein; somit werden 12 % der elektrischen Energie in Gaskraftwerken gewonnen. Diese Einschätzung soll für das globale BAU-Szenario übernommen werden. Interessanterweise liegt die 2050 installierte Gesamtkapazität in einem von der IEA erstellten Szenario mit höherem Anteil erneuerbarer Energien mit 2.274 GW noch darüber. In dieser „grünere“ Zukunft werden Kohlekraftwerke durch umweltfreundlichere Gaskraftwerke substituiert. Im Vergleich dazu nimmt (Greenpeace, 2012) im Referenzszenario 2050 einen Anteil der Gaskraftwerke von 24,4% an der Gesamtenergieerzeugung an. Im Energy [R]evolution Szenario dagegen sinkt dieser Anteil drastisch auf 4,6 %. Letztere Zahl beruht auf der Erwartung, dass erneuerbare Energien global sehr viel schneller erschlossen werden.

Die folgenden Berechnungen orientieren sich an Szenarien der IEA.

Tabelle 2-4: Weltweit jährlich installierte Kapazität an GuD-Kraftwerken in MW

	2013	2025	2050
BAU	37.000	89.539	70.710
Green Economy	37.000	91.670	78.506

2.1.1.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Aus den oben hergeleiteten Zahlen ergeben sich die folgenden Materialbedarfe:

Tabelle 2-5: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 83: „Kraftwerke – GuD/Gas“

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Chrom	587,63	958,53	1240,18	587,63	699,91	802,74
Kobalt	1,38	2,25	2,91	1,38	1,64	1,88
Kupfer	842	1374	1778	842	1003	1151
Nickel	12,1	19,7	25,5	12,1	14,4	16,5

Tabelle 2-6: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 83: „Kraftwerke – GuD/Gas“

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Chrom	28.395,28	68.715,81	54.265,68	28.395,28	70.351,22	60.348,64
Kobalt	66,6	161	127	66,6	165	141
Kupfer	40.700	98.493	77.781	40.700	100.837	86.357
Nickel	583	1.410	1.114	583	1.444	1.236

2.1.1.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Als bedeutendster Faktor für die weitere Entwicklung der Materialbedarfe dürfte die Steigerung der Gaseintrittstemperatur wirken; damit verbunden werden neue Materialien zum Einsatz kommen. Mögliche Entwicklungen wurden aufgezeigt. Diese müssen beobachtet werden, um zukünftige Materialbedarfe besser abschätzen zu können.

2.1.1.7 Quellen

- BMUB 2014 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
- European Commission Joint Research Centre, 2013 Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Luxemburg
- ewi, gws, prognos, 2014 Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel/Köln/Osnabrück.
http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2014/2014_06_24_ENDBER_P7570_Energiereferenzprognose-GESAMT-FIN-IA.pdf
- Fraunhofer ISE, 2013c Fraunhofer ISE, ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050. Freiburg
- FNB Gas, 2015 Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan Gas 2015 der Fernleitungsnetzbetreiber. Berlin.
http://www.fnb-gas.de/files/2014_09_08_nep_gas_2015_szenariorahmen.pdf
- Greenpeace 2012 Energy [R]evolution: A sustainable world energy outlook
- GTAI 2013 <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/Maerkte/suche,t=intelligente-wasserzaehler-in-den-usa-gefragt,did=921842.html>
- IEA 2012 International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris
- O. Mayer-Spohn, 2005 O. Mayer-Spohn, S. Wissel, A. Voß, U. Fahl, M. Blesl, Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken

2.1.2 UT Nr. 87: „Dünnschicht-Solarzellen“

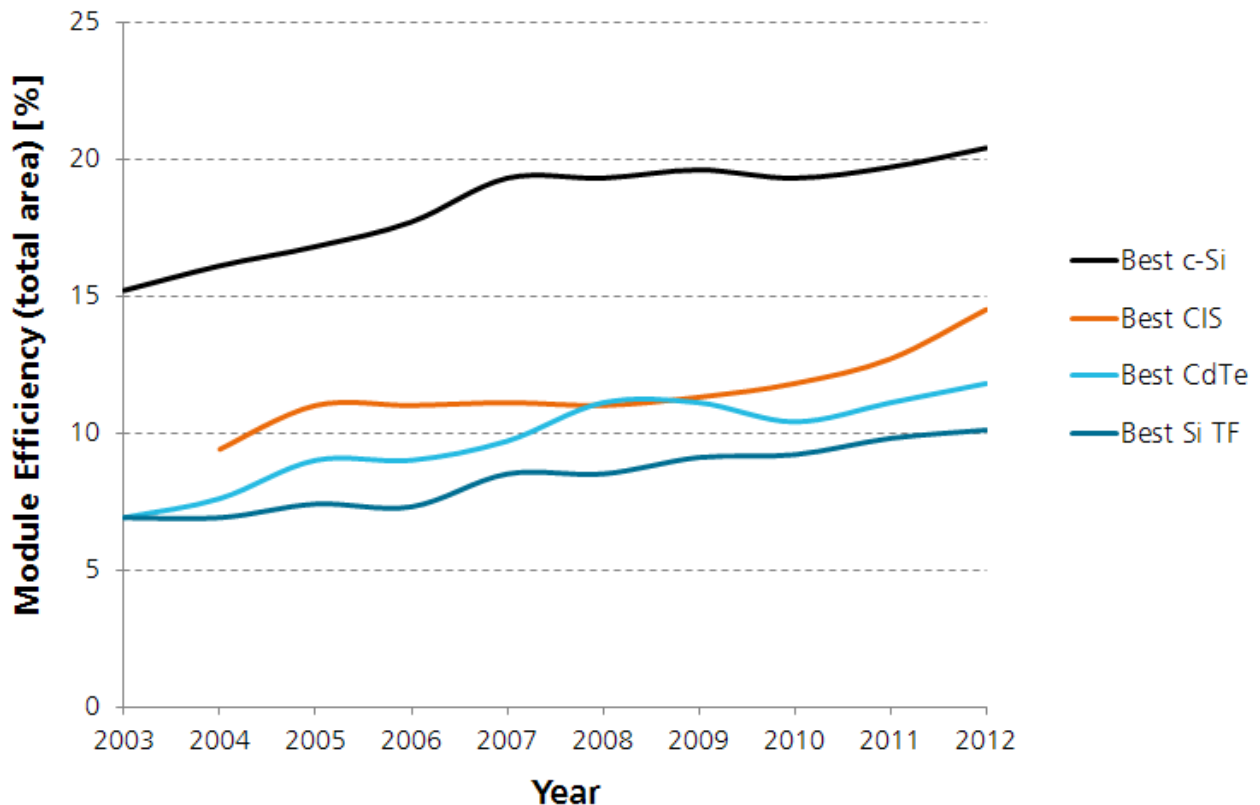
2.1.2.1 Technologiebeschreibung

Die Dünnschicht-Photovoltaik ist eine technologische Variante der Photovoltaik, die mit sehr geringen Mengen an Halbleitermaterial arbeitet, das meist auf das tragende Substrat aufgedampft wird. Dünnschichtzellen gibt es in verschiedenen Ausführungen, je nach Substrat und Leitermaterialien. Die Bandbreite der physikalischen Eigenschaften und der Wirkungsgrade ist entsprechend groß. Je nach Halbleitermaterial unterscheidet man Dünnschichtzellen auf Basis von amorphem Silicium (a-Si), Cadmiumtellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-(Gallium-)Selen (Chalkopyrit- oder auch CIGS-Solarzelle

bzw. CIS-Zellen) und den strukturell verwandten Kupfer-Zink-Zinn-Schwefel Selen-Verbindung (Kesterit- oder kurz CZTS Solarzellen).

CdTe-Zellen sind Marktführer im Bereich der Dünnschicht-PV, verlieren jedoch Anteile. CdTe-Zellen waren bisher deutlich günstiger als andere Dünnschicht-Zellen bei zeitweise vergleichsweise sehr guten Wirkungsgraden (s. Abbildung 2-3). In den letzten Jahren steigen jedoch insbesondere die Wirkungsgrade von CI(G)S-Zellen; für diese werden zudem die höchsten theoretischen Potentiale für weitere Steigerungen gesehen.

Abbildung 2-3: Entwicklung der Modulwirkungsgrade verschiedener PV



Quelle: (Fraunhofer ISE, 2014)

Generell eignen sich Dünnschicht-Solarzellen für großflächige Anwendungen – hier können sie auf Grund ihres geringeren Materialbedarfs Vorteile gegenüber konventionellen Siliziumzellen generieren. Auf begrenzten Flächen dagegen (etwa Hausdächern) gewinnt der höhere Wirkungsgrad von Dickschicht-Zellen an Bedeutung. Denkbar ist für die Dünnschicht-PV in Zukunft zudem die Anwendung in flexiblen Modulen.

2.1.2.2 Spezifische Einheit

Als Definition der spezifischen Einheit wird die maximal mögliche Leistung von Dünnschicht-Modulen unter Standardbedingungen als Peak-Leistung definiert. Sie wird in Watt gemessen und als kWp (Kilowatt, Peak) angegeben.

2.1.2.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Die Dünnschicht-Photovoltaikanlage besteht aus einzelnen Solarzellen, die zu einem Solarmodul zusammengesetzt werden. Um die Anlage vor äußeren Einflüssen zu schützen, werden die einzelnen Module in eine Kunststoffsicht eingebettet und mit einem lichtdurchlässigen Spezialglas abgedeckt. Außerdem besteht die Anlage aus Leistungselektronik und Verkabelung. Der spezifische Kup-

ferbedarf beträgt 5.120 g/kWp, davon entfallen durchschnittlich 2.900 g/kWp auf die Verkabelung und 2000 g/kWp auf die Leistungselektronik.

Der Aufbau einer Dünnschichtzelle besteht im einfachsten Fall aus Substrat, Elektrode, Halbleiter und Elektrode. Als Trägermaterial kommen Glas, Kunststoff und Metall zum Einsatz. Massenbezogen machen sie den größten Anteil einer Dünnschichtsolarzelle aus.

Bei der Herstellung von Dünnschichtzellen werden photoaktive Halbleiter als dünne Schichten auf ein Trägermaterial aufgedampft. Dabei kommt eine Vielzahl von photovoltaisch aktiven Materialien zum Einsatz. Das bisher gängigste Material für Dünnschichtzellen ist amorphes Silizium (a-Si:H). Weitere Materialien sind mikrokristallines Silizium ($\mu\text{c-Si:H}$), Gallium-Arsenid (GaAs), Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selen-Verbindungen, die so genannten CIGS- bzw. CIS-Zellen, wobei hier je nach Zelltyp S für Schwefel oder Selen stehen kann. Ein Material, das neu in der Dünnschichttechnologie Anwendung findet, sind Kupfer-Zink-Zinn-Schwefel-Selen-Verbindungen (CZTS). Da die Entwicklung dieser Technologielinie jedoch noch nicht genau abgesehen werden kann, soll sie hier ausgeklammert werden.

Im Folgenden wird die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Technologien auf Ebene der Solarzelle beschrieben.

a-Si (amorphes Silizium):

Bei Dünnschicht-PV-Zellen aus amorphem Silizium ist zwischen dem p- und dem n-leitenden Silizium eine intrinsische Siliziumschicht zwischengeschaltet, die als Absorber dient. Darüber hinaus enthält die funktionale Schicht ca. 10 % Wasserstoff, das zur Passivierung dient. Als Substrat wird Glas verwendet, durch das auch die Beleuchtung erfolgt. Als TCO (transparentes leitfähiges Oxid; transparent conducting oxide) wird meist Indiumzinnoxid (ITO) eingesetzt und als Elektrode Aluminium.

CIS- oder CIGS-Dünnschicht-Zellen

Das Halbleitermaterial dieser Module besteht aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid und ist etwa 1,8 – 2 μm dick. Als Substrat kommt auch hier meist Glas zum Einsatz.

CdTe - Dünnschicht Module

Durch die Kombination von Tellur und Cadmium wird die Verbindung Cadmium-Tellurid (CdTe) hergestellt. Cadmiumtellurid ist ein direkter Halbleiter mit einer günstigen Bandlücke und einem hohen Absorptionskoeffizienten, der eine geringe Schichtdicke von weniger als 5 μm ermöglicht. Bei den CdTe-Zellen wird ein Heteroübergang zu CdS genutzt. CdTe wirkt als Absorber. Da CdTe von sich aus ohne besondere Dotierung p-leitend ist, wird das von selbst n-leitende CdS als weiterer Halbleiter eingesetzt. Als Substrat kommt meist Kalknatronglas zum Einsatz, durch welches auch beleuchtet wird. Als TCO wird indiumdotiertes Zinnoxid ($\text{SnO}_2:\text{In}$) eingesetzt. Es wird durch Magnetronspütern aufgebracht. CdS und CdTe werden i.d.R. thermisch aufgedampft. Eine typische CdTe Solarzelle besteht aus fünf Einzelschichten: einer ca. 8 μm dicken CdTe-Absorberschicht, einer ca. 100 nm dicken CdS-Zwischenschicht sowie 20 bzw. 100 nm dicken Tellur- und Antimontellurid (Sb_2Te_3)-Schichten.

Tabelle 2-7: Spezifischer Materialbedarf für a-Si Dünnschichtzellen in g/kWp

Material	2013	2025	2050
Indium	4	0	0
Silizium	37	37	37

Der Indiumbedarf für a-Si-Zellen besteht in der TCO-Schicht. (Wuppertal Institut, 2014) geht davon aus, dass diese Schichten bis zum Jahr 2025 auch Indium-frei gefertigt werden können. Zudem sind Verbesserungen in der Materialeffizienz für Silizium wahrscheinlich – da diese jedoch nicht quantifiziert werden konnten, wird hier der spezifische Bedarf für 2013 fortgeschrieben.

Tabelle 2-8: Spezifischer Materialbedarf für CIGS Dünnschichtzellen in g/kWp

Material	2013	2025	2050
Gallium	7,2	3,2	1,2
Indium	55,5	45	3
Selen	39,3	17,4	6,3

Tabelle 2-9: Spezifischer Materialbedarf für CdTe Dünnschichtzellen in g/kWp

Material	2013	2025	2050
Indium	15,5	15,5	0
Tellur	99,7	43,1	35,3

Quelle: (Wuppertal Institut, 2014) (Fraunhofer ISE, 2013d) (Fraunhofer ISE 2013)

Analog zu a-Si-Zellen geht (Wuppertal Institut, 2014) davon aus, dass CdTe-Zellen ab 2050 mit Indium-freien TCOs gefertigt werden können.

2.1.2.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Im Vergleich zur konventionellen Silizium-Photovoltaik ist die Dünnschicht-Photovoltaik eine junge Technologielinie. Während insbesondere CdTe-Zellen bis 2012 Marktanteile erringen konnten, als Silizium-Engpässe die Produktion konventioneller PV-Module erschwerten, sinkt ihre Bedeutung seitdem wieder. Die weitere Entwicklung wird stark von der Technologie- und Preisentwicklung abhängen, die noch nicht klar abzusehen ist.

Die Dünnschichtphotovoltaik ist eine weniger ausgereifte Technologie als die konventionelle Photovoltaik und hat noch höhere Potentiale zur Verbesserung der Wirkungsgrade, was in Zukunft steigende Marktanteile erwarten lässt. Dem entgegen wirkt jedoch ihr schwindender Kostenvorteil. Generell lassen sich für die Photovoltaik konstant sinkende spezifische Modulpreise beobachten. Diese machen bei der Dünnschicht-Photovoltaik einen (im Vergleich zur Dickschicht-Photovoltaik) geringeren Anteil an den Gesamtanlagenkosten aus, da für die gleiche installierte Leistung eine größere Anlage installiert werden muss und die Kosten der Balance-of-System-Komponenten (Verkabelung, Unterkonstruktion,...) so an Bedeutung gewinnen. Zudem werden Dünnschichtzellen auch in Zukunft Probleme an Standorten mit begrenzten Flächen (insbesondere Häuserdächer) haben, die von c-Si-Zellen mit ihren höheren Wirkungsgraden besser genutzt werden. (Wuppertal Institut, 2014)

Innerhalb der Dünnschicht-Photovoltaik werden verschiedene Technologielinien miteinander konkurrieren. (Wuppertal Institut, 2014) geht davon aus, dass ab dem Jahr 2018 keine CdTe-Zellen mehr verbaut werden. Zum einen wird erwartet, dass der Wirkungsgrad langsamer steigt als der anderer Technologielinien; zum anderen sind CdTe-Zellen in den letzten Jahren in Kritik geraten, weil mögliche Umweltbeeinträchtigungen befürchtet werden. Die EU und EPIA (European Photovoltaic Industry Association) gehen hingegen von einer abnehmenden, aber immer noch relevanten Technologielinie aus.

Für eine steigende Bedeutung der CIGS-Zellen spricht, dass sie momentan die höchsten Laborwirkungsgrade der Dünnschicht-Photovoltaik erreichen (20 %), auch wenn typische Wirkungsgrade im Einsatz nur bei 7 bis 12 % liegen (Wuppertal Institut, 2014). a-Si-Zellen haben dagegen den Vorteil einer besseren Materialverfügbarkeit.

Dünnschichtzellen werden auch in Zukunft mit konventionellen Silizium-Solarzellen konkurrieren. Deren Laborwirkungsgrade liegen fast am theoretischen Maximum. (Department of Energy, 2012)

Durch eine weitere Reduktion der Schichtdicken können jedoch die spezifischen Investitionskosten gesenkt werden.

Eine Konkurrenztechnologie, die in bestimmten Regionen substitutiv zur Dünnschicht-PV wachsen könnte, sind solarthermische Kraftwerke. Auch konzentrierende photovoltaische Anlagen werden in diesem Kapitel nicht betrachtet, obwohl sie häufig mit Dünnschicht-Zellen ausgeführt werden. Darüber hinaus befinden sich neue Technologielinien in der Entwicklung, deren Einsatz sich jedoch noch nicht absehen lässt und die daher hier nicht betrachtet werden sollen. Erwähnenswert ist die organische Photovoltaik (OPV). Ihr Haupteinsatzgebiet wird in der gebäudeintegrierten Photovoltaik (GiPV) gesehen, deren Marktanteil als vernachlässigbar eingeschätzt wird (Wuppertal Institut, 2014).

Im Folgenden soll der Einschätzung von (Wuppertal Institut, 2014) gefolgt werden, was die weitere Marktentwicklung der Dünnschicht-PV angeht. Um in einer konsistenten Betrachtung der Photovoltaik-Technologie innerhalb dieses Reports zu bleiben, wird die als wahrscheinlich angenommene Marktdominanz von c-Si-Zellen hier übernommen.

Tabelle 2-10: Marktanteile verschiedener Technologielinien innerhalb der Photovoltaik

Marktanteil	c-Si	a-Si	CdTe	CIGS
2014	97 %	0,9 %	1,3 %	0,8 %
2025	97,5 %	0,8 %	0 %	1,7 %
2050	97 %	0,7 %	0 %	1,3 %

Dennoch ist es möglich, dass Dünnschicht-Solarzellen in Zukunft weitere Marktanteile gewinnen. Daher soll darüber hinaus eine Maximalabschätzung vorgenommen werden, die auf dem „Dünnschicht-Renaissance“-Szenario beruht (Wuppertal Institut, 2014).

Tabelle 2-11: Maximalabschätzung der Marktanteile der Dünnschicht-PV

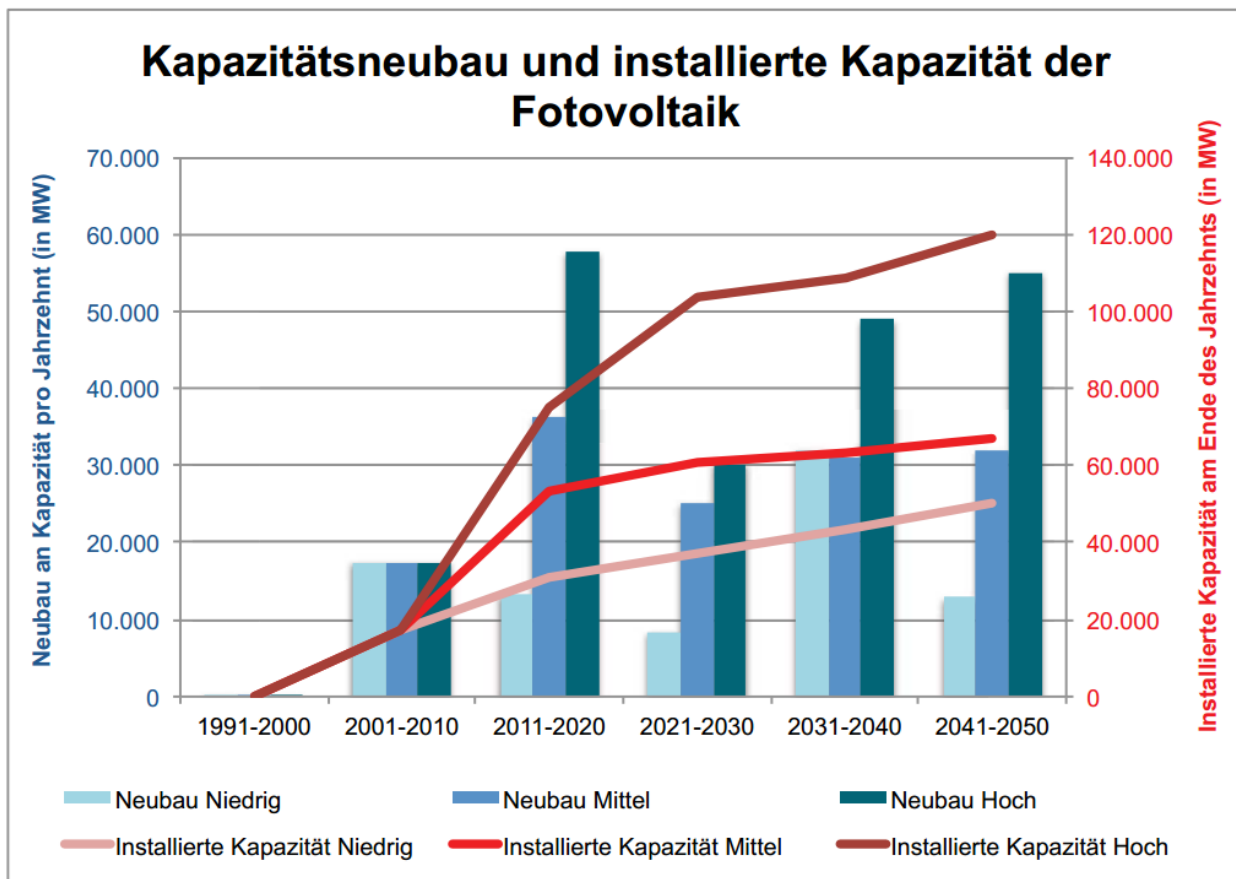
Marktanteil	c-Si	a-Si	CdTe	CIGS
2025	84 %	4,8 %	0 %	11,5 %
2050	58 %	11,3 %	0 %	30,7 %

Das BAU- und GREEN-Szenario soll im Folgenden über den Gesamtzubau der Photovoltaik unterschieden werden. Dieser wird daher für die nationale und globale Betrachtung untersucht. Diese Untersuchung bildet auch die Basis für das Kapitel 2.1.4 (Si-Dickschichtzellen).

Deutschland

Im Jahr 2013 wurden 3,3 GWp neue Leistung installiert. Damit sank die Zahl der Neuinstallationen im Vergleich zum Vorjahr auf rund die Hälfte, im Jahr 2014 fiel sie noch weiter auf 1,9 GWp. Die kumulierte Leistung stieg auf 38 GWp. (Wuppertal Institut, 2014) hat den Ausbau der Photovoltaik in Deutschland untersucht. Die sich ergebenden Pfade sind in Abbildung 2-4 dargestellt.

Abbildung 2-4: Kapazitätsneubau und installierte Kapazität der Photovoltaik gesamt in Deutschland



Quelle: (Wuppertal Institut, 2014)

Es wird eine hohe Wachstumsdynamik erwartet. An den Ausbaupfaden lässt sich erkennen, dass diese in Deutschland durch politische Lenkung insbesondere in diesem Jahrzehnt stark beschleunigt wurde. Im mittleren Ausbaupfad, der hier die Basis für das BAU-Szenario bilden soll, sinken die Zubauraten um 2025 zunächst ab, bevor sie bis 2050 wieder steigen.

Der in Abbildung 2-4 angenommene schnelle Ausbaupfad der Photovoltaik basiert auf einer Studie des UBA aus dem Jahr 2010 (aus der die installierte Kapazität von 120 GW im Jahr 2050 übernommen wurde) und dem Szenario „100 %-EE“ aus FVEE 2010, nach dem ein sehr schneller Zuwachs bis 2030 angenommen wurde, der daraufhin etwas abflacht. Damit ergibt sich im Stützjahr 2025 ein vergleichsweise geringer Zubau von 3 GW, im Jahr 2050 beträgt er 5,5 GW (hauptsächlich Bestandserneuerung). Gemäß Fraunhofer ISE, das eine Energieversorgung Deutschlands vollständig aus regenerativen Quellen modelliert, könnte die installierte Gesamtkapazität im Jahr 2050 um den Faktor 1,9 (363 GW gegenüber 192 GW) höher liegen; um diesen Faktor sollen die angenommenen Neuinstallationen im Green-Economy-Szenario berücksichtigt werden.

Tabelle 2-12: Jährliche nationale Neuinstallationen in MWp

	Neuinstallationen PV		a-Si		CdTe		CIGS	
	BAU	Green Economy	BAU	Green Economy	BAU	Green Economy	BAU	Green Economy
2013	3.300		30,7		43,6		24,8	
2025	2.500	5.670	20	45,4	0	0	42,5	96,4
2050	3.200	10.400	21,7	70,7	0	0	42,2	137,3

Quelle: (Wuppertal Institut, 2014) eigene Berechnungen

In einer Maximalabschätzung, die von einer steigenden Bedeutung der Dünnschicht-Technologien ausgeht, liegen die Zubauten dagegen deutlich höher.

Tabelle 2-13: Maximalabschätzung der möglichen Zubauten der Dünnschicht-PV in Deutschland (in MW/a)

	a-Si	CdTe	CIGS
2025	272	0	652
2050	1.175	0	3.193

Quelle: (Wuppertal Institut, 2014), eigene Berechnungen

In der Entwicklung, die als Maximalabschätzung betrachtet wurde, ergäben sich die folgenden Bedarfe:

Tabelle 2-14: Maximal anzunehmender absoluter Materialbedarf für Dünnschicht-Photovoltaik in Deutschland (in t/a)

Material	Maximalabschätzung	
	2025 [in t]	2050 [in t]
Gallium	2,9	3,8
Indium	29,3	9,58
Selen	11,35	20,12
Silizium (Metall)	10,07	43,82

Global

2014 betrug die weltweit installierte Leistung an Photovoltaik 177 GWp. Es wird erwartet, dass diese Leistung deutlich steigen wird, so dass Photovoltaik in Zukunft einen bedeutenden Anteil der Energieerzeugung ausmachen wird. Für das Jahr 2019 sagen SolarPower Europe (ehemals EPIA) und IHS übereinstimmend im Jahr 2019 eine mögliche Gesamtkapazität von 500 GWp voraus. (IHS, 2015)

Auch (BMUB 2014) erwartet bis 2025 ein dynamisches Wachstum von 6 % p.a. Diese Einschätzung deckt sich mit szenariobasierten Vorhersagen der IEA. Diese erwarten im Jahr 2050 eine installierte Photovoltaik-Kapazität von 1770 GW. (IEA, 2012) Die im hi-ren Szenario, das einen ambitionierteren Ausbau erneuerbarer Energien beschreibt, 2050 erwartete installierte Kapazität wird in einer aktualisierten Fassung der Roadmap auf 4.674 GW beziffert. Diese Einschätzungen bilden die Grundlage für das BAU- und Green-Economy-Szenario.

Tabelle 2-15: Überblick über die kumulierte installierte Leistung global in GW

	2013	2030	2050
IEA 2012	135	703	2921
IEA 2014	135	1721	4674

Mit einer angenommenen Lebensdauer von 25 Jahren ergeben sich die folgenden Neuinstallationen (inklusive Ersatzbauten):

Tabelle 2-16: Jährliche globale Neuinstallationen in MWp

	Neuinstallationen PV (gesamt)		a-Si		CdTe		CIGS	
	Trend	Green Economy	Trend	Green Economy	Trend	Green Economy	Trend	Green Economy
2013	39.000		363		515		293	
2025	51.000	120.000	408	960	0	0	867	2.040
2050	153.700	243.000	1.045	1.652	0	0	2.029	3.208

Quelle: IEA 2012, 2014, eigene Berechnungen

Analog zur nationalen Betrachtung soll auch hier die maximal zu erwartende zu installierende Leistung der verschiedenen Dünnschicht-PV-Linien abgeschätzt werden. Mit der oben hergeleiteten Marktverteilung im Falle einer bedeutenden Technologieverbesserung der Dünnschicht-PV ergäben sich die folgenden Zubauten:

Tabelle 2-17: Maximalabschätzung der möglichen Zubauten der Dünnschicht-PV weltweit (in MW/a)

	a-Si	CdTe	CIGS
2025	5.760	0	13.800
2050	27.459	0	74.601

Mit dieser Maximalabschätzung würden die Materialbedarfe drastisch ansteigen, sollte sich die Dünnschicht-PV durchsetzen:

Tabelle 2-18: Maximal anzunehmender absoluter Materialbedarf für Dünnschicht-Photovoltaik weltweit (in t/a)

Material	Maximalabschätzung	
	2025 [in t]	2050 [in t]
Gallium	44,2	89,5
Indium	621	224
Selen	240	470
Silizium (Metall)	213	1.016

2.1.2.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Aus diesen Betrachtungen entwickeln sich die folgenden Materialbedarfe für den Einsatz der Dünnschichtphotovoltaik

Tabelle 2-19: Absoluter Materialbedarf für Dünnschicht-Photovoltaik in Deutschland (in t/a)

Material	BAU			GREEN		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Gallium	0,18	0,14	0,05	0,18	0,30	0,16
Indium	2,17	1,91	0,13	2,17	4,34	0,41
Selen	0,97	0,74	0,27	0,97	1,68	0,86
Silizium (Metall)	1,14	0,74	0,80	1,13	1,68	2,61
Tellur	4,34	0	0	4,34	0	0

Weltweit entwickelt sich der Materialbedarf wie folgt:

Tabelle 2-20: Absoluter Materialbedarf der Dünnschicht-Photovoltaik global (in t/a)

Material	BAU			GREEN		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Gallium	2,106	2,77	2,43	2,11	6,53	3,85
Indium	25,66	39,02	6,09	25,66	91,8	9,62
Selen	11,50	15,09	12,78	11,50	35,50	20,21
Silizium (Metall)	13,41	15,10	38,67	13,42	35,52	61,14
Tellur	51,33	0	0	51,33	0	0

2.1.2.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht insbesondere in der Abschätzung der Marktentwicklung. In den Szenarien wurde eine konservative Marktentwicklung zu Grunde gelegt; die Maximalabschätzung hat gezeigt, dass die Materialbedarfe bei einer höheren Marktdurchdringung der Dünnschicht-PV drastisch steigen können. Diese wird auch von technologischen Weiterentwicklungen abhängen. So erscheinen die möglichen Verbesserungen der Wirkungsgrade auf Modulebene noch unsicher. Auch die Senkung des Materialbedarfs der a-Si-Zellen konnte für die Zukunft nicht quantifiziert werden. Zudem ist zu beobachten, ob die CdTe-Zelllinie wirklich bis 2025 vom Markt verdrängt wird. Längerfristig bedeutsam ist die Entwicklung neuer Technologielinien, wie etwa der CZTS-Zellen oder der organischen Photovoltaik. Diese könnten tendenziell den Materialbedarf der Photovoltaik insgesamt ein wenig entspannen, wenn sie andere Zell-Linien substituieren. Dieser Effekt könnte jedoch durch das Aufkommen neuer Nutzungen (PV auf Häuserfassaden, in Fenster integrierte transparente Zellen,...) zu nichte gemacht werden; daher müssen auch solche Entwicklungen im Auge behalten werden.

2.1.2.7 Quellen

BINE 2011	BINE Informationsdienst, Photovoltaik – Innovationen.
BMUB 2014	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
DoE 2012	Department of Energy, SunShot Vision Study. http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/47927.pdf
Fraunhofer ISE 2013d	Fraunhofer ISE, Entwicklungslinien der PV-Technologien und Materialsstitutionsmöglichkeiten. Freiburg
Fraunhofer ISE 2014	Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report. Freiburg
Fraunhofer ISE 2015	Fraunhofer ISE, Current Status of Concentrator Photovoltaic. Freiburg
IEA 2012	International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris.
IEA 2014	Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy. Paris.
Wuppertal Institut 2014:	Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.3 UT Nr. 90: „Tandemzellen“

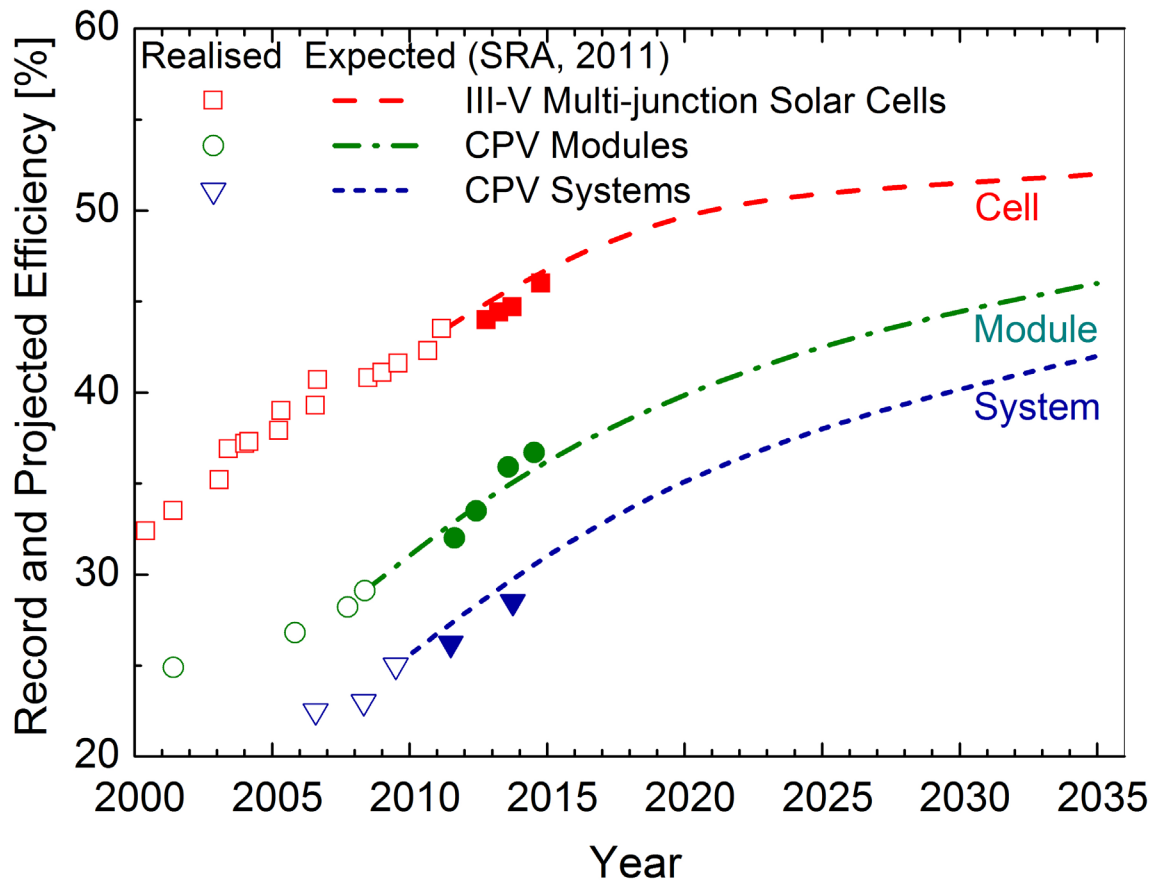
2.1.3.1 Technologiebeschreibung

Tandemzellen enthalten mehrere Schichten transparenter Halbleiter, die aufgrund ihrer Dotierung selektiv verschiedene Bandbreiten der Solarstrahlung nutzen. Dies ermöglicht deutlich höhere theoretische Wirkungsgrade, 2014 wurden Effizienzen von fast 50 % erreicht. Die Herstellung ist jedoch sehr viel aufwändiger und kostspieliger als die anderer Arten von Solarzellen. Daher ist das einzige abzusehende Anwendungsfeld für Tandemzellen die Nutzung in konzentrierenden Solarkraftwerken (Concentrated Photovoltaics, CPV) – diese Nutzung soll im Weiteren angenommen werden². Verwendet werden Linsen- oder Spiegelsysteme, um die einfallende Strahlung auf 300 bis 1000 Sonnen zu konzentrieren und so die hohen Wirkungsgrade der Tandemzellen auf einer geringen Fläche auszunutzen. So können Anlagenwirkungsgrade von 27 % erreicht werden. Nachteilhaft ist, dass diffuse Strahlung nicht konzentriert werden kann. Besonders interessant ist die Technologie daher für sonnenreiche Regionen mit Direktnormalstrahlungswerten von mehr als 2000 kWh/(m²a). Um die Solarstrahlung möglichst optimal zu nutzen, werden die Systeme üblicherweise zweiachsig nachgeführt. Vorteilhaft ist, dass CPV-Kraftwerke einen geringen Flächenbedarf haben; stehen die einzelnen Systeme nicht zu dicht, kann die Fläche weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden. Zudem sinkt der Wirkungsgrad der verwendeten Solarzellen bei hohen Temperaturen nicht so stark wie jener der konventioneller Siliziumzellen.

CPV-Anlagen auf Basis von Mehrfachzellen sind eine noch sehr junge Technologie. Daher wird erwartet, dass die Effektivität von Zell- bis zur Systemebene in Zukunft noch weiter gesteigert werden kann.

² Die Nutzung in der Raumfahrt soll hier ausgeklammert werden; zum einen sind die Produktionsvolumen gering, zum anderen ist der Aspekt der Umweltentlastung nicht gegeben.

Abbildung 2-5: Entwicklung von Wirkungsgraden auf Zell-, Modul- und Systemebene



Quelle: Fraunhofer ISE, 2015

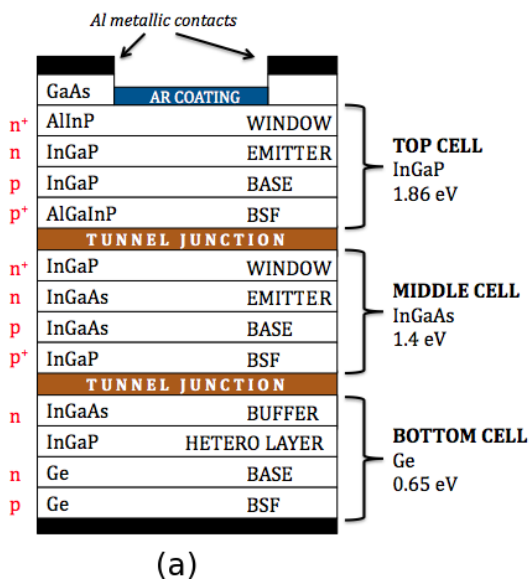
2.1.3.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die erzeugbare Leistung in Kilowatt bei einer 500fachen Konzentration der Sonneneinstrahlung über Spiegel und Linsen verwendet [kWp].

2.1.3.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Tandemzellen setzen sich aus mehreren Halbleiterschichten zusammen, die jeweils verschiedene Spektren des Sonnenlichts optimal umsetzen. So wird der Gesamtwirkungsgrad der Zelle erheblich gesteigert. Dabei können verschiedene Halbleiter zum Einsatz kommen. Hochkonzentrierende Kraftwerke nutzen Kombinationen von III-V-Halbleitern. Der Quasi-Industriestandard ist eine Dreifachso-larzelle aus GaInP/GaInAs/Ge (Abbildung 2-6). Siliziumbasierte Tandemzellen sollen hier nicht weiter verfolgt werden, da der Siliziumbedarf im Vergleich zu der konventionellen Photovoltaik verschwin-dend ist.

Abbildung 2-6: Aufbau einer GaInP/GaInAs/Ge-Dreifachsolarzelle



Quelle: Ncouniot / Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2010

Ein Großteil der Forschung konzentriert sich auf die Verbesserung der Wirkungsgrade. Andere Bemühungen zielen dagegen auf die Substitution von teuren Materialien wie Germanium oder Galliumarsenid (GaAs) durch Silizium.

Abgesehen von den Zellen machen die Spiegel einen wichtigen Teil der Materialbedarfe von CPV-Anlagen aus. Die reflektierende Schicht besteht hier aus Silber. Eine denkbare Substitution wäre die Nutzung von Aluminium, die heute schon technisch möglich ist. Da die Entwicklung hier jedoch nicht sicher abgeschätzt werden kann und um die zukünftigen Materialbedarfe nicht zu unterschätzen, wird von einer Nutzung von Silber als Material für die Spiegel ausgegangen.

Die Materialbedarfe aus Tabelle 2-21 beziehen sich auf GaInP/GaInAs/Ge-Tandemzellen mit 500facher Konzentration. Da die Materialentwicklungen nicht quantifizierbar sind, werden die Materialbedarfe konstant fortgeschrieben.

Tabelle 2-21: Spezifischer Materialbedarf einer GaInP/GaInAs/Ge-Tandemzellen in g/kWp (500fache Konzentration)

Material	2013	2025	2050
Gallium	0,03	0,03	0,03
Germanium	0,6	0,6	0,6
Indium	0,01	0,01	0,01
Silber	0,01	0,01	0,01
Silizium (Metall)	738	738	738

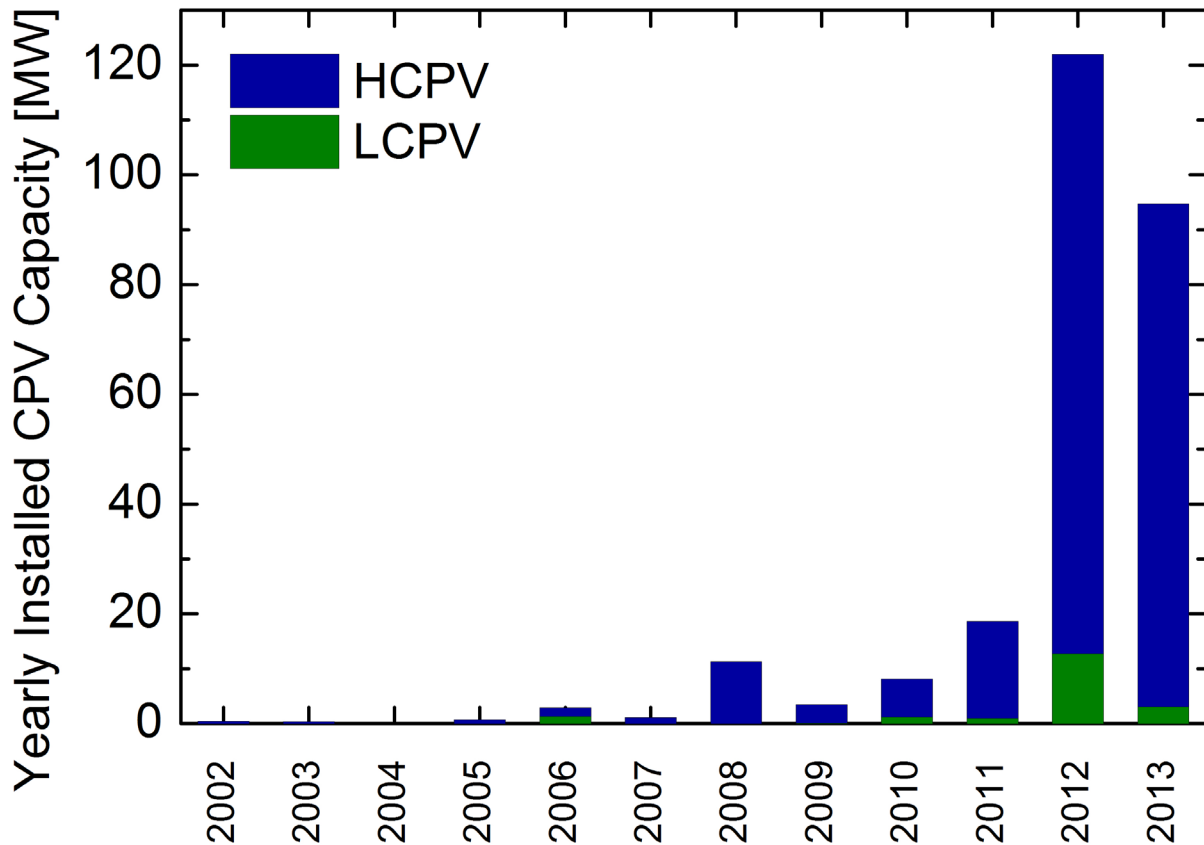
Quelle: (Fraunhofer ISE, 2013d)

2.1.3.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Konzentrierende Photovoltaik ist eine junge Technologie. Die erste Anlage mit einer Kapazität von über 1 MW wurde 2006 errichtet. Sie verzeichnet ein dynamisches Wachstum, insbesondere in den letzten Jahren. Dennoch ist die Bedeutung verglichen mit konventionellen Solarfarmen sehr gering. 2013 wurden unter 100 MWp errichtet (vgl. Abbildung 2-7). Bis November 2014 wurden weitere 70 MW errichtet, die weltweit installierte Kapazität betrug damit mindestens 330 MW. (REN21, 2015).

Über 90 % der Anlagen sind zweiachsig nachgeführte, hochkonzentrierende Systeme, die III-V-Mehrfachzellen nutzen. Die Konzentration des Sonnenlichts erfolgt zumeist über Fresnel-Spiegel auf 500 bis 1000 Sonnen.

Abbildung 2-7: Errichtete Kapazität an CPV-Anlagen weltweit



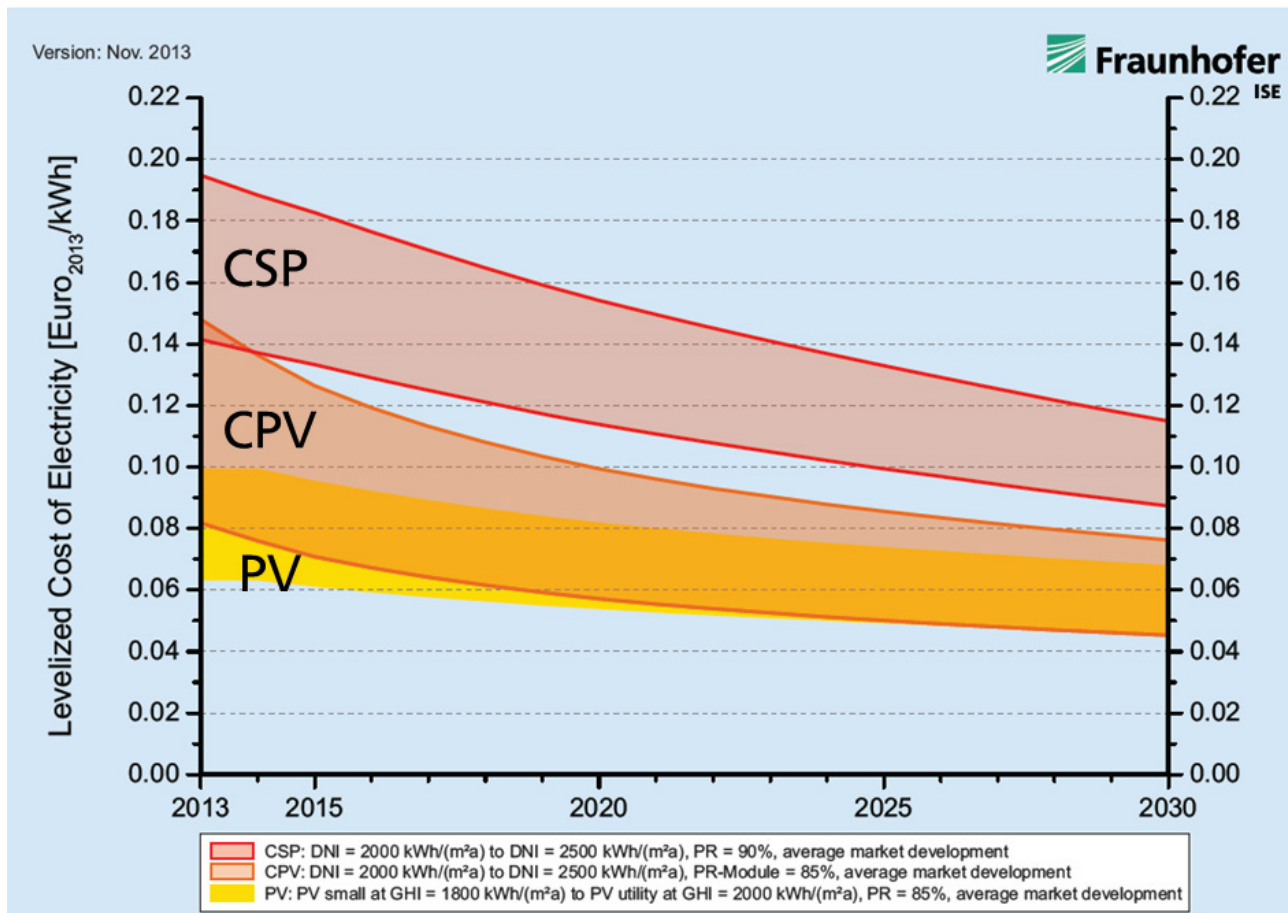
Quelle: (Fraunhofer ISE, 2015)

Deutschland

CPV-Anlagen werden für die Energieversorgung Deutschlands auch in Zukunft keine Rolle spielen (von importiertem Strom abgesehen), da die benötigte hohe Normaleinstrahlung nicht gegeben ist. Dennoch kann der Markt für deutsche Unternehmen wichtig werden, die in der Optik-Branche eine starke Position innehaben.

Global

Die ersten größeren CPV-Anlagen wurden in Spanien errichtet. Seitdem hat sich der Markt diversifiziert. Insbesondere die USA, China, Italien, Australien und Süd-Afrika sind wichtige Standorte. Die weitere Entwicklung ist noch unsicher, da wenige Laufzeit- und Kostendaten vorliegen. Dadurch lässt sich noch keine Lernkurve erkennen und Prognosen sind mit großen Unsicherheiten behaftet. (Fraunhofer ISE, 2015) schätzt, dass mit einem zunehmendem Marktvolumen und den sich daraus ergebenden Skaleneffekten die Stromerzeugungskosten von CPV-Anlagen in entsprechenden Regionen noch einmal stark sinken könnten.

Abbildung 2-8: Stromgestehungskosten in Regionen mit einer Sonneneinstrahlung von 2000 - 2500 kWh/m²a)

Quelle: (Fraunhofer ISE, 2015)

(Haysom, Jafarieh, Anis, Hinzer, & Wright, 2014) kommen zu dem Ergebnis, dass CPV-Kraftwerke schon heute mit konventionellen Solarfarmen konkurrieren können (bei Investitionskosten von durchschnittlich 2,8\$/W für CPV- und 2,7\$/W für konventionelle Solarfarmen mit Kapazitäten über 10 kW). Die Preise für CSP-Kraftwerke liegen höher, jedoch können diese Kraftwerke auch um die Möglichkeit der Energiespeicherung und Wärmeerzeugung ergänzt werden. Da die Lernkurve für CPV steiler verläuft als die der Konkurrenztechnologien, werden weiter sinkende Preise und eine zunehmende Marktbedeutung erwartet.

Tabelle 2-22 fasst verschiedene Studien zum Markt der CPV zusammen. Über das Jahr 2020 hinausreichende Prognosen sind nicht zu finden, was die Unsicherheit der Entwicklung widerspiegelt.

Tabelle 2-22: Marktstudien zu CPV [in eckigen Klammern: selbst berechnete Werte]

	Prognosejahr: Installierte Leistung	Wachstum der installierten Leistung p.a.
Markets and Markets	[2019: 686 MW]	13,9 %
GlobalData	2020: 1044 MW	[16,5 %]
iHS	2020: 1362 MW	[34,4 %]
TechNavio	[2018: 1552 MW]	34,1 %

Bis zum Jahr 2020 soll die mittlere erwartete kumulierte Leistung der beiden konservativeren beziehungsweise optimistischeren Studien für das BAU- und GREEN-Szenario angenommen werden. In ei-

ner groben Abschätzung der darüber hinausgehenden Entwicklung soll angenommen werden, dass die kapazitätsbezogenen Zuwächse sich jeweils grob halbieren, auf 7 % p.a. im BAU- und 17 % p.a. im GREEN-Szenario. Damit entwickelt sich der Markt bis 2025 sehr dynamisch, wenn auch ausgehend von einem niedrigen Niveau. Ab 2025 sollen das Kapazitätswachstum dann auf 3,5 % p.a. beziehungsweise 8 % p.a. sinken.

Tabelle 2-23: Kumulierte installierte Kapazität weltweit in MW

	Kumulierte installierte Kapazität weltweit in MW	
	Trend	Green Economy
2013	160	
2025	1.281	3.775
2050	3.027	25.853

Mit einer angenommenen Lebensdauer von 25 Jahren ergeben sich damit die folgenden jährlichen Installationen.

Tabelle 2-24: Weltweit jährlich installierte Kapazität an CPV in MW (inklusive Ersatzbauten)

	2013	2025	2050
BAU	53	89,7	196
GREEN	53	641,7	2.710

2.1.3.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Aus den Marktentwicklungen ergeben sich die folgenden Materialbedarfe:

Tabelle 2-25: Materialbedarfe für Tandemzellen in Konzentrierenden Photovoltaikanlagen global (in t/a)

Material	BAU			GREEN		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Gallium	0,00159	0,002691	0,00588	0,00159	0,019251	0,0813
Germanium	0,0318	0,05382	0,1176	0,0318	0,38502	1,626
Indium	0,00053	0,000897	0,00196	0,00053	0,006417	0,0271
Silber	0,00053	0,000897	0,00196	0,00053	0,006417	0,0271
Silizium (Metall)	39,1	66,2	145	39,1	474	2.000

2.1.3.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Insbesondere die Marktentwicklung ist weiter zu beobachten, da diese momentan noch unsicher erscheint. Wichtige Konkurrenztechnologien sind solarthermische Kraftwerke und konventionelle Solarfarmen. Auch die Weiterentwicklung der Zelltechnologie ist ein wichtiger Faktor für die zukünftigen Materialbedarfe.

2.1.3.7 Quellen

Ncouniot / Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems,

2010: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:StructureMJetspectre.png>

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

Fraunhofer ISE, 2013d Fraunhofer ISE, Entwicklungslinien der PV-Technologien und Materialsstitutionsmöglichkeiten. Freiburg

Fraunhofer ISE 2015 Fraunhofer ISE, Current Status of Concentrator Photovoltaic. Freiburg

Haysom, Jafarieh, Anis, Hinzer, & Wright, 2014 *Learning curve analysis of concentrated photovoltaic*. Wiley Online Library

REN21, 2015 Renewables 2015, Global Status Report. Paris.

2.1.4 UT Nr. 91: „Si-Dickschichtzellen“

2.1.4.1 Technologiebeschreibung

Dickschichtsolarzellen, die kristallines Silizium (c-Si) als Halbleitermaterial verwenden, sind die heutzutage dominierende Photovoltaik-Linie. Sie haben eine sehr hohe Lebensdauer und Lichtausbeute von bis zu 20 %. Einsatzgebiete reichen von kleinen Anlagen in Privatbesitz bis hin zu großen Anlagen zur gewerbsmäßigen Stromerzeugung.

2.1.4.2 Spezifische Einheit

Als Definition der spezifischen Einheit wird die maximal mögliche Leistung der Anlagen unter Standardbedingungen als Peak-Leistung definiert. Sie wird in Watt gemessen und als kWp (Kilowatt, Peak) angegeben.

2.1.4.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Eine Si-Dickschichtzelle besteht aus zwei Siliziumschichten, die mit Fremdatomen dotiert sind. Diese liegen zwischen zwei Elektroden, die den elektrischen Kontakt herstellen. Die Wafer-Dicke hat in der Vergangenheit stetig abgenommen; es wird erwartet, dass sich dieser Trend fortsetzt (vgl. Abbildung 2-9).

Abbildung 2-9: Halbleiter-Schichtdicken von Si-Dickschichtzellen



Quelle: Fraunhofer ISE, 2014

Zur Dotierung kommen verschiedene Elemente in Betracht, die drei bzw. fünf Elektronen in ihrer äußeren Hülle haben. Da die benötigte Menge an Dotierungselementen jedoch klein ist, sollen diese hier nicht weiter betrachtet werden.

Neben Silizium in den Halbleitern ist aus der betrachteten Materialliste Silber in den Frontkontakten zu finden. (Fraunhofer ISE, 2013d) erwartet jedoch, dass Silber in dieser Funktion ab 2020 durch Kupfer substituiert wird (der spezifische Kupferbedarf wird ab 2025 dadurch für diese Betrachtung nicht erhöht, da sich die dafür benötigte Menge nicht spezifizieren lässt. Zudem wird zur Verkabelung der Anlage Kupfer als Leiter verwendet).

Tabelle 2-26: Spezifischer Materialbedarf für Si-Dickschichtzellen in g pro Kilowatt (peak)

Material	2013	2025	2050
Indium	4	0	0
Kupfer	630	630	630
Silber	62	0	0
Silizium (Metall)	6000	3000	2000

Quelle: Fraunhofer ISE 2013d

Deutschland

Die in Deutschland installierte Kapazität in den Stützjahren folgt dem mittleren respektive sehr hohem Ausbaupfad aus (Wuppertal Institut, 2014). Für eine detaillierte Betrachtung der Marktentwicklung sei auf Kapitel 2.1.2 (Dünnschicht-Solarzellen) verwiesen. Die dort getroffenen Annahmen sollen hier übernommen werden.

Mit den aus (Wuppertal Institut, 2014) abgeleiteten Marktanteil für c-Si-Zellen ergeben sich die folgenden Zubauten (inklusive Ersatzbauten):

Tabelle 2-27: Jährliche nationale Neuinstallationen in MWp

Installationen (GW/a)	2014	2025	2050
BAU	3.201	2.437,5	3.136
GREEN	3.201	5.528	10.192

Quelle: Wuppertal Institut, 2014; eigene Berechnungen

Global

Aus einem auch global hohen Wachstum heraus ergeben sich die folgenden jährlichen Zubauten (inklusive Ersatzanlagen):

Tabelle 2-28: Globale Neuinstallationen der Photovoltaik und davon Si-Dickschicht in MW/a

Installationen (GW/a)	2014	2025	2050
BAU	37.830	49.725	150.626
GREEN	37.830	117.000	238.140

Quelle: (IEA, 2012), (IEA, 2014)

2.1.4.4 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Auf der Basis der definierten spezifischen Einheit sowie der eingeschätzten Marktentwicklung resultiert folgender Materialbedarf für Deutschland in den Szenarien Business-as-Usual und Green Economy.

Tabelle 2-29: Absolute Materialbedarfe für Silizium-Dickschicht-Solaranlagen in Deutschland (in t/a)

Material	BAU			GREEN		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Indium	12,8	0	0	12,8	0	0
Kupfer	2.017	1.536	1.976	2.017	3.483	6.421
Silber	199	0	0	199	0	0
Silizium (Metall)	19.206	7.313	6.272	19.206	16.585	20.384

Weltweit ergeben sich folgende Materialbedarfe:

Tabelle 2-30: Absolute Materialbedarfe für Silizium-Dickschicht-Solaranlagen weltweit (in t/a)

Material	BAU			GREEN		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Indium	151	0	0	151	0	0
Kupfer	23.833	31.327	94.894	23.833	73.710	150.028
Silber	2.346	0	0	2.346	0	0
Silizium (Metall)	226.980	149.175	301.252	226.980	351.000	476.280

2.1.4.5 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die Technologie der Si-Dickschichtzellen ist gut etabliert. Untersuchungsbedarfe betreffen eher die Entwicklung von Konkurrenztechnologien, die die Marktentwicklung beeinflussen könnten.

2.1.4.6 Quellen

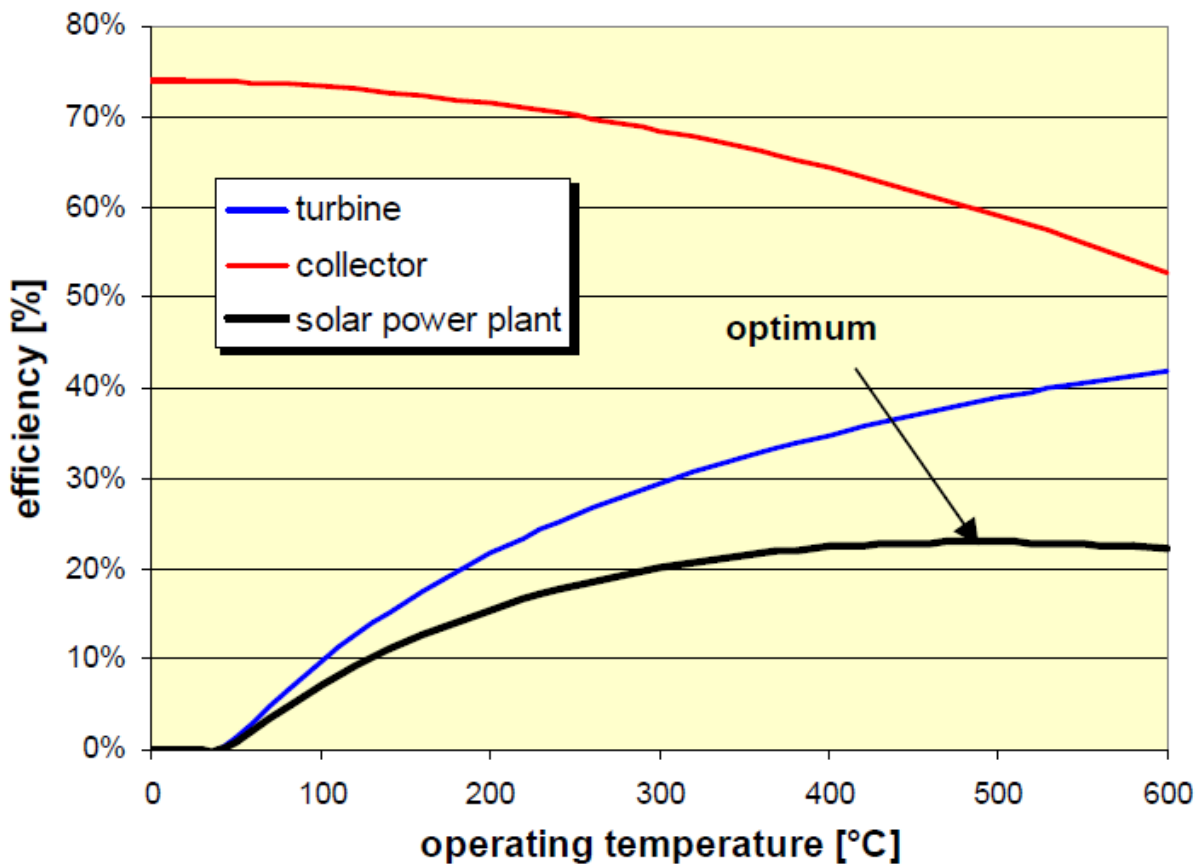
Fraunhofer ISE 2013d	Fraunhofer ISE, Entwicklungslinien der PV-Technologien und Materialsstitutionsmöglichkeiten. Freiburg
Fraunhofer ISE 2014	Photovoltaics Report. Freiburg
Fraunhofer ISE 2015	Current Status of Concentrator Photovoltaic. Freiburg
IEA 2012	International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris.
IEA 2014	Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy. Paris.
Wuppertal Institut 2014	Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.5 UT Nr. 93: „CSP-Technologie“

2.1.5.1 Technologiebeschreibung

Concentrated Solar Power (CSP) Kraftwerke nutzen Sonnenenergie zur Stromerzeugung. Anders als photovoltaische Anlagen nutzen sie dabei nicht den photoelektrischen Effekt. Stattdessen konzentrieren Spiegelsysteme die Sonnenstrahlen auf einen Receiver, in dem ein zirkulierendes Wärmemedium erhitzt wird. Dieses Wärmemedium treibt dann entweder direkt oder über einen Wärmetauscher einen Dampfkreislauf an. CSP-Kraftwerke können unterschiedliche Spiegelsysteme und Wärmemedien nutzen. Allen Kraftwerken ist gemein, dass sie (wie auch CPV-Kraftwerke) auf hohe Direktnormalstrahlung (über 2000 kWh/(m²a)) angewiesen sind, da sich diffuse Strahlung nicht konzentrieren lässt. Außerdem müssen die Anlagen der Sonne nachgeführt werden, damit die Strahlung im Absorber fokussiert wird. Höhere Temperaturen im Wärmemedium erlauben dabei höhere theoretische Wirkungsgrade, während jedoch gleichzeitig höhere Wärmeverluste im Receiver auftreten. Für jede Anlage ist somit ein optimaler Temperaturarbeitspunkt zu finden (vgl. Abbildung 2-10). Dieser (und damit auch die Gesamteffizienz der Anlage) steigt mit der Konzentration.

Abbildung 2-10: Abhängigkeit der Teil- und des Gesamtwirkungsgrad von der Temperatur



Quelle: (Fraunhofer ISE, 2011)

Dadurch, dass CSP-Kraftwerke zunächst ein Wärmedium erhitzen, lassen sich sehr gut thermische Speicher integrieren, die auch über Nacht eine Energieerzeugung möglich machen. Damit sind CSP-Kraftwerke bei entsprechender Auslegung prinzipiell grundlastfähig. Da die Energie zur Speicherung nicht gewandelt werden muss, ist der Gesamtwirkungsgrad sehr viel höher als etwa bei Kombination einer Photovoltaikanlage mit elektrochemischer Speicherung. Dies wird als größter Vorteil gegenüber der photovoltaischen Nutzung gesehen, die (bezogen auf die installierte Peak-Leistung) bis dato günstiger ist. Eine andere Option, um Schwankungen in der erzeugten elektrischen Energie zu minimieren, ist die Auslegung der Anlage, so dass sie die zusätzliche Feuerung von Biomasse oder fossilen Brennstoffen erlaubt, wenn die Sonneneinstrahlung abnimmt. So könnten CSP-Kraftwerke als Brückentechnologie beim Übergang zu einem regenerativen Energiesystem dienen.

Ein Problem für CSP-Kraftwerke ist die Kühlung, für die große Mengen an Wasser benötigt werden. Gerade in den Regionen, in denen die Kraftwerke wahrscheinlich eingesetzt werden, ist dies häufig eine knappe Ressource. Eine Luftkühlung ist technisch möglich, erhöht aber die Investitionskosten.

Parabolrinnenkraftwerke

Noch 2013 nutzten mehr als 95 % der kommerziell betriebenen CSP-Kraftwerke Parabolrinnensysteme. Diese bestehen aus einer verspiegelten Rinne mit parabelförmigem Querschnitt. In der Brennnlinie läuft ein Absorberrohr, das das Wärmedium führt. Die Systeme müssen einachsigt nachgeführt werden.

Im Absorberrohr wird die Strahlung in Wärmeenergie umgewandelt. Dazu ist das Rohr mit einer Beschichtung versehen, die im Spektralbereich des Sonnenlichts möglichst absorbiert, im Infrarotbereich dagegen möglichst reflektierend wirkt (also wenig Strahlung emittiert), um die Wärmeverluste gering zu halten. Zudem ist das Absorberrohr von einem evakuierten Glashüllrohr umgeben.

Fresnelkollektoren

Anders als in Parabolrinnenkraftwerken wird bei Nutzung eines Fresnelkollektors der Absorber nicht nachgeführt, sondern bleibt statisch. Die Strahlung wird von einer Reihe an Spiegellamellen, die in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet sind, auf den Absorber reflektiert. Die Spiegel werden der Sonne nachgeführt, anders als in Parabolrinnenkraftwerken, aber sie sind plan oder nur leicht gekrümmt, was ihre Herstellung vereinfacht. Über dem Absorberrohr ist ein Sekundärspiegel angebracht, der die Strahlung reflektiert, die das Absorberrohr nicht direkt trifft.

Neben der einfacheren Herstellung der Primärspiegel haben Fresnelkollektorsysteme Vorteile in der Wartung der Spiegel, da diese bodennah angebracht sind. Dadurch werden zudem Windkräfte reduziert. Generell kann somit auf eine kostengünstigere Bauweise zurückgegriffen werden. Dafür beträgt der Jahresertrag jedoch nur rund 71 % eines gleich großen Parabolrinnenkraftwerks. Das liegt zum einen daran, dass sich die Spiegellamellen morgens und abends, wenn sie stark angestellt sind, zum Teil gegenseitig verschatten, wodurch auch im Tagesverlauf stärkere Schwankungen in der Energieaufnahme auftreten. Zum anderen entstehen größere Verluste bei der Reflektion an den Primärspiegeln und am Absorberrohr. Die niedrigeren erzielbaren Temperaturen erschweren zudem die Integration eines thermischen Speichers.

Turmkraftwerke

Anders als Fresnel- und Parabolrinnenkraftwerke wird die Solarstrahlung bei Turmkraftwerken nicht in einer Brennnlinie, sondern in einem Punkt konzentriert. Dadurch werden höhere Konzentrationsfaktoren (bis zu 1000 Sonnen) und in Folge auch höhere Temperaturen von bis zu 1.200 °C erreicht, die mit Hilfe von Gasturbinen Kraftwerksprozesse mit hohen Wirkungsgraden ermöglichen.

Als Spiegel kommen Glasflächen zum Einsatz, die zwischen 1 m² und 140 m² groß sein können, sogenannte Heliostate. Sie sind meist leicht gekrümmt. Die Form des Receivers ist abhängig vom Wärmedium. Kommen Wasser/Dampf oder Salzschnmelzen zum Einsatz werden parallele Rohre aus Hochtemperatur-Metalllegierungen zu Paneelen zusammengefasst. Forschungen arbeiten darauf hin, Luft als Medium zu verwenden. In diesem Fall besteht der Receiver aus einer porösen Keramik, die die Solarstrahlung absorbiert und so die durchströmende Luft erwärmt.

Turmkraftwerke sind weniger etabliert als andere Formen von CSP-Kraftwerken. 2013 besaßen sie eine gesamte installierte Kapazität von 50 MW.

2.1.5.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die erzeugbare Leistung in Kilowatt verwendet (kWp).

2.1.5.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Sowohl Fresnelkollektor- als auch Parabolrinnenkraftwerke nutzen bisher überwiegend Thermoöle als Wärmedium. Diese sind jedoch nur bei Temperaturen bis zu 400 °C stabil. Dies limitiert die Temperatur des darauf folgenden Kraftwerkprozesses und damit seinen Wirkungsgrad. Vorteile dieses Öls sind seine niedrige Erstarrungstemperatur von 12 °C, die auf Grund der guten Isolierung der Absorberrohre auch nachts nicht erreicht wird. Unter Ressourcen-Gesichtspunkten ist der Einsatz des Öls - einer Mischung aus Diphenyloxid und Diphenyl (Seitz, 2012) – unkritisch. Es ist jedoch stark umweltschädlich, weswegen die Anlage auf mögliche Lecks zu überwachen ist.

Eine Alternative zum Thermoöl sind Salzschnmelzen. Zu finden sind verschiedene Mischungen aus Kaliumnitrat (KNO_3), Natriumnitrat (NaNO_3) und Calciumnitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Das genaue Verhältnis dieser Stoffe bestimmt das thermische Verhalten der Salzschnmelze. Die Andasol-Kraftwerke in Spanien beispielsweise nutzen Solar Salt, eine Mischung aus 40 % Kaliumnitrat (KNO_3) und 60 % Natriumnitrat (NaNO_3). Generell haben Salzschnmelzen eine höhere Temperaturbeständigkeit bei geringeren gewichtsbezogenen Kosten. Solar Salt kann dabei mit 600 °C die höchsten Temperaturen übertragen, was Frischdampfparameter von rund 500 °C ermöglicht. Die Erstarrungstemperatur von Salzschnmelzen liegt jedoch vergleichsweise hoch, die von Solar Salt beispielsweise bei 238 °C. Ein Absenken des Erstarrungspunktes durch Änderung der chemischen Komposition zieht auch immer eine geringere Temperaturbeständigkeit mit sich. Es kann angenommen werden, dass ab 2025 hauptsächlich Salzschnmelzen als Wärmeträger zum Einsatz kommen.

Neuere Konzepte beschäftigen sich mit der Möglichkeit, Wasser/Dampf als Wärmeträger zu nutzen. Dies hätte insbesondere den Vorteil, dass der Kraftwerksprozess direkt angetrieben werden könnte. Damit würde die Komplexität der Anlage abnehmen. Allerdings stellt diese Option höhere Ansprüche an die Absorberrohre. Insbesondere thermo- und fluiddynamische Fragestellungen müssen geklärt werden.

Neben dem Einsatz als Wärmeträgerfluid finden thermische Salze auch in der Energiespeicherung Verwendung. Alternativ können jedoch auch Phasenwechselmaterialspeicher verwendet werden, die sehr viel geringere Mengen an thermischem Salz benötigen, oder Betonspeicher.

Als Spiegelmaterial kommt bisher hauptsächlich Glas mit einer 100 nm starken Silberbeschichtung (Pihl, Kushnir, Sanden, & Johnsson, 2012) zum Einsatz. Alternativ können in Zukunft Aluminiumbleche zum Einsatz kommen, die mit reflexionserhöhenden und schützenden Schichten versehen sind. Ein anderer Ansatz ist, diese Schichten direkt auf eine Polymerfolie aufzubringen.

Die prozessspezifischen Materialien umfassen weniger als 5 Gew.-% des gesamten Materialbedarfs, es werden aber besondere Herausforderungen an die Komponenten gestellt. So bestehen Dampfturbinen aus Stahllegierungen mit einem hohen Anteil an Chrom sowie Molybdän, Mangan, Nickel und Vanadium. Auch die dampfführenden Rohre werden aus Chromstahl gefertigt.

Tabelle 2-31: Materialbedarfe eines Parabolrinnenkraftwerks (g/kWp)

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Chrom	2200	2200	2200
Kupfer	3200	3200	3200
Magnesium	3000	3000	3000
Mangan	2000	2000	2000
Molybdän	200	200	200
Nickel	940	940	940
Silber	13	13	13
Titan	25	25	25
Vanadium	1,9	1,9	1,9
Zink	650	650	650

Quelle: Pihl, Kushnir, Sanden, & Johnsson 2012

Tabelle 2-32: Materialbedarfe eines Turmkraftwerks (g/kWp)

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Chrom	3700	3700	3700
Kupfer	1400	1400	1400
Magnesium	2600	2600	2600
Mangan	5700	5700	5700
Molybdän	56	56	56
Nickel	1800	1800	1800
Niob	140	140	140
Silber	16	16	16
Titan	0	0	0
Vanadium	1,7	1,7	1,7
Zink	1.400	1.400	1.400

Quelle: Pihl, Kushnir, Sanden, & Johnsson 2012

Die Materialbedarfe sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da sie aus der Untersuchung einer einzelnen Anlage stammen. (Pihl, Kushnir, Sanden, & Johnsson, 2012) Die untersuchte Anlage entspricht dem Stand der Technik und ist für eine Speicherdauer von 7,5 Stunden ausgelegt. Diese liegt unter der Speicherdauer von 14 Stunden, die als am wirtschaftlichsten angenommen wird (Wuppertal Institut, 2014). Auch die Werte des Turmkraftwerks entstammen der Untersuchung einer einzelnen Anlage, die jedoch noch nicht im kommerziellen Betrieb ist. Es ist mit einer Speicherfähigkeit von 12,7 Stunden ausgelegt.

(Wuppertal Institut, 2014) hat den spezifischen Materialbedarf von CSP-Anlagen untersucht, jedoch nur im Hinblick auf Silber. Der ermittelte Silberbedarf (aus einer Reihe von Studien) liegt bei 8,9 g/kWp und damit unter den hier angenommenen Bedarfen. Diese können demnach tendenziell als Obergrenze angenommen werden.

Im Folgenden werden exemplarisch Parabolrinnenkraftwerke betrachtet. Sie werden zusammen mit Fresnelkollektoren als auch in Zukunft dominierende CSP-Technologie angesehen. (Wuppertal Institut, 2014)

2.1.5.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Derzeit tragen CSP-Kraftwerke mit nur 3 % einen geringen Teil zur weltweiten Stromerzeugung bei. Dennoch ist ein starkes Wachstum zu beobachten: In den Jahren 2009 bis 2014 stieg die installierte Kapazität jährlich um durchschnittlich 46 %. Erwähnenswert ist insbesondere das Ivanpah Turmkraftwerk, das 2014 in Betrieb genommen wurde. Es ist das weltweit größte CSP-Kraftwerk (392 MW). Zusätzlich wurde ein kleineres Fresnel-Kraftwerk in Indien in Betrieb genommen (13 % der 2014 errichteten Kapazität).

Deutschland

Konzentrierende Solarkraftwerke können nur in Gegenden mit hoher Direktnormaleinstrahlung wirtschaftlich betrieben werden. Dies ist in Deutschland nicht gegeben.

Global

Im Jahr 2013 waren weltweit CSP-Anlagen mit 4,1 GW Leistung installiert. Die zukünftige Entwicklung von CSP-Kraftwerken erscheint noch sehr unsicher. Dennoch wird Ihnen ein großes Potential zugesprochen, insbesondere, da sie auf Grund der installierbaren Speicher ein Alleinstellungsmerkmal anderen Techniken gegenüber haben. Ein Faktor wird sein, ob die Investitionskosten mit zunehmender Erfahrung und Economies of Scale so weit gesenkt werden können, dass CSP-Kraftwerke mit PV-Farmen konkurrieren können.

Tabelle 2-33: Überblick über die prognostizierte kumulierte installierte Leistung global in GW

	2015	2025	2050
Greenpeace 2012: Reference	5		62
Greenpeace 2012: Energy [R]evolution	34		2.054
IEA 2014: 2DS		68,57	597
IEA 2014: hi-Ren		160	982

Eine optimistischere Prognose der European Solar Industry Initiative aus dem Jahr 2010 erwartet in Europa Gesamtkapazitäten von 30 GW im Jahr 2020 und 60 GW im Jahr 2030. Diese lägen damit mit einem Faktor von 2,7 bzw. 1,5 über den optimistischsten Prognosen von Greenpeace für diese Region. Das verdeutlicht, mit welcher Unsicherheit die Entwicklung behaftet ist.

Auch BMUB (2014) erwartet ein dynamisches Wachstum des Marktes für CSP-Anlagen von 23 % p.a. bis 2025. Ein solches Bild zeichnet auch die IEA in auf Klimaschutz abgestellte Szenarien (IEA 2012). Sie bilden die Grundlage für das BAU- bzw. Green-Economy-Szenario. Die Werte für 2014 sind Marktdaten aus (REN21, 2015). Die Kapazitätserweiterungen für 2025 werden berechnet mittels eines linear angenommenen Zubaus zwischen den Jahren 2020 und 2030 berechnet, die Werte für 2050 mittels der Kapazitätserweiterung ab 2040. Es wird eine Lebensdauer von 25 Jahren angenommen.

Tabelle 2-34: Neuinstallationen global in GW/a

Installationen (GW/a)	2014	2025	2050
BAU	0,9	7,85	34,3
GREEN	0,9	25	56,8

Im Gegensatz zum BAU-Szenario flacht die Wachstumskurve im GREEN-Szenario ab 2045 leicht ab. Es kann erwartet werden, dass Parabolrinnenkraftwerke und Fresnelkollektorkraftwerke jeweils 40 % des Marktes ab 2025 einnehmen.

2.1.5.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Aus diesen Betrachtungen ergeben sich weltweit die folgenden Materialbedarfe exemplarisch für Parabolrinnenkraftwerke.

Tabelle 2-35: Absoluter Materialbedarf für Parabolrinnenkraftwerke global (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Chrom	1980	3784	22352	1980	8800	36784
Kupfer	2880	5504	32512	2880	12800	53504
Magnesium	2700	5160	30480	2700	12000	50160
Mangan	1800	3440	20320	1800	8000	33440
Molybdän	180	344	2032	180	800	3344
Nickel	846	1617	9550	846	3760	15717
Silber	11,7	22,36	132,08	11,7	52	217
Titan	22,5	43	254	22,5	100	418
Vanadium	1,71	3,27	19,3	1,71	7,6	31,8
Zink	585	1118	6604	585	2600	10868

Zusätzlich werden Fresnelkollektorkraftwerke zum Einsatz kommen. Ohne eine genaue Einschätzung der spezifischen Materialbedarfe für Fresnelkollektoren liefern zu können, dürften diese in der gleichen Größenordnung wie die der Parabolrinnenkraftwerke liegen; damit können auch ähnliche absolute Materialbedarfe erwartet werden (für Parabolrinnen- und Fresnelkollektorkraftwerke werden gleiche Marktanteile erwartet). Turmkraftwerke könnten rund ein Fünftel des Marktes ausmachen; mit den höheren spezifischen Materialbedarfen etwa für Mangan und Niob könnten hier signifikante Materialbedarfe entstehen.

2.1.5.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Der spezifische Materialbedarf für Fresnelkollektor-Kraftwerke konnte nicht bestimmt werden. Zudem ist die weitere Entwicklung der Turmkraftwerke unsicher und deshalb zu beobachten.

2.1.5.7 Quellen

- BMUB 2014 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
- Fraunhofer ISE 2011: Platzer, Werner: Solarthermische Kraftwerke – Stand und Perspektiven 2011
- IEA, 2014 Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy. Paris.
- Pihl, Kushnir, Sanden, & Johnsson, 2012 Pihl, Erik; Kushnir, Duncan; Sanden, Björn; Johnsson, Filip, Material constraints for concentrating solar thermal power
- Platzer, 2011 Solarthermische Kraftwerke - Stand und Perspektiven
- REN21, 2015 Renewables 2015, Global Status Report. Paris.
- Seitz, 2012 Thermodynamische Simulation und Optimierung von Betriebszyklen bei solarthermischen Kraftwerken mit Flüssigsalzen als Wärmeträgermedium
- Wuppertal Institut, 2014 Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.6 UT Nr. 98: „Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge“

2.1.6.1 Technologiebeschreibung

Lithium-Ionen Batterien gelten momentan als die aussichtsreichste Technologie zur elektrochemischen Energiespeicherung in der Elektromobilität. Das liegt vor allem an ihren hohen Energie- und Leistungsdichten, die zur Erhöhung der Reichweiten wichtig sind.

Zudem besitzen sie hohe Zellspannungen (3,6 V) und eine sehr niedrige Selbstentladungsrate. Auch ihre Zykleneffizienz liegt über der, anderer Batterietechnologien.

Abbildung 2-11: Qualitativer Vergleich verschiedener Energiespeicher für den Einsatz in der Elektromobilität (DSK: Doppelschichtkondensator; LA: Blei-Säure-Batterie)

	DSK	LA	NiCd	NiMH	Li-Ion	NaNiCl	H ₂ (FCV)
Spez. Energie	--	--	-	o	+	+	++
Leistungsdichte	++	+	+	+	+	o	o
Zykleneffizienz	++	+	o	o	++	+	--
Zyklusfestigkeit	++	--	+	o	+	+	o
Selbstentladung ¹	-	o	-	-	o	-	++
Lebensdauer	+	-	+	o	o	o	o
Spez. Invest.-Kosten ²	--	+	o	o	-	o	-
Verfügbarkeit	+	++	++	++	o	+	-
Sicherheit	++	+	+	+	-	o	o
Umwelt ³	+	o	-	o	o	o	+

++ = sehr gut, + = gut, o = befriedigend, - = ausreichend, -- = nicht ausreichend

1: sehr gute Bewertung bedeutet geringe Selbstentladung

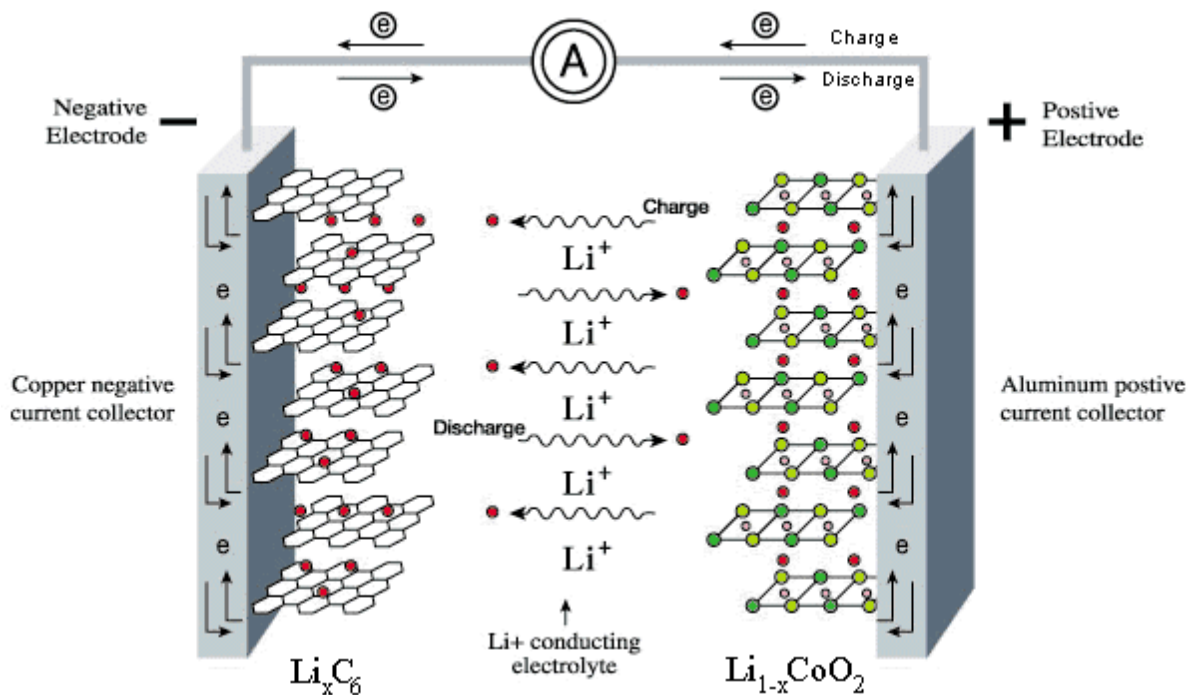
2: sehr gute Bewertung bedeutet geringe spez. Investitionskosten in €/kWh

3: sehr gute Bewertung bedeutet keine wesentliche Beeinträchtigung der Umwelt/Ökologie

Quelle: BMWi, 2009

Lithium-Ionen-Akkumulatoren speichern chemische Energie, die sich in elektrische umwandeln lässt. In Lithium-Ionen-Batterien dienen die Lithium-Ionen als Ladungsträger. Wird der Akku geladen, lagern sich die Lithium-Ionen in der Kathode ein. Bei Energieentnahme wandern sie in die Anode, die dort abgegebenen Elektronen treiben über einen äußeren Stromkreis einen Verbraucher an. Das genaue Design der Batterie (insbesondere das Elektrodenmaterial) ist abhängig von den speziellen Anforderungen, denn viele Attribute wie etwa Leistungsdichte oder Kapazität lassen sich nicht gleichzeitig optimieren. (AICHE, 2013) In Batterien für Elektrofahrzeuge werden mehrere Zellen zu Modulen kombiniert.

Abbildung 2-12: Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batterie



Quelle: (UBA, 2007)

2.1.6.2 Spezifische Einheit

Spezifische Einheit ist eine Li-Ionen-Batterien mit einer Kapazität von 9 kWh für Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEV) und 30 kWh für Battery Electric Vehicle (BEV).

Für den Individualverkehr im Rahmen der Elektromobilität lassen sich mehrere Konzepte unterscheiden: Im einfachsten Fall wird ein PKW mit Verbrennungsmotor mit einer zusätzlichen, vergleichsweise kleinen Batterie ausgerüstet, die zur Speicherung der Bremsenergie verwendet wird. Hybridfahrzeuge (Plug-in Hybrid Electric Vehicles: PHEV) dagegen sind mit einer Batterie ausgestattet, die über das Stromnetz geladen werden kann und die einen Elektromotor antreibt. Üblicherweise sind diese Batterien für geringe bis mittlere Distanzen dimensioniert (9kWh, entspricht circa 50 km Reichweite). Für darüber hinausgehende Distanzen besitzen sie einen Verbrennungsmotor mit Antriebsstrang. Reine Batteriefahrzeuge (Battery Electric Vehicle: BEV) sind nur noch mit einer Batterie und Elektromotor ausgerüstet. Typische Kapazitäten liegen bei etwa 30 kWh, was einer Reichweite von über 150 km entspricht.

Batterien in Hybridfahrzeugen, die rein zur Speicherung von Bremsenergie eingesetzt werden, sollen hier nicht betrachtet werden. Sie dienen nur der Effizienzsteigerung konventioneller Verbrennungsmotoren, ohne einen Wechsel auf hauptsächlich erneuerbare Energiequellen zu unterstützen. Darüber hinaus ermöglichen sie nicht die potenzielle Netzunterstützung, die den über das Netz aufladbaren Elektrofahrzeugen zugesprochen wird. Zudem ist der Materialbedarf der in ihnen verbauten Batterien deutlich geringer.

2.1.6.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien kommt eine Vielzahl an Kombinationen verschiedener Anoden-, Kathoden und Elektrolytmaterialien in Betracht, die jeweils verschiedene Vor- und Nachteile (etwa im Hinblick auf Kapazität, Lebensdauer, Sicherheit oder Leistung) haben. Welche Variante zum Einsatz kommt hängt von dem jeweiligen Anwendungsbereich ab. Das momentan gebräuchlichste

Anodenmaterial ist Graphit. Andere Materialien, die in Betracht kommen, sind Legierungen oder Lithium-Metalle.

Große Entwicklungsarbeit konzentriert sich auf die Kathodenmaterialien. Momentan kommen hier häufig Lithiummetalloxide (beispielsweise LiMn_2O_4) zum Einsatz. Insbesondere auf dem chinesischen Markt ist auch LiFePO_4 von Bedeutung. Kurzfristig könnte der Einsatz von Kohlenstoff-Kompositen die gravimetrische und volumetrische Energiedichte um 15 % steigern. Für diese Systeme muss jedoch die erreichbare Zyklenzahl noch deutlich gesteigert werden. Mittelfristig ist der Einsatz von Lithium-Schwefel-Batterien denkbar. Diese sind technisch schon realisierbar, allerdings ist die Lebensdauer noch sehr begrenzt. Der Einsatz im Elektromobil wird daher nicht vor 2030 erwartet.

Als Elektrolyt wird LiPF_6 in organischer Lösung verwendet. In einer Studie identifizierte Continental Phosphor als das kritischste Material in der Herstellung von LIB (Birke, 2015). In naher Zukunft werden lithiumfreie Elektrolyte zum Einsatz kommen. Noch unsicher ist der Einsatz von Lithium-Polymer-, Lithium-Feststoff- und Lithium-Metall-Systemen. Für die Nutzung von Lithium-Metallen in Batterien der Elektromobilität muss zunächst die Sicherheit gewährleistet werden. Für den Einsatz von Polymermembranen oder festen Elektrolyten (Glas oder Keramik) ist insbesondere bei letzteren die Leitfähigkeit bei Raumtemperatur noch nicht gesichert. Auch die Lebensdauer scheint problematisch.

Auf Systemebene sind 5V-Systeme nach 2020 möglich, die die Energiedichten noch einmal steigern könnten. Hier müssen jedoch passende Elektrolyte gefunden werden; auch das in den Zellen verwendete Aluminium könnte korrodieren, so dass möglicherweise Aluminium-Kupfer-Legierungen zum Einsatz kommen müssten.

Sehr langfristig denkbar ist die Entwicklung von Lithium-Luft-Systemen. Diese erscheinen jedoch selbst auf Zellebene bis 2030 als sehr unsicher.

Als Stromableiter wird in den Batteriezellen mit Graphitelektrode Kupfer eingesetzt. Die Ableiterfolie hat typischerweise eine Dicke von 10-18 μm . Besteht die Elektrode aus Lithium-Titanat kann Kupfer durch Aluminium substituiert werden. Zusätzlich sind die Zellverbinder und Stromschienen, die der Verschaltung mehrerer Zellen zu Batterien dienen aus Kupfer. Die benötigte Kupfermenge ist stark abhängig davon, ob die Batterien viel Energie speichern oder eine hohe Leistung liefern sollen – im letzten Fall müssen die Ableiter entsprechend skaliert sein, damit sie hohe Stromstärken führen können. Je nach Zellgröße und Stromstärken können zusätzliche interne „Hilfsableiter“ eingesetzt werden. So kann der spezifische Kupferbedarf je nach Anwendungsfeld um den Faktor 2 schwanken.

Für die unten angegebenen Materialinhalte wurden für 2013 LiMn_2O_4 – Graphit und LiPF_6 in organischer Lösung als Elektrolyt und für 2025 LiMn_2O_4 – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ und ein LiPF_6 -freier Elektrolyt (Schmid & Pillot, 2014) als Zellchemie angenommen. Für das Jahr 2050 können keine seriösen Annahmen getroffen, daher werden die Werte für 2025 übernommen. Tendenziell kann erwartet werden, dass 5V-Materialien die Materialeffizienz steigert, auch die Nutzung von Schwefel und Sulfaten als Lithium-Ersatz ist denkbar, ist aber noch nicht abzuschätzen. Dabei muss auch beachtet werden, dass Materialeinsparungen, die auf einer verbesserten Materialeffizienz beruhen, wahrscheinlich durch größer dimensionierte Batterien wieder zunichte gemacht werden. Diese würden größere Reichweiten ermöglichen, die sehr wahrscheinlich auch nachgefragt werden.

Für die unten angegebenen Werte wurde auf (Argonne National Laboratory, 2012) zurückgegriffen. Die Werte für Lithium wurden übernommen. Die Werte der anderen Elemente wurden aus der chemischen Zusammensetzung von Anode, Kathode und Elektrolyt berechnet, dabei wurden ideal stöchiometrische Verhältnisse angenommen. Dies ist sowohl für den Elektrolyten gerechtfertigt, als auch für die Elektrodenmaterialien: Hier wird zwar beim Laden Lithium extrahiert, die Zellen werden jedoch im ungeladenen Zustand gefertigt. Die zu Grunde gelegten Batterietypen sind in den Tabellen vermerkt.

Tabelle 2-36: Materialinhalte für eine PHEV-Batterie in g

Material	2013 (LiMn_2O_4 – Graphit und LiPF_6 als Elektrolyt)	2025 (LiMn_2O_4 – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ und LiPF_6 - freier Elektrolyt)	2050 (LiMn_2O_4 – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ und LiPF_6 - freier Elektrolyt)
Kupfer	13300	13300	13300
Lithium	1020	3570	3570
Mangan	12681	12681	12681
Phosphor	308	0	0
Titan	0	15780	15780

Tabelle 2-37: Materialinhalte für eine BEV-Batterie in g

Material	2013 (LiMn_2O_4 – Graphit)	2025 (LiMn_2O_4 – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ und Li-freier Elektrolyt)	2050 (LiMn_2O_4 – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ und Li-freier Elektrolyt)
Kupfer	23100	23100	23100
Lithium	3400	3400	3400
Mangan	42270	42270	42270
Phosphor	771	0	0
Titan	0	52600	52600

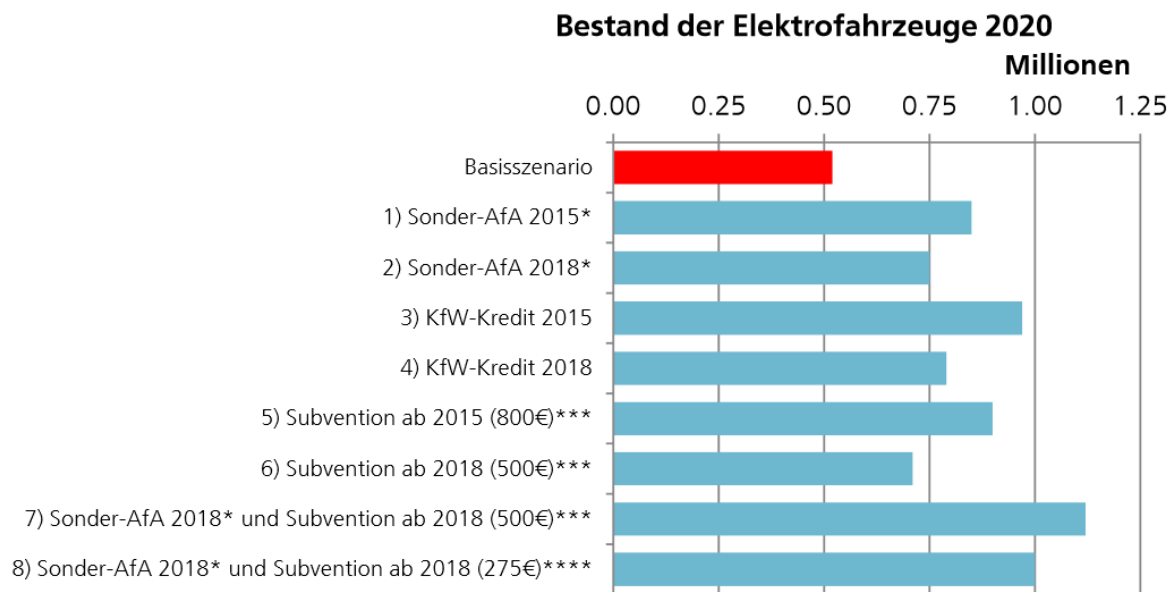
2.1.6.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Noch stellt die Elektromobilität einen verschwindend kleinen Markt dar. Generell wird mittel- und langfristig eine hohe Marktdynamik erwartet.

Deutschland

Führende deutsche Automobilhersteller sind in den Markt der Elektromobilität eingestiegen. 2014 wurden 17 Elektrofahrzeugmodelle angeboten, 2015 sollen 12 neue Modelle hinzukommen. Absolut sind in Deutschland nur rund 24.000 Elektrofahrzeuge zugelassen (Neuzulassungen PKW gesamt 2014: 3 Mio.). Bis 2014 wurden 4.800 AC-Ladestationen an 2.400 Standorten und 100 Schnellladepunkte aufgebaut. Bis 2020 sollen in Deutschland eine Million Elektrofahrzeuge zugelassen sein, und Deutschland so zum Leitmarkt der Elektromobilität werden. Abbildung 2-13 zeigt, dass dieses Ziel nur durch entsprechende politische Maßnahmen erreicht werden kann.

Abbildung 2-13: Prognose des Einflusses verschiedener Politikmaßnahmen



Quelle: (Fraunhofer ISI, 2014)

Für eine genauere Betrachtung der Entwicklung des Fahrzeugbestands siehe UT 38 (Elektroantriebsmotoren). Die dort hergeleiteten Zahlen sollen auch hier verwendet werden. Damit ergeben sich die folgenden Neuzulassungen:

Tabelle 2-38: Neuzulassungen PHEV und BEV (national)

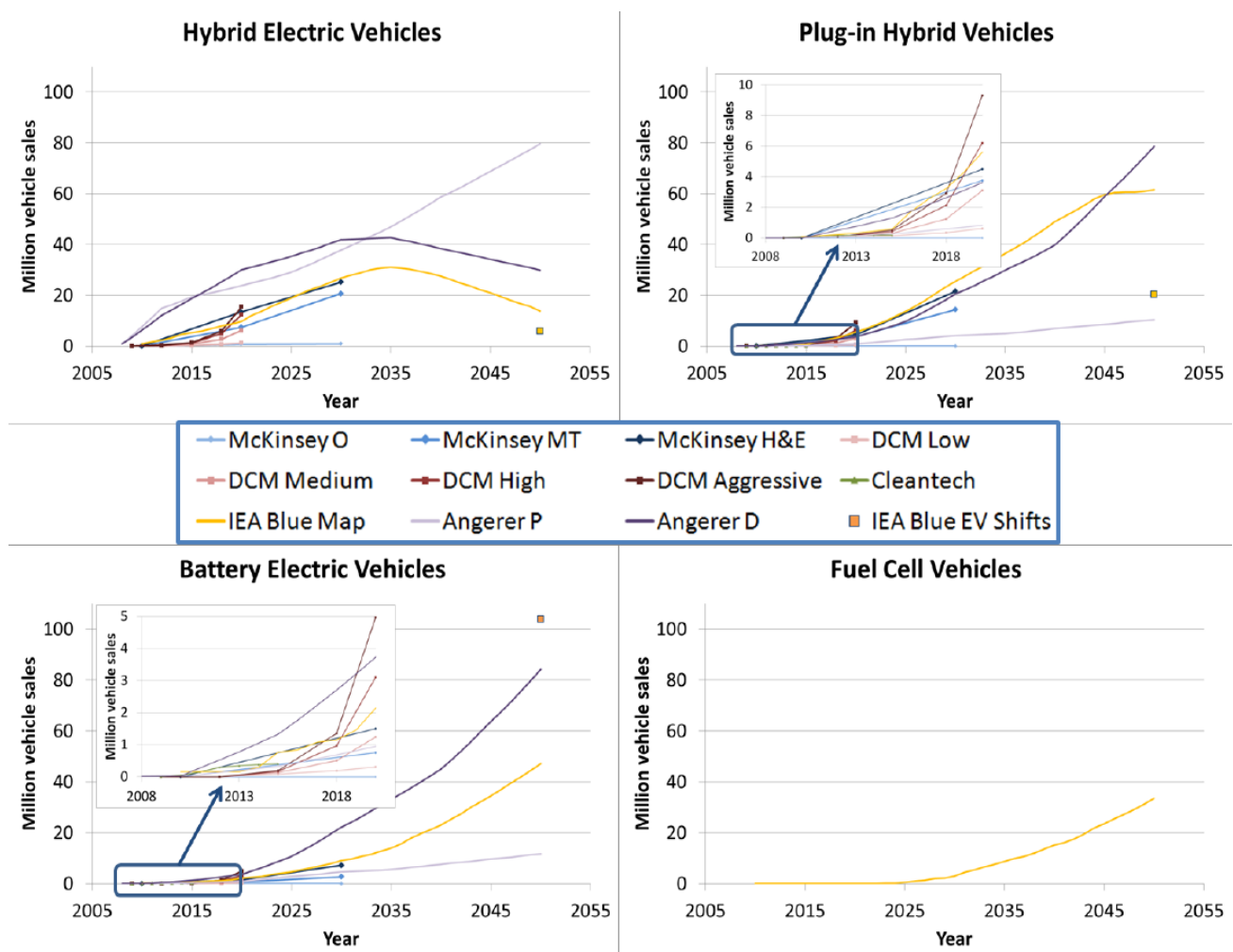
	2013	2025		2050	
		BAU	GREEN	BAU	GREEN
PHEV	1.385	100.000	386.295	333.000	1.171.011
BEV	6.051	166.000	154.518	532.000	749.364

Global

Weltweit wurden bis Ende 2014 über 712.000 Elektrofahrzeuge verkauft. Übereinstimmend wird ein starker Anstieg des Marktanteils der Elektromobilität erwartet.

(UK Energy Research Centre, 2013) haben eine Analyse der wichtigsten Studien zum zukünftigen Markt der Elektromobilität durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-18 dargestellt.

Abbildung 2-14: Übersicht - Szenarien zum Markt der Elektromobilität



Für eine Herleitung der im Folgenden verwendeten Zahlen siehe UT Nr. 38 Elektroantriebsmotoren. Mit den dort getroffenen Annahmen ergeben sich die folgenden Zulassungszahlen.

Tabelle 2-39: Abgesetzte PHEV und BEV (global)

	2013	2025		2050	
		BAU	GREEN	BAU	GREEN
PHEV	41.800	1.510.327	15.103.270	20.852.594	70.436.777
BEV	110.200	1.510.327	6.041.308	8.320.493	45.074.534

2.1.6.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Auf der Basis der definierten spezifischen Einheit sowie der eingeschätzten Marktentwicklung resultiert daraus folgender Materialbedarf für Deutschland in den Szenarien Business-as-Usual und Green Economy.

Tabelle 2-40: Absoluter Materialbedarf für Lithium-Ionen-Batterien für BEV und PHEV in Deutschland (in t/a)

	BAU			Green Economy	
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	158	5.165	16.718	8.707	32.885
Lithium	22,0	921	2.998	1.904	6.728
Mangan	273	8.285	26.710	11.430	46.525
Phosphor	5,09	0	0	0	0
Titan	0,00	10.310	33.238	14.223	57.895

Tabelle 2-41: Absoluter Materialbedarf für Lithium-Ionen-Batterien für BEV und PHEV global (in t/a)

	BAU			Green Economy	
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	3.102	54.976	469.543	340.428	1.978.031
Lithium	417	10.527	102.733	74.459	404.713
Mangan	5.188	82.994	616.139	446.891	2.798.509
Phosphor	97,8	0	0	0	0
Titan	0,00	103.276	766.712	556.102	3.482.413

2.1.6.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Der Einsatz von Lithium-Ionen-Akkus in der Elektromobilität ist recht sicher, Umfang und Geschwindigkeit der Marktentwicklung sind aber unsicher und sollten daher beobachtet werden. Außerdem ist die technologische Weiterentwicklung im Auge zu behalten, um frühzeitig zu identifizieren, welche Zellchemie zukünftig Bedeutung erlangt.

2.1.6.7 Quellen

- AICHE 2013 Special Section: Energy. Lithium-Ion-Batteries.
- Birke 2015 Persönliches Gespräch mit Peter Birke am 18.05.2015
- Schmid & Pillot 2014 R. Schmid, C. Pillot, Introduction to energy storage with market analysis and outlook
- ANL (Argonne National Laboratory) 2012 Argonne National Laboratory, Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle.
- UK Energy Research Center 2013 Materials Availability: Potential constraints to the future low-carbon economy - Working Paper II: Batteries, Magnets and Materials.
- BMUB 2014 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
- BMW I 2009 Stand und Entwicklungspotential der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie
- Wietschel et al. 2015 Wietschel, Martin; Ullrich, Sandra; Markewitz, Peter; Schulte, Friedrich; Genoese, Fabio, Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden.
- Fraunhofer ISI 2014 Wirkung von Förderinstrumenten auf den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen in Deutschland
- Navigant Research 2015 Nearly 700 Megawatts of Energy Storage Capacity Have Been Announced in 2014-2015

2.1.7 UT Nr. 100: „Lithium-Ionen-Stromspeicher“

2.1.7.1 Technologiebeschreibung

Neben der Anwendung als Energiespeicher für die Elektromobilität sind Lithium-Ionen-Batterien (LIB) auch für die stationäre Energiespeicherung interessant. Die Technologie entspricht prinzipiell der auch in der Elektromobilität eingesetzten. LIB können bis zu einem Tag als Kurzzeitspeicher fungieren. Sie besitzen sehr kurze Reaktionszeiten. Damit eignen sie sich zur Bereitstellung von Regelleistung und Blindleistung und der Sicherstellung der Spannungsqualität. Zudem sind sie schwarzstartfähig. Insbesondere zur dezentralen Energiespeicherung sind Batterien prädestiniert, da sie sich sehr gut skalieren lassen. Daher werden sie in Verbindung mit vergleichsweise kleinen PV-Anlagen genutzt. Entsprechend skaliert können sie jedoch auch Erzeugungsspitzen von Windparks und größeren Solarfarmen abfangen oder bei großer Nachfrage Energie ans Netz abgeben. Mögliche Auslegungen finden sich damit in der Reichweite von einigen Kilowatt bis hin zu mehreren Megawatt.

Wie auch im Bereich der Elektromobilität werden für die stationäre Energiespeicherung große Hoffnungen in die LIB gesteckt. Das liegt insbesondere an ihren hohen Energiedichten und Effizienz. Zudem hat sie eine vergleichsweise geringe Selbstentladung. Einer breiten Nutzung entgegen steht noch der hohe Preis der LIB-Technologie. Auch die stationäre Stromspeicherung könnte dabei von Erfahrungen profitieren, die mit einem verstärkten Einsatz in der Elektromobilität gemacht werden. Zwar unterscheiden sich die Anforderungen und damit auch das konkrete Design der eingesetzten Batterien in beiden Anwendungsfällen, es wird jedoch erwartet, dass auch LIB-Stromspeicher von der Technologieentwicklung und insbesondere vom Aufbau größerer Produktionskapazitäten profitieren.

2.1.7.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die ausspeicherbare Energie verwendet [kWh].

2.1.7.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Die generellen Forschungsrichtungen im Bereich der LIB wurden schon im vorherigen Kapitel für Fahrzeugbatterien abgehandelt. Die dort getätigten Aussagen sind prinzipiell übertragbar.

Für stationäre Batterien besitzen jedoch andere Kriterien Priorität als im mobilen Einsatz. Beispielsweise ist das Gewicht der Batterie tendenziell nachrangig, was den Einsatz von Mangan gegenüber Kobalt (das vor allem in portablen Anwendungen genutzt wird) favorisiert. Dadurch werden höhere Ladeströme ermöglicht.

Der unten angegebene Wert für den spezifischen Lithiumbedarf stammt aus (Wuppertal Institut, 2014). Die Lithiumintensität liegt etwa im Bereich der Batterien für die Elektromobilität. Ein Vergleich mit (Argonne National Laboratory, 2009) legt nahe, dass dafür von einer Graphitanode ausgegangen wird. Da Kobalt in stationären Anwendungen selten zum Einsatz kommt, kann von einer LiMn_2O_4 -Graphit-Zelle ausgegangen werden. Der Mangengehalt wird stöchiometrisch berechnet; des Weiteren wird angenommen, dass das Verhältnis von Mangan zu Phosphor dem einer BEV-Batterie entspricht. Die angenommene Kupferintensität stammt aus (KEMA, 2012). Dort wurde sie mit 220 g/kW angegeben. Das Fraunhofer IWES nimmt in ihrer Studie „Geschäftsmodell Energiewende“ an, dass das Verhältnis von Leistung zu Energie bei der Auslegung von Batterieparks 1 W/8 Wh betragen wird – die energiespezifische Kupferintensität beträgt damit 1760 g/kWh. Der Wert dieser Intensität liegt über den Werten für Batterien der Elektromobilität (in 9kWh-Batterien: 1478 g/kWh; in 30kWh-Batterien: 770 g/kWh). Neben der Abhängigkeit der Kupferintensität von der Auslegung der Batterie im Hinblick auf Leistung und Energie ist der Kupferbedarf auch abhängig von der physikalischen Größe einer Batterie. Hier entsteht ein „nicht unerheblicher zusätzlicher Kupferbedarf“ (Birke 2015) durch die benötigten Zell- und Modulverbinder sowie die Stromschienen, die in (volumetrisch) großen Batterien an Bedeutung gewinnen.

Für den Bereich der stationären Energiespeicher lassen sich keine quantitativen Einschätzungen zur Entwicklung der Zellchemie finden. Viele Entwicklungen aus dem Bereich der Elektromobilität werden sich auf die stationären Energiespeicher auswirken, genaue Aussagen lassen sich jedoch nicht treffen. Die Materialbedarfe sollen daher konstant gehalten werden.

Tabelle 2-42: Spezifische Materialbedarfe (in g/kWh)

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Kupfer	1.760	1.760	1.760
Lithium	120	120	120
Mangan	1.670	1.670	1.670
Phosphor	30,5	30,5	30,5

2.1.7.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Stationäre Batteriespeicher werden weltweit momentan zum größten Teil in den Bereichen Mobilfunk und unterbrechungsfreie Stromversorgung eingesetzt (Wietschel, Ullrich, Markewitz, Schulte, & Genese, 2015).

Damit konzentriert sich die Anwendung auf Felder, in denen keine konkurrenzfähigen Alternativen existieren; hier werden meist keine Lithium-Ionen, sondern Blei-Batterien eingesetzt. Das liegt insbesondere daran, dass Batteriespeicher immer noch vergleichsweise teuer sind. Zudem weisen sie kürzere Zyklenlebenszeiten auf als andere Speichertechnologien.

Innerhalb der als Netzspeicher genutzten Batterien haben NaS-Batterien mit 316 MW weltweit installierter Kapazität den größten Anteil. Den Neubau dominiert hingegen die Lithium-Ionen-Technologie: 80 % der im Jahr 2014 angekündigten Batteriespeicherprojekte basieren auf LIB. (Navigant Research, 2015) Es wird jedoch erwartet, dass in Zukunft Flow-Batterien und LIB den Markt der stationären Batteriespeicher dominieren. Als junge Technologie versprechen sie die größten Weiterentwicklungen und die stärksten Preissenkungen.

Wie sich die Marktanteile unter den Technologien zukünftig aufteilen werden, ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Redox-Flow-Batterien erwartet (Fraunhofer ISI, 2012) um das Jahr 2020, im Jahre 2023 könnten Flow-Batterien einen Marktanteil von 19 % an kommerziellen Installationen haben (IRENA, 2015). Dennoch wird erwartet, dass LIB ihre bei Neuinstallationen schon heute marktbeherrschende Position verteidigen.

Zukünftige Entwicklungen sind jedoch sehr schwer abzuschätzen. Neben Redox-Flow-Batterien könnten auch neuartige Batteriekonzepte wie Metall-Luft-Batterien Marktreife erlangen. Diese Entwicklung ist noch sehr unsicher, könnte aber einen großen Einfluss entfalten.

Für die folgenden Betrachtungen soll angenommen werden, dass für zukünftige Batterieinstallationen nur LIB zum Einsatz kommen. Dass dies zutreffen wird, darf nicht erwartet werden; im Sinne einer Maximalabschätzung und im Hinblick auf die sehr schwer zu quantifizierende, aber wohl marktbeherrschende Position der LIB soll davon dennoch ausgegangen werden.

Mit steigendem Anteil erneuerbarer Energiequellen nimmt auch die Bedeutung von Energiespeichern zu. Dabei konkurriert der Ausbau an Energiespeichern mit dem Ausbau von Flexibilitätsoptionen; diese beinhalten insbesondere den Netzausbau, Demand-side-management, flexible Kraftwerke und (bei nationaler Sichtweise) den Import und Export. Schätzungen gehen davon aus, dass bis zu einem Anteil erneuerbarer Energien von 30-50 % der Ausbau von Energiespeichern wirtschaftlich nicht gerechtfertigt ist. (IEA, 2012) Auf Deutschland bezogene Studien sehen diese Notwendigkeit ab einem Anteil von rund 40 %. (Sternier & Stadler, 2014) Unabhängig vom Kurzzeit-Speicherbedarf zur Netzintegration

bieten sich Einsatzfelder in der dezentralen Energiespeicherung, beispielsweise in Verbindung mit Photovoltaikanlagen an. Hier werden sich Batteriespeicher „unabhängig vom Strommarkt entwickeln und langfristig in Deutschland sowie international etablieren“ (Stern & Stadler, 2014).

Deutschland

2014 wurde mit Unterstützung der Bundesregierung das größte kommerzielle Batteriekraftwerk Europas in Mecklenburg-Vorpommern eröffnet. Es soll in einer sehr windreichen Gegend positive und negative Regelleistung bereitstellen. Das Kraftwerk stellt über LIB eine Gesamtkapazität von 5 MWh und eine Leistung von 5 MW bereit. Zudem ist in Deutschland der Anteil dezentral installierter PV-Anlagen sehr hoch. Bei sinkender Einspeisevergütung und steigenden Strompreisen wird die private Energiespeicherung zur Erhöhung des Eigenverbrauchs wirtschaftlicher.

(Stern & Stadler, 2014) haben eine Reihe an Studien ausgewertet, die den Bedarf an Energiespeichern in Deutschland untersucht haben. Einstimmig werden Batteriespeicher als Kurzzeitspeicher angenommen (mit maximalen Ausspeicherdauern von 1 bis 4 Stunden). In diesem Bereich wird erwartet, dass Batterieparks sich bei weiteren Kostendegressionen durchsetzen. Insbesondere durch Bereitstellung von Primärregelleistung könnten Batterieparks wirtschaftlich betrieben werden.

Tabelle 2-43: Vergleich verschiedener Studien zum Einsatz stationärer Batteriespeicher in Deutschland

Studie	2025	2050	Anmerkungen
DIW-Studie »Stromspeicher als zentrales Element der Integration von Strom aus erneuerbaren Energien«	0	0	Stundenspeicher (Lithium-Ionen-Batteriespeicher mit einer Ausspeicherdauer von 2 h) können sich im System nicht behaupten, da viele Überschüsse länger als 2 h dauern und etwas höhere annuitätische Investitionskosten als bei Pumpspeichern (8 h) angenommen wurden (sowohl im Szenario mit flexiblem, als auch mit unflexiblen Energiesystem).
Fraunhofer IWES „Geschäftsmodell Energiewende“		10 GW / 80 GWh	
SRU-Sondergutachten „Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung“			Batteriespeicher wurden in der SRU-Studie nicht berücksichtigt, da ihr »Gesamtpotential zur langfristigen Energiespeicherung mit den benötigten großen Speicherkapazitäten« gegenüber den anderen Speichern als »eher gering eingeschätzt« wurde.
Fraunhofer ISE „Energiesystem Deutschland 2050“			
„Klimaschutzszenario“ (85 % CO ₂ -Reduktion)		78 GWh	
RetrofitMax		68 GWh	
Medium		55 GWh	
REMax		52 GWh	

(Sternier & Stadler, 2014) gehen davon aus, dass sich die meisten in Deutschland durch den Einsatz erneuerbarer Energien entstehender Überschüsse durch den Ausbau von Flexibilitätsoptionen nutzen lassen, so dass erst ab einem Anteil von 40-60 % erneuerbarer Energien zusätzliche Kurzzeitspeicher in signifikanten Mengen benötigt werden; sollten die Im- und Exporte gesteigert werden, sogar noch später. Diese Einschätzung scheint mit den meisten Studien darin übereinzustimmen, dass im Jahr 2025 noch keine relevanten Batteriespeicher aufgebaut werden (siehe z. B. (Wuppertal Institut, 2014)).

Diese Einschätzung soll hier übernommen werden. Für das Jahr 2050 werden Gesamtbatteriekapazitäten von 52 GWh beziehungsweise 80 GWh für das Business-As-Usual- und Green-Szenario angenommen. Hier sei darauf hingewiesen, dass (Wuppertal Institut, 2014) die angenommenen 52 GWh schon als den „aus heutiger Sicht maximal denkbaren Speicherbedarf“ ansieht, da er auf einem Szenario beruht, in dem der gesamte Strom- und Wärmebedarf Deutschlands aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden soll, ohne Stromaustausch mit dem Ausland. Da Fraunhofer IWES unter ähnlichen Annahmen zu einem Speicherbedarf an Kurzzeitspeichern, abgebildet über Batterien, von 80 GWh kommt, spiegelt die Differenz die bestehenden Unsicherheiten wider.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass durchaus erwartet werden kann, dass schon mittelfristig dezentrale stationäre Stromspeicher eine Rolle spielen werden (etwa zur Speicherung und Eigenverbrauch von privat erzeugtem Solarstrom). Diese Kapazitäten spiegeln sich (in den Netz-fokussierten) oben vorgestellten Studien nicht wider. In Ermangelung quantifizierbarer Informationen sollen sie nicht betrachtet werden.

Der Zubau soll zwischen 2030 und 2050 als linear erfolgend abgeschätzt werden.

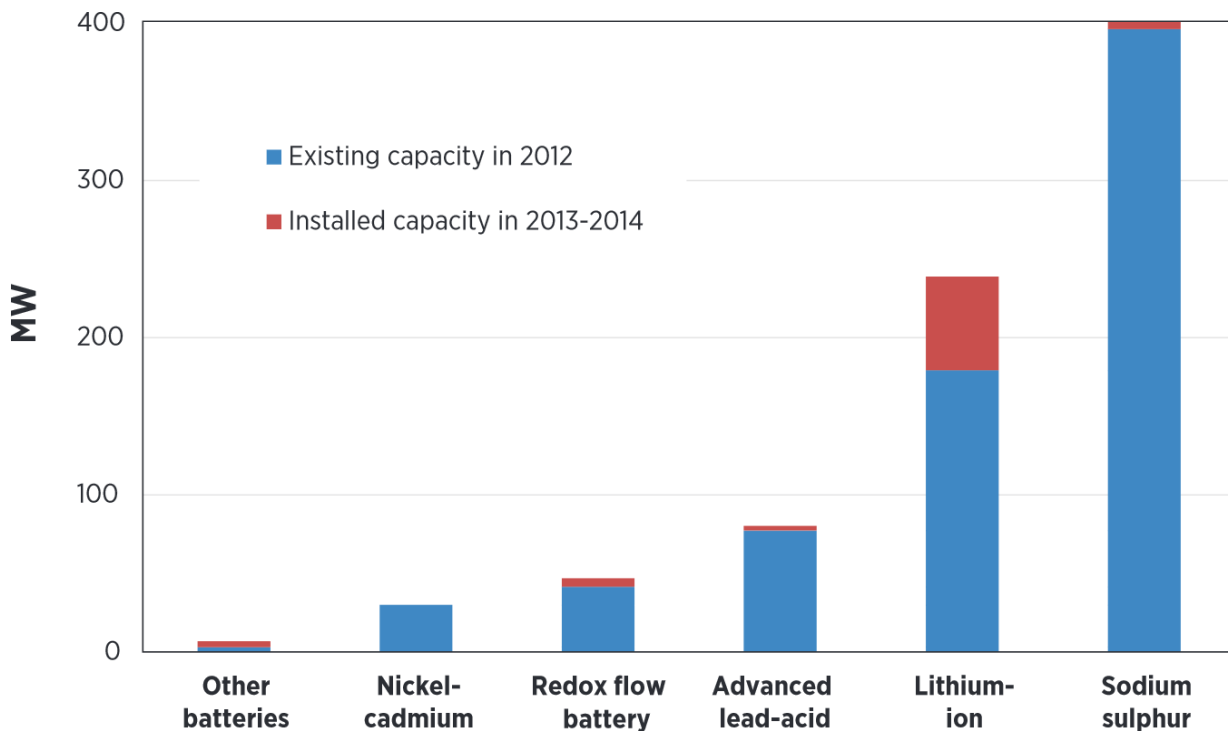
Tabelle 2-44: Deutschlandweit installierte Kapazität an stationären LIB (in MWh pro Jahr)

	2014	2025	2050
BAU	0	0	2.600
GREEN	0	0	4.000

Global

Auch weltweit gewinnen LIB an Bedeutung. Zwar ist ihre installierte Kapazität immer noch deutlich geringer als die von Natrium-Schwefel-Batterien, der Großteil der 2014 neu installierten Kapazität an Batteriespeichern entfiel jedoch auf LIB.

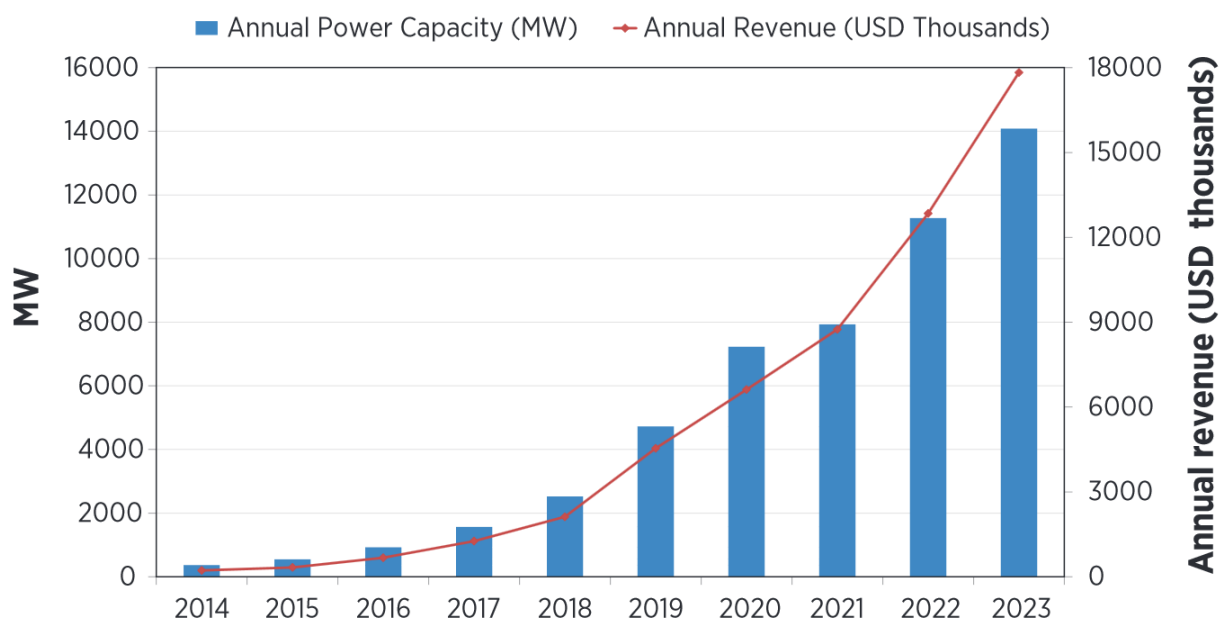
Abbildung 2-15: 2014 installierte Batteriekapazitäten am Netz



Quelle: (IRENA, 2015)

(IRENA, 2015) stellt fest, dass Energiespeicher auch mittelfristig in den meisten Fällen nicht notwendig sein werden, um den Anteil erneuerbarer gegenüber fossiler Energien am Strommix zu steigern. In besonderen Fällen, etwa auf Inseln oder in netzfernen Gegenden, können Batteriesysteme jedoch helfen, Dieselgeneratoren zu ersetzen. Da die Stromerzeugung mittels Dieselgeneratoren häufig vergleichsweise teuer ist, könnten Batteriespeicher in Kombination mit (dezentralen) erneuerbaren Energien schnell wirtschaftlich werden. Das Potential dezentraler Energiespeicher auf kleinen Inseln wird auf 5,3 GWh geschätzt (IRENA, 2015). Das Potential in netzfernen Regionen ist weltweit nicht abgeschätzt worden; Indien beispielsweise schätzt sein Energiespeicherpotential für erneuerbare Energien auf 6 GW, wovon über 2 GW in netzfernen Regionen liegen.

Abbildung 2-16: Prognose installierter Batteriespeicher am Netz weltweit (IRENA, 2015)



Quelle: (IRENA, 2015)

Verschiedene Studien haben die mittelfristig installierte Batteriekapazität abgeschätzt. Am optimistischsten ist die Prognose von Navigant Research: Sie erwartet eine installierte Kapazität von 51,2 GWh im Netz (2023) und weitere 38,5 GWh auf der Ebene einzelner Haushalte (2024). Das angenommene Wachstum fortgeführt bis 2025, bedeutet dies eine Gesamtkapazität von 211,3 GWh. Im Vergleich dazu erwartet eine Studie der Citigroup 2030 eine installierte Kapazität von 240 GW (entsprechend 877,7 GWh, wenn die von Navigant angenommene Auslastung übernommen wird); dies entspräche (die Zahlen von Navigant ab 2025 als Ausgangspunkt nehmend) einem starken Wachstum von 32,9 % zwischen 2025 und 2030.

Tabelle 2-45: Vergleich verschiedener Prognosen zum Ausbau stationärer Batteriespeicher weltweit [selbst berechnete Größen]

	2023	2025	2030	CAGR
Navigant (utility scale)	14 GW / 51,2 GWh	[149,7 GWh]		71 %
Navigant (residential)	38,5 GWh (2024)	[61,6 GWh]		[60 %]
Citigroup			240 GW [877,7 GWh]	
IRENA		[165,4 GWh]	150 GW [549 GWh]	27,1 % (5 % VRE)

Im Gegensatz dazu erwartet IRENA im Jahr 2030 eine installierte stationäre Batteriespeicherkapazität von 150 GW. Diese ergibt sich aus der Annahme, dass etwa 5 % der Kapazität schwankender erneuerbarer Energiequellen als kurzfristig nutzbare Batteriespeicher vorgehalten werden müssen (als zusätzliche Speicher werden 160 Mio. Elektroautos und 325 GW Kapazität an Pumpspeicherkraftwerken prognostiziert). Es lässt sich jedoch argumentieren, dass Batteriespeicher in netzfernen Regionen eine

höhere Bedeutung haben. Dies erklärt auch, weshalb Batteriespeichern weltweit schon 2025 eine verhältnismäßig hohe Bedeutung zugesprochen wird, während in Deutschland Installationen erst mit einem sehr hohen Anteil regenerativer Energien als nötig angesehen werden. Daher soll mit IRENAs Ansatz und den für die Photovoltaik und die Windkraft in den entsprechenden Kapiteln hergeleiteten Zahlen (basierend auf Prognosen der IEA) die Batteriespeicherkapazität bestimmt werden (die Berechnung der energetischen Kapazität aus der leistungsbezogenen erfolgt mit Annahmen aus (Sternier & Stadler, 2014)).

Tabelle 2-46: Weltweit installierte Kapazität an stationären LIB (in MWh pro Jahr)

	2014	2025	2050
BAU	1.316	54.399	114.368
GREEN	1.316	76.793	160.877

2.1.7.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Auf Basis der definierten spezifischen Einheit sowie der eingeschätzten Marktentwicklung resultiert daraus folgender Materialbedarf für Deutschland in den Szenarien Business-As-Usual und Green Economy.

Tabelle 2-47: Nationale Materialbedarfe für stationäre Lithium-Ionen-Stromspeicher (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	0	0	4.576	0	0	7.040
Lithium	0	0	312	0	0	480
Mangan	0	0	4.342	0	0	6.680
Phosphor	0	0	79	0	0	122

Der weltweite Materialbedarf stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 2-48: Globale Materialbedarfe für stationäre Lithium-Ionen-Stromspeicher (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	2.317	95.743	201.288	2.317	135.156	283.144
Lithium	158	6.528	13.724	158	9.215	19.305
Mangan	2.199	90.847	190.995	2.199	128.244	268.665
Phosphor	40	1.659	3.488	40	2.342	4.907

2.1.7.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Auch was den Einsatz von LIB für Stromspeicher angeht ist die technologische Weiterentwicklung im Auge zu behalten, um frühzeitig zu identifizieren, welche Zellchemie zukünftig Bedeutung erlangt. Die Marktentwicklung sollte ebenfalls beobachtet werden. Vor allem der Umfang des Einsatzes in netzfernen Regionen ist noch schwer einschätzbar.

2.1.7.7 Quellen

- Argonne National Laboratory 2009 Lithium-Ion Batteries: Possible Material Issues
- Birke 2015 Persönliches Gespräch mit Peter Birke am 18.05.2015
- IEA 2012 International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris.
- iHS 2014 The future of the grid-connected energy storage market
- IRENA 2015 Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook
- KEMA 2012 Market Evaluation for Energy Storage in the United States
- Sterner & Stadler 2014 Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration. Springer
- Wietschel et al. 2015 Wietschel, Martin; Ullrich, Sandra; Markewitz, Peter; Schulte, Friedrich; Genoese, Fabio, Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden
- Wuppertal Institut 2014 Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.8 UT Nr. 105: „Speicherkraftwerke“

2.1.8.1 Technologiebeschreibung

Mechanische Speicher sind die weltweit dominierenden Energiespeicher. Laut BMUB 2014 machten sie im Jahr 2013 72 % des Weltmarktes der Energiespeicher aus. Die dominierenden Formen sind dabei Pumpspeicherkraftwerke (PSK) und Druckluftspeicher (Compressed Air Energy Storage, CAES). Das Electric Power Research Institute berechnet einen Anteil der PSK an weltweit installierter Speicherkapazität von 99 %.

Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke speichern Energie in Form potentieller Energie. In Zeiten geringer Nachfrage wird Wasser in ein höhergelegenes Reservoir gepumpt. Wie in einem konventionellen Wasserkraftwerk kann es dann dazu genutzt werden, eine Turbine anzutreiben und so Strom zu erzeugen. Während in früheren Projekten das Wasser in einem unteren Reservoir gesammelt wurde, nutzen neu geplante Projekte einen Fluss als Senke. (Steffen, 2011) Dies erlaubt die Konstruktion auch in engeren Tälern. Der Zykluswirkungsgrad beträgt 70-85 % (Verluste entstehen bei der Energiekonversion und in geringem Maße durch Verdunsten des Wassers). PSK können zudem für Kapazitäten von einigen 100 MWh bis hin zu 100 GWh ausgelegt werden und sind schwarzstartfähig. Daher wird Pumpspeicherkraftwerken mit steigendem Anteil erneuerbarer Energiequellen eine große Bedeutung zugerechnet.

PSK sind stark von geeigneten Standorten abhängig. Es wird erwartet, dass dies den möglichen Ausbau dieser Technologie beschränkt. Zudem ist der Bau der Anlagen auf Grund des Flächenbedarfs mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden.

Zukünftig ist nicht damit zu rechnen, dass die Wirkungsgrade nennenswert angehoben werden können. Entwicklungsanstrengungen konzentrieren sich auf den Einsatz in einem variablen Geschwindigkeitsbereich, um eine bessere Netzstabilisierung auch innerhalb kurzer Zeiträume zu gewährleisten. Neue Standorte könnten eröffnet werden durch die Nutzung von Salzwasser in Küstenregionen oder unterirdische Reservoirs.

Druckluftspeicher

Druckluftspeicher speichern Energie in Form komprimierter Luft. Zur Energiespeicherung wird Luft in Reservoirs komprimiert. Zur Stromerzeugung kann die Luft über eine Turbine entspannt werden. Als Reservoirs kommen dabei geologische Formationen wie zum Beispiel Salzstöcke in Betracht. Aber

auch Drucklufttanks können eingesetzt werden, wobei dies die Kosten großer Anlagen stark in die Höhe treibt. Man unterscheidet diabate Druckluftspeicher und adiabate Druckluftspeicher.

Diabate Druckluftspeicher (D-CAES): Bei der Kompression erhitzt sich die Luft. In diabaten CAES wird diese Wärme an die Umgebung abgegeben, wenn die Luft eingelagert wird. Bevor die Luft entspannt werden kann, muss sie wieder erwärmt werden. Dies geschieht meist durch eine Erdgasfeuerung. Dies senkt den Gesamtwirkungsgrad. Die einzigen großtechnischen CAES in Betrieb sind diabate Druckluftspeicher. Eine 1978 in Huntorf errichtete Anlage mit einem Wirkungsgrad von 42 % und einer Leistung von 321 MW sowie eine 1991 in den USA in Betrieb genommene Anlage mit einem Wirkungsgrad von 54 %. Wirkungsgrade von 60 % könnten durch Prozessverbesserungen erreicht werden.

Adiabate Druckluftspeicher (A-CAES): Druckluftspeicher dieses Typs speichern die Kompressionswärme in einem separaten Wärmespeicher, üblicherweise auf einem Temperaturniveau von rund 600 °C. Bevor die Luft entspannt wird, wird sie mit der so gespeicherten Wärme vorgeheizt. So kann auf eine zusätzliche Erdgasfeuerung verzichtet und der Wirkungsgrad deutlich gesteigert werden. A-CAES sind technisch realisierbar, jedoch noch nicht kommerziell umgesetzt, da die Wirtschaftlichkeit derzeit nicht gegeben ist.

In einer Variante, dem ungekühlten Druckluftspeicher (UA-CAES) wird die komprimierte Luft zugleich als Speichermedium der Wärme verwendet. So kann auf einen separaten Wärmespeicher verzichtet werden. Dafür werden hohe Anforderungen an die Materialien des Speicherbehälters gestellt, der sowohl hohen Drücken als auch hohen Temperaturen ausgesetzt ist. Dies ist besonders kritisch, da die geringe volumetrische Energiedichte komprimierter Luft große Speichervolumina (und damit einen hohen Materialeinsatz) bedingt. UA-CAES sind noch weit vom kommerziellen Einsatz entfernt. Insbesondere Materialfragen sind ungelöst. Ein Einsatz bis 2025 ist daher unwahrscheinlich und auch die längerfristige Perspektive erscheint ungewiss.

Tabelle 2-49: Technische Kennzahlen verschiedener Druckluftspeicher-Technologien im Vergleich

	D-CAES			A-CAES			I-CAES		
	Heute	2025	2050	Heute	2025	2050	Heute	2025	2050
Zyklus-Wirkungsgrad (%)	42-54	60	60	-	70	70	55	65	65
Volumetrische Energiedichte (Wh/l)	2 bis 15			2 bis 10			bis 3		
Technische Lebensdauer (a)	30			30			20		
Anfahrzeit (min)	~ 15			< 15			< 1		
Größenklasse (MW)	10 ³	10 ³	10 ³	-	10 ²	10 ³	10 ⁰	10 ¹	10 ²

Quelle: UKERC und Fraunhofer ISE

2.1.8.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird ausspeicherbare Leistung verwendet [MW].

2.1.8.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Die Europäische Kommission (European Commission Joint Research Centre, 2013) hat die Materialzusammensetzung eines Pump- und eines Druckluftspeicherkraftwerkes untersucht:

Tabelle 2-50: Spezifische Materialbedarfe von Speicherkraftwerken (in g/MW)

	PSK ³	CAES ⁴
Material	g/MW	g/MW
Nickel	60000	
Chrom	20000	
Kupfer	60000	500000

Quelle: (European Commission Joint Research Centre, 2013)

PSK haben Materialbedarfe, die in etwa denen von Wasserkraftwerken gleicher Leistung entsprechen. Die Technologie ist im Wesentlichen ausgereift. Denkbar ist in Zukunft der Einsatz neuer Generatoren, was insbesondere auf den Kupferbedarf Einfluss hätte. Diese Entwicklung lässt sich jedoch nicht abschätzen, und soll daher hier nicht berücksichtigt werden. Für weitere Betrachtungen der Generatorentwicklung sei hier auch auf die Kapitel verwiesen, die sich mit der Entwicklung der Generatoren in Windkraftanlagen befassen. Die hier angegebenen Materialbedarf für CAES beziehen sich auf diabate Druckluftspeicher. Nach der Erdgasfeuerung betragen die Turbineneintrittstemperaturen rund 700 °C. Dies liegt unter dem Niveau, auf dem Gasturbinen in vielen anderen Anwendungen gefahren werden, was sich in niedrigeren Materialanforderungen niederschlägt.

In adiabaten Anlagen ist die thermische Belastung der Turbine noch geringer. Kritisch sind jedoch die bei der Kompression auftretenden hohen Temperaturen und Drücke. Diese werden den Einsatz potenziell kritischer Stahllegierungselemente bedingen. Als Speichermaterialien kommen verschiedene Flüssig- (z. B. Öle, Flüssigsalze) oder Festspeicher (z. B. Naturstein, Beton) oder Phasenwechselmaterialien (z. B. Paraffine) in Frage. Die Entwicklung ungekühlter adiabater Druckluftspeicher und die in Zukunft eingesetzten Legierungen sind jedoch noch nicht abzusehen. Daher können für die Materialbedarfe hier keine Annahmen getroffen werden. (Wuppertal Institut, 2014)

2.1.8.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Generell bilden Speicher einen wichtigen Bestandteil in einem Energiesystem, das sich zu einem großen Teil aus regenerativen Energiequellen speist, da sie eine Reihe an Systemdienstleistungen übernehmen können. Verschiedene Studien kommen jedoch zum Ergebnis, dass bis zu einem Anteil von ca. 50 % erneuerbarer Energien der Netzausbau die wirtschaftlichere Option darstellt.

Im Vergleich verschiedener Speichertechnologien stellen sich CEAS und PSK insbesondere für große Speicherkapazitäten wirtschaftlicher dar als andere Optionen.

Deutschland

In Deutschland sind etwa 30 Pumpspeicherkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 7.000 MW in Betrieb. Die Abschätzung des Potentials an CAES ist problematisch. Bisherige Abschätzungen beruhen auf geologischen Karten, in denen Salzformationen mit lateralen Ausmaßen und Tiefenlagen verzeichnet sind. Die aus diesen Informationen abgeleiteten Potentiale sind jedoch mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Vorteilhaft ist, dass sich die meisten dieser Salzformationen im Norden Deutschlands finden, also in Nähe zu existierenden oder potenziellen Windparks. Das Umweltbundesamt schätzt in der Studie „Energieziel 2050“ 400 Salzkavernen mit einem nutzbaren Arbeitsgasvolumen von 22 Mrd. m³ als geeignet ein.

³ Untersuchtes Kraftwerk: Standort Löntsch, Höhendifferenz 370 m; 60 MW Leistung bei jährliche abgegebener Energie von durchschnittlich 120 GWh

⁴ Untersuchtes Kraftwerk: 2 MW Leistung, 20 MWh Kapazität

Bis 2020 sieht das BMUB (Sternier & Stadler, 2015) keinen neuen Speicherbedarf zur Integration der erwarteten 40 % EE am Strommix. Wenn deren Anteil bis 2030 auf 63 % steigt, können die heute geplanten Neubauprojekte an Pumpspeicherkraftwerken diesen Bedarf decken.

Tabelle 2-51: Übersicht - Studien zum Potential von Pumpspeicherkraftwerken (Sternier & Stadler, 2015)

	2020 (Anteil Erneuerbarer Energien: 40 %)	2030 (Anteil Erneuerbarer Energien: 63 %)	2050	Annahmen
UBA: 100 % EE			8,6 GW / 55 GWh / 6 TWh (gesamt)	Batterien und CAES vernachlässigt
SRU:				PSK wird nicht weiter ausgebaut; 6 GW von 7 GW installierter PSK-Leistung für Netzdienstleistungen vorgehalten; kein Zubaus an Batteriespeichern; CAES wird günstig.
Nationale Autarkie			0,5 GW / 1,0 TWh	
Selbstversorgung mit 15 % Austausch nach DK und NO			1,2 GW / 0,8 TWh	
Max. 15 % Nettoimport aus DK & NO			0,5 GW / 0,9 TWh	
Max 15 % Nettoimport aus EU & Nordafrika			0,8 GW / 1,2 TWh	
BMU: Langfristszenarien	8,7 GW	12,2 GW	12,2 GW	
BMW (BMW, 2014)	2022		2032-2035	
Referenzszenario	+1GW		+4,75 GW	
Weniger Hydraulik	+0 GW		+1 GW	

Ein Vergleich erstellter Szenarien scheint zumindest die Entwicklung von PSK in Deutschland bis zum Jahr 2050 mit einiger Sicherheit abschätzen zu können. Als untere Grenze des Ausbaus darf das Szenario „Weniger Hydraulik“ aus (BMW, 2014) gelten. Es werden Bauverzögerungen einiger der geplanten Pumpspeicherkraftwerke angenommen, sowohl mittel-, wie auch langfristig. Solch eine Entwicklung ist jedoch nicht zu erwarten. Stattdessen stimmen die meisten Studien darin überein, dass die Kapazität an PSK mittelfristig auf rund 12 MW ausgebaut wird. Auf diesem Niveau werden die Installationen stagnieren. Diese Einschätzung entspricht damit dem BAU-Szenario; da ein darüber hinausgehender Ausbau in keiner der betrachteten Studien als möglich angesehen wird, soll hier kein zusätzliches Green-Economy-Szenario aufgemacht werden. Für die jährlichen Installationen wird angenommen, dass der Ausbaupfad der Langfristszenarien des UBA beschränkt wird, und der Ausbau von 2020 bis 2030 linear erfolgt. Darüber hinaus wird erwartet, dass bis zum Jahr 2050 Turbinen und Pumpen heutiger bestehender Pumpspeicherkraftwerke ersetzt werden müssen. Die technische Lebensdauer dieser Komponenten beträgt 30-60 Jahre. (Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2014)

Tabelle 2-52: Jährliche Installationen von Pumpspeicherkraftwerken in Deutschland (in MW)

	2014	2025	2050
BAU/GREEN	0	350	320

Die Zukunft der Druckluftspeicher stellt sich unsicher dar.

Tabelle 2-53: Übersicht - Studien zum Potential von Druckluftspeichern (Sterner & Stadler, 2015)

	2020 (Anteil Erneuerbarer Energien: 40 %)	2030 (Anteil Erneuerbarer Energien: 63 %)	2050	Annahmen
SRU:				PSK wird nicht weiter ausgebaut; 6 GW von 7 GW installierter PSK-Leistung für Netzdienstleistungen vorgehalten; kein Zubaus an Batteriespeichern; CAES wird günstig.
Nationale Autarkie			34 TWh / 32 GW	
Selbstversorgung mit 15 % Austausch nach DK und NO			4,3 TWh / 18 GW	
Max. 15 % Nettoimport aus DK & NO			5,2 TWh / 19 GW	
Max 15 % Nettoimport aus EU & Nordafrika			12 TWh / 21 GW	
BMU: Langfristszenarien	0,32 GW	0,32 GW	0,32 GW	

Das BMU sieht ein sehr geringes Potential von 0,32 GW, das bis 2020 erschlossen und dann nicht weiter ausgebaut wird. Die meisten anderen untersuchten Szenarien benennen ebenfalls keinen Ausbau von CAES-Anlagen. Dieser Einschätzung soll hier gefolgt werden, sowohl für das BAU-, als auch das Green-Economy-Szenario.

Einzig SRU dagegen prognostiziert einen sehr viel höheren Ausbau, was vor allem an den angenommenen Entwicklungen liegt: Es wird zum einen erwartet, dass PSK in Deutschland nicht weiter ausgebaut werden, und von den 7 GW installierter Leistung 6 GW für Netzdienstleistungen vorgehalten werden. Zudem wird angenommen, dass Batteriespeicher nicht weiter ausgebaut werden, und die Kosten für CAES-Kraftwerke deutlich sinken. Die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens aller dieser Annahmen kann als sehr gering gelten. Im Folgenden soll dennoch auch dieser Ausbaupfad betrachtet werden, um den Maximalbedarf zu illustrieren. Dabei ist deutlich zu machen, dass sich diese Betrachtung nicht in ein konsistentes Bild mit dem Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke fügt. Die sich in dieser Betrachtung ergebenden Zubauten finden erst nach 2025 statt – im Stützjahr 2050 würden 840 MW Leistung neu installiert.

Global

Weltweit beträgt die insgesamt installierte Leistung an PSK rund 146 GW (REN21, 2015), was 99 % der Gesamtspeicherkapazität entspricht. Davon wurden 2,4 GW im Jahr 2014 installiert.

Auch global machen sich die gesunkenen Differenzen im Tages- und Nachtstrompreis bemerkbar. Dennoch sind PSK (die entsprechenden Standorte vorausgesetzt) immer noch eine der wirtschaftlichsten Speichertechnologien: (REN21, 2013) nennt Preise von 3-9 US-Cent/kWh. Die von der IEA berech-

neten Kosten bewegen sich ebenfalls zwischen 3 und 12 US-Cent/kWh (abhängig von Auslastung der Anlage und angenommenem Abzinsungssatz). (IEA, 2012)

Die IEA hat in zwei Szenarien den Aufbau an PSK-Kapazität weltweit untersucht. (IEA, 2012) Erwartet wird eine Kapazität zwischen 412 GW und 700 GW im Jahr 2050. In dieses Bild scheint sich eine Untersuchung von IRENA einzufügen, die Pläne zum Aufbau von PSK in 26 Ländern untersucht hat, und eine Gesamtkapazität von 325 GW im Jahr 2030 prognostiziert. Auf Grund der langen Planungszeiträume soll angenommen werden, dass keine weiteren Projekte realisiert werden können. Wird ein linearer Zubau angenommen, entspricht dies einer im Jahr 2025 installierten Kapazität von 269 GW, bei einem Zubau von 11,2 GW im Green-Economy-Szenario.

Für das BAU-Szenario lassen sich keine originären Zahlen finden, daher wird der Zubau des Green-Economy-Szenarios skaliert. In diesem erfolgen rund 22 % des Gesamtzubaus bis 2050 im Zeitraum bis 2025. Auf das Basis-Szenario übertragen entspricht dies einer 2025 installierten Kapazität von 202 GW, bei einem Zubau von 5,1 GW pro Jahr.

In beiden Szenarien wird angenommen, dass der Zubau zwischen 2025 und 2050 linear erfolgt und die Turbinen und Pumpen 2014 errichteter Anlagen ersetzt werden.

Tabelle 2-54: Jährliche Installationen von Pumpspeicherkraftwerken weltweit in MW/a

	2014	2025	2050
BAU	2.400	5.100	10.800
GREEN	2.400	11.200	19.640

Die Entwicklung der Druckluftspeicher weltweit stellt sich ähnlich unsicher dar, wie in der nationalen Betrachtung. Der Einsatz wird stark abhängen sowohl von geographischen Gegebenheiten als auch von technischen Weiterentwicklungen.

Eine Marktstudie erwartet einen Anstieg von momentan 400 MW (in zwei kommerziellen Anlagen) im Jahr 2013 auf 11,2 GW installierte Kapazität im Jahr 2023, entsprechend einem jährlichen Wachstum von 39,5 %, einem immer noch sehr geringem Anteil im Vergleich zu Pumpspeicherkraftwerken. (Navigant Research, 2013) Um jedoch eine wirtschaftliche Alternative zu Pumpspeicherkraftwerken oder anderen Speichertechnologien darstellen zu können, müsste die Technologie weiter entwickelt werden – definitive Bewegungen in diese Richtung zeichnen sich jedoch noch nicht ab. Andere quantifizierbare Markteinschätzungen ließen sich jedoch nicht finden, in den meisten Studien scheint die Bedeutung von CAES-Anlagen deutlich hinter der von Pumpspeicherkraftwerken zu liegen; zudem kann erwartet werden, dass ein Zubau von CAES-Anlagen substitutiv zu PSK-Anlagen erfolgen würde, da sie sehr ähnliche Anwendungsbereiche haben. Um innerhalb einer konsistenten Betrachtung zu bleiben soll daher angenommen werden, dass CAES in Zukunft keine beachtenswerte Verwendung finden.

Um die Dimensionen zu veranschaulichen, in denen mögliche Materialbedarfe liegen könnten (die entsprechenden Entwicklungen vorausgesetzt), soll hier eine Maximalabschätzung vorgenommen werden. Dazu wird das Wachstum der installierten Leistung der Marktstudie bis 2025 fortgesetzt. Der Zubau liegt dann rund 25 % unter dem erwarteten Zubau an PSK im GREEN-Szenario 2025 – da sich keine originären Prognosen der Entwicklung darüber hinaus finden, soll angenommen werden, dass alle für das Jahr 2050 erwarteten Installationen der PSK stattdessen von Druckluftspeichern bedient werden, das entspricht Neu- und Ersatzbauten in Höhe von 19,6 GW/a.

2.1.8.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Bezüglich Pumpspeicherkraftwerken ergeben sich zukünftig folgende Materialbedarfe in Deutschland:

Tabelle 2-55: Materialbedarf für Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland (in t/a)

	BAU/GREEN		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Chrom	0	7,0	6,4
Kupfer	0	21,0	19,2
Nickel	0	21,0	19,2

Der Materialbedarf, der sich aus der Maximalabschätzung der CAES-Anlagen in Deutschland ergeben würde, betrüge im Stützjahr 2050 420 t Kupfer pro Jahr.

Global entwickeln sich die Materialbedarfe für Pumpspeicherkraftwerke wie folgt:

Tabelle 2-56: Absolute Materialbedarfe für Pumpspeicherkraftwerke global (in t/a)

	BAU			GREEN		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Chrom	48	102	216	48	224	393
Kupfer	144	306	648	144	672	1.178
Nickel	144	306	648	144	672	1.178

Aus der Maximalabschätzung der global zu errichtenden CAES-Anlagen ergäben sich Kupferbedarfe von 4.300 t/a im Jahr 2025 und 9.820 t/a im Jahr 2050.

2.1.8.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Pumpspeicherkraftwerke sind technologisch ausgereift. Für UA-CAES sind die Materialbedarfe unsicher.

2.1.8.7 Quellen

- BMUB, 2014 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelt-technologie-Atlas für Deutschland, Berlin
- European Commission Joint Research Centre, 2013 Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Luxemburg.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2014 Gutachten zur Rentabilität von Pumpspeicherkraftwerken
- Genoese, 2015 Genoese, F. (2015). Druckluftspeicher. In F. Genoese, Energietechnologien der Zukunft: Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze (S. 215). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- IEA, 2012 International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris.
- Navigant Research, 2013 Compressed Air Energy Storage
- REN21, 2015 Renewables 2015, Global Status Report. Paris
- Steffen 2011 Prospects for pumped-hydro storage in Germany
- Sterner & Stadler, 2015 Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration. Springer.
- Wuppertal Institut, 2014 Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.9 UT Nr. 106: Permanentmagnet-Generator

2.1.9.1 Technologiebeschreibung

Generatoren wandeln in Windkraftanlagen (WKA) die Bewegungsenergie der Rotoren in elektrische Energie um.

Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Bauformen, die jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben. So sind beispielsweise Offshore-WKA tendenziell größer dimensioniert als Onshore-WKA, so dass der Wirkungsgrad des verwendeten Generators einen, absolut gesehen, höheren Einfluss hat. Zudem wird ein wartungsarmer Betrieb noch bedeutsamer.

Alle im Folgenden vorgestellten Generatoren kommen auch in anderen Anwendungen zum Einsatz oder können als Motoren ausgelegt werden. Hier soll jedoch nur der Einsatz in WKA Betrachtung finden. Andere Anwendungen (etwa in Wasserkraftwerken, fossilen Kraftwerken, dezentralen Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung,...) sollen ausgeklammert werden, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten; für Elektromotoren in der Elektromobilität sei auf die Umwelttechnologie Nr. 38 verwiesen.

Ein Synchron-Generator besteht aus einem Stator und einem Läufer. Im Falle eines permanenterregten Synchron-Generators ist der Läufer ein Permanentmagnet. Dieser kann sich im Stator drehen, einem Käfig, der mit drei Kupferwicklungen besetzt ist. Wird der Läufer von einer externen Kraft (im Falle einer WKA von den Rotoren) angetrieben, induziert das sich bewegende Magnetfeld des Läufers einen Wechselstrom in die Spulen des Stators – mechanische Energie wird in elektrische umgewandelt. Auf Grund dieses Arbeitsprinzips laufen der Läufer und der im Stator induzierte Strom mit der gleichen Frequenz, also synchron.

Permanenterregte Synchron-Generatoren können sowohl mit, als auch ohne Getriebe ausgeführt werden. Im ersten Fall dreht sich der Generator sehr schnell mit 500 bis 1800 Umdrehungen pro Minute und ist vergleichsweise klein. In getriebelosen Anlagen werden Ringgeneratoren verwendet, die sich mit 6-40 U/min drehen. Vorteilhaft ist der kompakte Aufbau mit weniger bewegten Komponenten, was tendenziell Verluste verringert und Wartungsbedarf reduziert. Zudem kann das Getriebe 10 bis 25 % der Kosten einer WKA ausmachen. Da der Ringgenerator jedoch sehr groß ist, erhöht sich das Gesamtgewicht und die Größe der Gondel.

Da die vom Synchron-Generator abgegebene Leistung vom Antrieb abhängt und somit nicht konstant ist, muss sie von einem Umrichter in Spannung und Frequenz an die Anforderungen des Netzes angepasst werden. Der Rotor der Anlage kann daher mit einer variablen Frequenz drehen und so bei jeder Windgeschwindigkeit die optimale aerodynamische Leistung aufnehmen.

Permanentmagnet-Generatoren besitzen einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad, da der Läufer keine Kupferwindungen aufweist, die Verluste erzeugen.

2.1.9.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die Leistung [kW] verwendet.

2.1.9.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Für Permanentmagnete wird eine Reihe an Seltenen Erden benötigt. Es wird erwartet, dass die Materialeffizienz in Zukunft zunimmt. Zudem wird Kupfer im Stator verbaut. Die spezifischen Materialbedarfe werden übernommen aus (Wuppertal Institut, 2014). Dabei wird unterschieden zwischen getriebelosen (direct drive: PMG-DD), moderat schnell laufenden (middle speed, PGM-MD) und schnell laufenden (high speed, PGM-HS) Generatoren.

Tabelle 2-57: Spezifische Materialbedarfe für Permanentmagnet-Generatoren (in g/kW)

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
PGM-DD			
Dysprosium	15	11,7	11,7
Kupfer	2100	2100	2100
Neodym	201,5	162,5	130
PMG-MS			
Dysprosium	3,7	2,9	2,9
Kupfer	2100	2100	2100
Neodym	49,6	40	32
PMG-HS			
Dysprosium	1,8	1,4	1,4
Kupfer	2100	2100	2100
Neodym	24,8	20	16

2.1.9.4 Nationale und globale Marktentwicklung

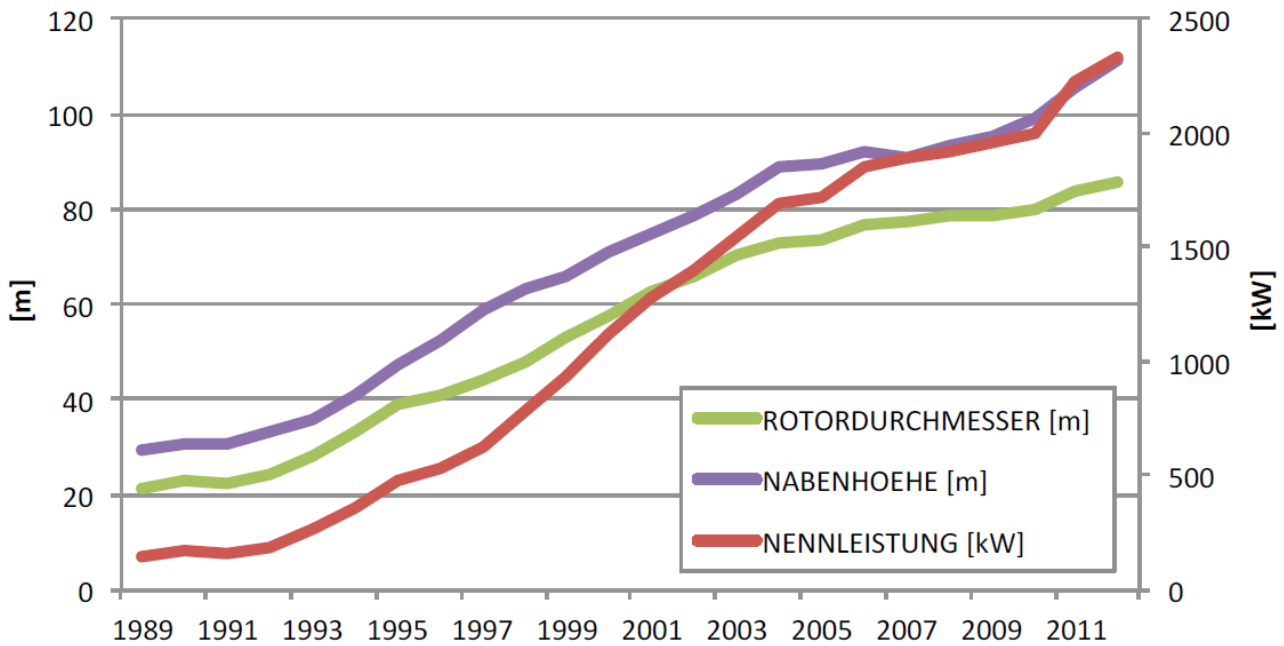
Die Marktentwicklung der Technologien (Permanentmagnet-, Asynchron-, Synchron-, Reluktanz- und HTS-Generatoren) wird mit Blick auf Anwendungen im Windenergiebereich gemeinsam dargestellt. Die Marktanteile der einzelnen Technologielinien werden in übergreifenden Szenarien abgeschätzt, so dass ein konsistentes Gesamtbild sichergestellt wird.

Deutschland

Windenergie stellt mit einer installierten Leistung von 39.259 MW (Fraunhofer IWES, 2014) einen bedeutenden Faktor für die Energieversorgung Deutschlands dar. Mit einer erzeugten Energie von 55.970 GWh hatte sie einen Anteil von 35 % am erneuerbaren Strommix (bezogen auf die installierte Leistung: 42 %). Davon machte die Offshore-Windenergie 1313 GWh aus. Zudem konnten WKA 2014 auch das stärkste Wachstum der EE vorweisen. 5193 MW Leistung wurden installiert, davon 4670 MW onshore: 47 % mehr als im bisher zubaustärksten Jahr 2002.

Noch im Jahr 2007 betrug der Marktanteil von Asynchrongeneratoren in Neubauten von WKA 50 %. Bis 2012 ist er jedoch drastisch gesunken, auf 19 %, zunächst zugunsten von elektrisch erregten, dann jedoch hauptsächlich permanenterregten Synchrongeneratoren. Ein Trend, der zu beobachten ist, ist die Errichtung größerer Anlagen. Dies wird zum einen dadurch getrieben, dass die erzeugte Leistung überproportional mit der Rotorfläche zunimmt. Zudem nimmt die Bedeutung des sogenannten Repowering zu. Alte Anlagen werden teilweise abgebaut und durch neue ersetzt, häufig verbunden mit einer Steigerung der Nennleistung. Durch verbesserte konstruktive Auslegung ergibt sich aus einer verdoppelten Nennleistung grob geschätzt ein dreifacher Stromertrag. Ein Treiber hin zu größeren Anlagen sind unter anderem die begrenzten Standorte.

Abbildung 2-17: Größenentwicklung von WKA in Deutschland onshore



Quelle: (Wuppertal Institut, 2014)

In Anlagen höherer Leistung wirken hohe Belastungen im Getriebe. Dies lässt den Einsatz getriebeloser Gondeln sinnvoll erscheinen, die jedoch durch ihr vergleichsweise hohes Gewicht in der Größe beschränkt sind (insbesondere für Offshore-Anlagen).

Der Neubau an Anlagen soll aus (Wuppertal Institut, 2014) übernommen werden. Dabei wird jedoch der niedrige Ausbaupfad verworfen. Dieser erwartet eine Stagnation der installierten Onshore-Anlagen bei rund 30 GW, eine Leistung, die schon überschritten ist (Stand 2014: 38,2 GW). Auch der mittlere Ausbaupfad ist relativ konservativ. Im Jahr 2050 wird eine Gesamtkapazität Onshore von 79 GW erreicht; dagegen betragen die Ausbauziele der Bundesländer zusammengefasst eine Kapazität von 86,3 GW Onshore schon im Jahr 2024. Auch die 16,1 GW, die für Offshore-Anlagen in den Ausbauzielen definiert sind, spiegeln sich eher im Szenario des hohen Ausbaupfades wieder. Dieser soll daher als Referenzszenario dienen. Das Green-Economy-Szenario basiert auf (Fraunhofer ISE, 2012), in dem ein vollständig auf erneuerbaren Energien bestehendes Energiesystem Deutschlands modelliert wird. Für dieses hat (Wuppertal Institut, 2014) die bis 2050 zu errichtenden Kapazitäten inklusive Ersatzleistungen errechnet. Es soll angenommen werden, dass der zeitliche Verlauf des Ausbaus dieser Kapazitäten (bis auf einen konstanten Faktor) dem des Ausbaupfades im Referenz-Szenario entsprechen soll.

Tabelle 2-58: Installierte Gesamtleistung WKA in Deutschland im Jahr 2050

	BAU	Green Economy
Onshore	77 GW	85 GW
Offshore	60 GW	200 GW

Damit liegen die Onshore-Kapazitäten des Green-Economy-Szenarios nur rund 10 % über denen des BAU-Szenarios. Dies macht deutlich, wie sehr der Ausbau der Windenergieerzeugung in Deutschland durch fehlende Standorte begrenzt ist. Stattdessen findet sich das Gros der im Green-Economy-Szenario zusätzlich errichteten Kapazitäten im Offshore-Bereich.

Auch die Marktanteile in den verschiedenen Szenarien wurden (Wuppertal Institut, 2014) entnommen - für eine genaue Beschreibung der Szenarien-Annahmen sei hierauf verwiesen.

Tabelle 2-59: Marktanteile der Technologielinien am Markt der WKA im BAU-Szenario

	Onshore			Offshore		
	2012	2025	2050	2012	2025	2050
SG-PM-DD	1 %	0 %	0 %	0 %	1,5 %	15 %
SG-PM-MS	0 %	1,5 %	5 %	0 %	35,5 %	34 %
SG-PM-HS	22 %	27,5 %	30 %	0 %	3 %	1 %
SG-E-DD	58 %	55,5 %	53 %	0 %	0 %	0 %
AG	19 %	15,5 %	12 %	100 %	60 %	51 %

Tabelle 2-60: Marktanteile der Technologielinien am Markt der WKA im Green-Economy-Szenario

	Onshore			Offshore		
	2012	2025	2050	2012	2025	2050
SG-PM-DD	1 %	16,5 %	40 %	0 %	9 %	37 %
SG-PM-MS	0 %	4,5 %	14 %	0 %	42,5 %	61 %
SG-PM-HS	22 %	48,5 %	40 %	0 %	2,5 %	0 %
SG-E-DD	58 %	22,5 %	4 %	0 %	0 %	0 %
AG	19 %	8 %	2 %	100 %	46,5 %	2 %

SG-PM-DD: Synchrongenerator, permanenterregt, direct drive (getriebelos); SG-PM-MS: Synchrongenerator, permanenterregt, middle-speed; SG-PM-HS: Synchrongenerator, permanenterregt, high-speed; SG-E-DD: Synchrongenerator, elektrisch erregt, direct drive (getriebelos); AG: Asynchrongenerator

Der hohe Wirkungsgrad bei geringem Gewicht der Permanentmagnetgeneratoren ist insbesondere im Offshore-Bereich von großer Bedeutung, so dass die Marktanteile hier zukünftig deutlich zunehmen werden.

Der Übersichtlichkeit halber sollen die Zubauten der verschiedenen Ausführungen der Permanentmagnet-Generatoren in den Stützjahren zusammengefasst werden (inklusive Ersatzbauten, bei einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren):

Tabelle 2-61: Jährliche Installationen von WKA mit Permanentmagnet-Generatoren in Deutschland in MW/a

	2013	2025	2050
BAU	1.072	1774	2970
Green Economy	1.072	3.149	4.995

Global

Die weltweite installierte Leistung an WKA ist in den letzten 15 Jahren stark gestiegen. Allein im Jahr 2014 wurden weltweit 51,5 GW neu installiert, was den Bestand um 16 % auf 369,6 GW erhöht. Der größte Zubau fand in den letzten Jahren in China statt und wurde deutlich dominiert von Onshore-

Anlagen. Bis zum Jahr 2016 erwartet das Global Wind Energy Council eine Kapazität von 493,3 GW. (GWEC, 2014)

Auch darüber hinaus wird bis 2025 ein sehr dynamisches Wachstum von 8,4 % p.a. des Marktes der Onshore-Windenergie angenommen. Der von der IEA (im Rahmen von Klimaschutz-Szenarien) prognostizierte Ausbaupfad liegt mit einem Wachstum des Onshore-Marktes von 6,9 % p.a. leicht darunter. Dieser Ausbaupfad soll das BAU-Szenario beschreiben. In diesem Szenario beträgt die weltweit installierte Kapazität an WKA im Jahr 2050 2.350 GW. (IEA, 2012) Einen noch optimistischeren Ausbaupfad beschreibt das hi-ren Szenario; in diesem wird im Jahr 2050 eine Gesamtkapazität von 2.780 GW erreicht. Dieses soll als GREEN-Szenario angenommen werden. Diese Prognosen liegen innerhalb der von (GWEC, 2014) gemittelten Werte, die die 2050 installierte Leistung zwischen 1.648 GW und 4.042 GW sieht.

Die Marktanteile der Technologielinien, wie sie für die nationale Betrachtung vorgestellt werden, sollen auch für die globale Betrachtung herangezogen werden. Damit ergeben sich für Permanentmagnet-Generatoren (wieder zusammengefasst) die folgenden Zubauten (inklusive Ersatz):

Tabelle 2-62: Jährliche Installationen von WKA mit Permanentmagnet-Generatoren weltweit in MW/a

	2013	2025	2050
BAU	8.450	31.979	76.294
Green Economy	8.450	37.727	90.142

2.1.9.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Damit ergeben sich die folgenden Materialbedarfe für Permanentmagnet-Generatoren zur Anwendung in Windkraftanlagen in Deutschland (Onshore und Offshore):

Tabelle 2-63: Absolute Materialbedarfe für Permanentmagnetgeneratoren in WKA in Deutschland (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Dysprosium	2,5	4,3	12,0	2,5	6,4	15,9
Kupfer	2.253	3.726	6.237	2.253	6.614	10.491
Neodym	34,9	59,4	133	34,9	90,3	178

Die weltweiten Materialbedarfe stellen sich wie folgt dar:

Tabelle 2-64: Absolute Materialbedarfe für Permanentmagnetgeneratoren in WKA weltweit (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Dysprosium	20,1	63,3	218	20,1	76,3	267
Kupfer	17.747	67.155	160.217	17.747	79.227	189.299
Neodym	275	888	2.432	275	1.070	2.979

2.1.9.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Abgesehen von den inhärenten Unsicherheiten von Zukunftsprognosen besteht kein weiterer Untersuchungsbedarf.

2.1.9.7 Quellen

- Arnold, 2012 HTSL-Generatoren und -Motoren bringen entscheidende Systemvorteile
- European Commission Joint Research Centre, 2012 European Commission Joint Research Centre. (2012). Strategic Energy Technology Plan. Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- IEA, 2012 International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris.
- Fraunhofer IWES, 2011 Fraunhofer IWES, Windenergie-Report Deutschland 2011
- Fraunhofer IWES, 2014 Windenergiereport Windenergie Report Deutschland 2014
- Frost & Sullivan, 2010 Copper content assessment of wind turbines, Final Report V01, by Frost & Sullivan. Presented to ECI; July 12, 2010
- GWEC, 2014 Global Wind Energy Outlook. 2014
- Wuppertal Institut, 2014 Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.10 UT Nr. 107: „Synchron-Generatoren“

2.1.10.1 Technologiebeschreibung

Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen sind Generatoren zur Stromproduktion mit Läufer, die mit dem durch die Netzfrequenz vorgegebenen Drehfeld synchron umlaufen. Das Wirkprinzip entspricht dem des oben beschriebenen permanenterregten Generators. Möglich ist auch die Auslegung als fremderregter Synchron-Generator, die ausschließlich betrachtet werden sollen. An Stelle eines Permanentmagneten erzeugt eine stromführende Spule das Magnetfeld des Läufers. Dies bedingt den Einsatz von Schleifkontakten, was die Lebensdauer des Generators senkt. Zudem sinkt der Gesamtwirkungsgrad auf Grund der Verluste durch den Widerstand der Läuferwicklung.

Da die vom Synchron-Generator abgegebene Leistung vom Antrieb abhängt und somit nicht konstant ist, muss sie von einem Umrichter in Spannung und Frequenz an die Anforderungen des Netzes angepasst werden. Der Rotor der Anlage kann daher mit einer variablen Frequenz drehen und so bei jeder Windgeschwindigkeit die optimale aerodynamische Leistung aufnehmen.

2.1.10.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die Leistung [kW] verwendet.

2.1.10.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Fremderregte Synchrongeneratoren benötigen Kupferwindungen sowohl im Stator, als auch im Läufer. (Wuppertal Institut, 2014) hat aus den Herstellerangaben eines getriebelosen Generators mit 2,3 MW Leistung einen spezifischen Kupferbedarf von 4.348 g/kW errechnet. Dieser Wert liegt noch einmal über der von (Frost & Sullivan, 2010) angegebenen Spanne von 330-4.000 g/kW (Angaben für nicht näher spezifizierte Synchrongeneratoren mit und ohne Getriebe). Der Wert aus (Wuppertal Institut, 2014) liegt deutlich über dem für einen Asynchrongenerator ermittelten Wert von 800 g/kW, was in Anbetracht des vergleichbaren Aufbaus unwahrscheinlich wirkt. Daher soll im Folgenden der Mittelwert der von (Frost & Sullivan, 2010) angegebenen Spanne angenommen werden.

Zukünftige Anlagen werden wahrscheinlich tendenziell höhere Leistungen aufweisen. Da der Kupferbedarf mit der Leistung überproportional ansteigt, kann erwartet werden, dass auch die Kupferinten-

sität steigt. Jedoch lässt sich auf Grund unzureichender Daten die Abhängigkeit nicht quantifizieren, daher soll der Kupferbedarf für die Zukunft konstant gehalten werden.

Tabelle 2-65: Spezifische Materialbedarfe von Synchrongeneratoren zum Einsatz in WKA

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Kupfer	2.150	2.150	2.150

2.1.10.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Die Marktentwicklung von Asynchron-Generatoren ist durch zwei unterschiedliche Tatsachen geprägt. Im onshore Bereich ist ein weiterer Rückgang des Marktanteils von derzeit 19 % auf 12 % in 2050 zu erwarten. Dieser Rückgang führt in Deutschland aufgrund der geringer werdenden Zubauraten im BAU-Szenario im onshore Bereich auch absolut zu geringeren Neuinstallationen p.a. Im Green-Economy-Szenario in Deutschland und global wird in beiden Szenarien der Rückgang des Marktanteils durch das steilere Wachstum des Marktes überkompensiert, was in insgesamt höheren absoluten Neuinstallationen für Asynchron-Generatoren onshore resultiert. Im offshore Bereich wird ein Rückgang des Marktanteils von heute 100 % auf 51 % in 2050 erwartet. Die sehr hohen Wachstumsraten führen hier in allen betrachteten Szenarien zu einem deutlichen Anstieg der absoluten Neuinstallationen p.a. Insgesamt ist daher bei den Asynchron-Generatoren trotz des Rückgangs der Marktanteile onshore und offshore von einem dynamischen Marktwachstum auszugehen, wobei das Wachstum in Deutschland bis 2025 wegen des überproportionalen Ausbaus der offshore Anlagen stärker als das globale sein wird. Die jährlichen Installationen inklusive Ersatzbauten sind in den folgenden beiden Tabellen dargestellt:

Tabelle 2-66: Jährliche Installationen von WKA mit Synchrongeneratoren in Deutschland in MW/a

	2013	2025	2050
BAU	2.706	1.482	1.696
Green Economy	2.706	3.942	4.511

Global

Weltweit wird mit folgender Entwicklung gerechnet:

Tabelle 2-67: Jährliche Installationen von WKA mit Synchrongeneratoren weltweit in MW/a

	2013	2025	2050
BAU	21.311	42.488	78.852
Green Economy	21.311	48.187	89.429

2.1.10.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Der zukünftige Materialbedarf stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 2-68: Absoluter Materialbedarf für Synchrongeneratoren in WKA in Deutschland (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	5.817	3.186	3.646	5.817	8.475	9.699

Weltweit ergeben sich die folgenden Bedarfe:

Tabelle 2-69: Absoluter Materialbedarf für Synchrongeneratoren in WKA weltweit (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	45.818	91.349	169.531	45.818	103.603	192.272

2.1.10.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Untersuchungsbedarf wird in der breiteren Untersuchung der spezifischen Kupferbedarfe gesehen, insbesondere in Abhängigkeit von der Generatorenleistung.

2.1.10.7 Quellen

- Arnold, 2012 HTSL-Generatoren und -Motoren bringen entscheidende Systemvorteile
- European Commission Joint Research Centre, 2012 European Commission Joint Research Centre. (2012). Strategic Energy Technology Plan. Luxemburg: Publications Office of the European Union
- IEA, 2012 International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris
- Fraunhofer IWES, 2011 Fraunhofer IWES, Windenergie-Report Deutschland 2011
- Fraunhofer IWES, 2014 Windenergiereport Windenergie Report Deutschland 2014
- Frost & Sullivan, 2010 Copper content assessment of wind turbines, Final Report V01, by Frost & Sullivan. Presented to ECI; July 12, 2010
- GWEC, 2014 Global Wind Energy Outlook. 2014
- Wuppertal Institut, 2014 Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.11 UT Nr. 108: „Asynchron-Generatoren“

2.1.11.1 Technologiebeschreibung

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

Dadurch wird wieder ein Stromfluss in die Läuferstäbe induziert, der seinerseits ein elektromagnetisches Feld aufbaut und so Energie an die Statorwicklungen und damit das Netz abgibt.

Auf Grund dieses Effekts dreht der Läufer nicht mit der Frequenz des Statorstroms, sondern asynchron. Der Schlupf beträgt dabei rund 1 %. Der Generator ändert seine Drehgeschwindigkeit leicht, wenn sich das angreifende Drehmoment ändert, was die mechanischen Belastungen im Getriebe verringert.

Asynchron-Generatoren kamen lange Zeit im Zuge des sogenannten Dänischen Konzepts zur Anwendung. Hier wird die WKA direkt an das Netz gekoppelt, der Rotor muss also mit einer (durch die Netzfrequenz und ein Getriebe vorgegebenen) festen Drehzahl arbeiten. Damit kann konstruktiv bedingt nur eine bestimmte Windgeschwindigkeit optimal genutzt werden. Dies lässt sich teilweise beheben, indem entweder zwei Generatoren verbaut werden, zwischen denen im Betrieb gewechselt wird, oder ein polumschaltbarer Generator genutzt wird.

Um die mechanische Belastung etwa bei Böen zu reduzieren, kann der Läufer so konstruiert werden, dass über Schleifringe Vorwiderstände zu- oder abgeschaltet werden. So kann der Rotor kurzzeitig seine Drehgeschwindigkeit ändern; dabei treten jedoch hohe Wärmeverluste auf. Wenn zusätzlich noch ein Umrichter verwendet wird, kann der Asynchron-Generator auch mit einer drehzahlvariablen WKA zum Einsatz kommen. In diesem Fall muss der Umrichter etwa 20 bis 40 % der erzeugten elektrischen Leistung umsetzen.

Asynchron-Generatoren sind sehr robust und günstig. Im Vergleich zu Synchron-Generatoren haben sie jedoch niedrigere Wirkungsgrade.

2.1.11.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die Leistung [kW] verwendet.

2.1.11.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Der spezifische Kupferbedarf wird berechnet aus den Materialinhalten eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators mit Getriebe mit einer Leistung von 3 MW (European Commission Joint Research Centre, 2012). Der berechnete Wert liegt mit 800 g/kW in der Nähe des von (Frost & Sullivan, 2010) angegebenen spezifischen Kupferbedarfs von 650 g/kW.

2.1.11.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Wie oben dargestellt, wurden Asynchrongeneratoren noch im Jahr 2007 in der Hälfte aller installierten WKA eingesetzt. Bis 2012 ging ihr Marktanteil jedoch auf 19 % zurück.

Es wird erwartet, dass Asynchrongeneratoren in Zukunft weiter an Bedeutung verlieren, insbesondere im Green-Economy-Szenario mit schnelleren Technologieentwicklungen anderer Generatoren. Daher sind die Installationen 2050 im Green-Economy-Szenario nur geringfügig höher als im BAU-Szenario.

Tabelle 2-70: Jährliche Installationen von WKA mit Asynchrongeneratoren in Deutschland in MW/a

	2013	2025	2050
BAU	1.409	1.914	2.271
Green Economy	1.409	2.736	3.078

Tabelle 2-71: Jährliche Installationen von WKA mit Asynchrongeneratoren weltweit in MW/a

	2013	2025	2050
BAU	21.738	26.532	42.560
Green Economy	21.738	32.280	51.955

2.1.11.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Aus den spezifischen Materialbedarfen und der angenommenen Marktentwicklung resultieren folgende Materialbedarfe:

Tabelle 2-72: Absoluter Materialbedarf für Asynchrongeneratoren in WKA in Deutschland (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	1.127	1.531	1.817	1.127	2.189	2.463

Die weltweiten Bedarfe stellen sich wie folgt dar:

Tabelle 2-73: Absoluter Materialbedarf für Asynchrongeneratoren in WKA weltweit (in t/a)

	BAU			Green Economy		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	17.391	21.226	34.048	17.391	25.824	41.564

2.1.11.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Asynchrongeneratoren finden schon lange Verwendung. Untersuchungsbedarf besteht bei der Frage der Marktentwicklung im Verhältnis zu Konkurrenztechnologien.

2.1.11.7 Quellen

- Arnold, 2012 HTSL-Generatoren und -Motoren bringen entscheidende Systemvorteile
- European Commission Joint Research Centre, 2012 European Commission Joint Research Centre. (2012). Strategic Energy Technology Plan. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Fraunhofer IWES, 2011 Fraunhofer IWES, Windenergie-Report Deutschland 2011
- Fraunhofer IWES, 2014 Windenergiereport Windenergie Report Deutschland 2014
- Frost & Sullivan, 2010 Copper content assessment of wind turbines, Final Report V01, by Frost & Sullivan. Presented to ECI; July 12, 2010
- GWEC, 2014 Global Wind Energy Outlook. 2014
- IEA, 2012 International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris.
- Wuppertal Institut, 2014 Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.12 UT Nr. 110: „Reluktanzgeneratoren“

2.1.12.1 Technologiebeschreibung

Reluktanzgeneratoren arbeiten nach einem anderen Prinzip als die oben vorgestellten Generatoren: Das Drehmoment wird hier nicht durch die Lorentz-, sondern durch die Reluktanzkraft erzeugt. Dadurch muss der Rotor weder mit Permanentmagneten, noch mit stromleitenden (daher verlustbehafteten) Spulen ausgestattet werden. Im Motorbetrieb wird die Kraft auf den Rotor erzeugt, indem nacheinander jeweils zwei Pole des Stators magnetisiert werden. Der Rotor wird sich nun so stellen, dass die Reluktanz minimiert wird. Dieses Prinzip wird im Generatorbetrieb umgedreht. Das erzeugte Drehmoment ist von Drehgeschwindigkeit und Generatorvolumen unabhängig, wodurch sich Reluktanzgeneratoren insbesondere für den Einsatz in großen Leistungsbereichen eignen. Vorteilhaft ist zudem, dass Verluste praktisch nur im (einfach zu kühlenden) Stator auftreten. Die Wirkungsgrade sind besser als die vergleichbarer Asynchrongeneratoren. Zudem ist der Läufer sehr einfach konstruiert. Damit sind Reluktanzgeneratoren sehr robust. Der Einsatz in WKA ist allerdings noch nicht abzusehen, da die Technologie noch sehr jung ist.

2.1.12.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die Leistung [kW] verwendet.

2.1.12.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Reluktanzgeneratoren verwenden, anders als fremderregte Generatoren, Kupfer nur in den Stator-Windungen; es kann daher erwartet werden, dass der Kupferbedarf geringer ausfällt. (Fraunhofer ISI, 2010) ermittelten für permanentmagnetisch erregte Motoren, Asynchronmotoren mit Aluminiumläufer und Reluktanzmotoren zum Einsatz in der Elektromobilität nach Herstellerangaben einen Kupferwert von 900 g/kW, der zwischen den Technologielinien vergleichbar ist. Es soll angenommen werden, dass sich diese Beobachtung auf Generatoren für den Einsatz in WKA übertragen lässt. Daher soll im Folgenden für die Reluktanzgeneratoren der Kupferbedarf der Asynchrongeneratoren übernommen werden.

Darüber hinaus wurden keine Rohstoffinhalte gemäß der Materialliste identifiziert.

Tabelle 2-74: Spezifische Materialbedarfe für Reluktanzgeneratoren in WKA (in g/kW)

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Kupfer	800	800	800

2.1.12.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Reluktanzgeneratoren haben ein sehr hohes technisches Potential, insbesondere in hohen Leistungsbereichen. Zwar erwartet (Fraunhofer IWES, 2011) nach 2020 das Aufkommen erster hybrider Generatorkonzepte, die Reluktanzeffekte nutzen; dennoch wird reinen Reluktanzmaschinen bis 2050 keine Marktrelevanz zugeschrieben. Ähnlich schätzt (Wuppertal Institut, 2014) die Entwicklung ein.

2.1.12.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Da eine Marktrelevanz nicht abzusehen ist, lassen sich keine absoluten Materialbedarfe bestimmen. Wie oben jedoch dargestellt, verlief ein Einsatz von Reluktanzgeneratoren substitutiv zu anderen Generatorentypen. Da Reluktanzgeneratoren einen vergleichsweise niedrigeren spezifischen Kupferbedarf haben, würde die insgesamt für Windkraftanlagen benötigte Menge Kupfer so tendenziell sinken.

2.1.12.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die weitere Technologieentwicklung der Reluktanzgeneratoren ist zu beobachten. Bisher ist ein Einsatz in WKA noch nicht abzusehen; sollte die Technologie jedoch entsprechend ausgereift werden, könnte sie einen bedeutenden Einfluss auf den Gesamtmaterialbedarf entwickeln.

2.1.12.7 Quellen

ISI 2010	Fraunhofer ISI. (2010). Kupfer für Zukunftstechnologien
IWES 2011	Fraunhofer IWES, Windenergie-Report Deutschland 2011
WI 2014	Wuppertal Institut. 2014. Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.1.13 UT Nr. 111: „HTS-Generatoren“

2.1.13.1 Technologiebeschreibung

Das Wirkprinzip von HTS-Generatoren entspricht dem elektrisch erregter Synchrongeneratoren. Das Kupfer in den Läufer-Wicklungen wird teilweise durch keramische Hochtemperatursupraleiter (high temperature superconductor – HTS) ersetzt. Diese besitzen unterhalb einer Grenztemperatur von 30° K (- 243,15 °C) einen sehr geringen elektrischen Widerstand und können so zu erheblich höheren Feldstärken beitragen.

Dadurch werden in Anlagen mit mehreren Megawatt Leistung sehr hohe Wirkungsgrade ermöglicht. Energieverluste entstehen hauptsächlich durch die Bereitstellung der benötigten Kühlung des Supraleiters. In Kraftwerksgeneratoren mit mehreren 100 MW Leistung etwa werden Wirkungsgrade von 99,5 % erreicht, die auch im Teillastbereich nicht stark abfallen. Für Anwendungen im niedrigen Leistungsbereich verbietet sich der Einsatz von HTS-Generatoren dagegen, da der Energieaufwand für die Kühlung zu hoch ist. In WKA ermöglichen HTS-Generatoren darüber hinaus die Konstruktion kleinerer und leichter Gondeln im hohen Leistungsbereich, was insbesondere für Offshore-Anlagen eine wichtige Rolle spielt. Im Vergleich zu einem permanenterregten Generator für eine 10-MW-Anlage können so rund 50 % des Generatorgewichts eingespart werden. (Wuppertal Institut, 2014)

HTS-Generatoren sind eine vergleichsweise junge Technologielinie. Große Maschinen werden zwar getestet, jedoch ist noch nicht abzusehen, wann HTS-Generatoren in WKA zum Einsatz kommen könnten.

2.1.13.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird die Leistung [kW] verwendet.

2.1.13.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

In HTS-Generatoren wird das Kupfer in den Läufer-Windungen teilweise durch supraleitende Keramik ersetzt. Bezüglich HTS-Leiter konzentrieren sich Technologieentwicklungen auf Wismut-(Blei-) Strontium-Calcium-Kupfer-Oxid ((Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+x} kurz BSCCO). Für den Einsatz in WKA scheint dieses Material jedoch nicht geeignet. Für diesen Anwendungsbereich könnten Yttrium-Barium-Kupferoxid-Gruppen (YBa₂Cu₃O_{7-x} mit x < 0,6) zum Einsatz kommen. Hier könnte Yttrium auch durch Neodym oder andere Seltene Erden substituiert werden, was jedoch im Hinblick auf heutige Preise nicht zu erwarten ist. Die benötigten Mengen wurden in (Wuppertal Institut, 2014) mittels Literaturrecherche und Expertenbefragung abgeschätzt, sind jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Der Yttriumbedarf von 0,3 g/kW, der sich aus der Expertenbefragung ergab, lag deutlich unter dem Wert der Literaturrecherche von 2 g/kW (der allerdings nur auf einer Quelle beruhte). Auch im Hinblick auf zukünftige Technologieverbesserungen wurde der niedrigere Wert übernommen.

Tabelle 2-75: Spezifische Materialbedarf für HTS-Generatoren in WKA (in g/kW)

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Kupfer	0	325	325
Yttrium	0	0,3	0,3

2.1.13.4 Nationale und globale Marktentwicklung

In Anlagen höherer Leistung wirken hohe Belastungen im Getriebe. Dies lässt den Einsatz getriebeloser Gondeln sinnvoll erscheinen, die jedoch durch ihr vergleichsweise hohes Gewicht in der Größe beschränkt sind (insbesondere für Offshore-Anlagen). Abhilfe könnten HTS-Generatoren liefern. Sie sind bei gleicher Leistung sehr viel kleiner und leichter als andere Generatortypen, was sie insbesondere für große Offshore-Anlagen prädestiniert.

Ihre Marktreife ist jedoch momentan noch nicht abzusehen. Das zeigt sich beispielhaft an einer Expertenbefragung in (Wuppertal Institut, 2014). Das Fraunhofer IWES schätzte im Windenergie Report Deutschland 2011 die Marktrelevanz von HTS-Generatoren für WKA noch als nicht gegeben ein. In Konsistenz zu den vorhergehenden Betrachtungen soll auch hier angenommen werden, dass HTS-Generatoren keine bedeutenden Marktanteile erreichen.

Dennoch soll auch für diese Technologie eine Maximalabschätzung durchgeführt werden. Dazu wird angenommen, dass HTS-Generatoren im Offshore-Bereich 2025 einen Marktanteil von 2,5 % und 2050 einen Marktanteil von 17 % erreichen (Wuppertal Institut, 2014). Im Onshore-Bereich, wo die Vorteile des geringeren Gewichts und der geringeren Größe nicht so schwer wiegen, setzen sie sich auch in diesem Szenario nicht durch.

Deutschland

In Deutschland würden unter dieser Annahme Windkraftanlagen mit HTS-Generatoren von maximal 68 MW im Jahr 2025 und 686 MW im Jahr 2050 zugebaut.

Aus dieser Maximalabschätzung ergeben sich die folgenden potenziellen Materialbedarfe.

Tabelle 2-76: Absoluter Materialbedarf für HTS-Generatoren in WKA in Deutschland (in t/a)

	Maximalabschätzung		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	0	22,1	223
Yttrium	0	0,02	0,21

Global

Tabelle 2-77: Absoluter Materialbedarf für HTS-Generatoren in WKA weltweit (in t/a)

	Maximalabschätzung		
	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Kupfer	0	255	3.435
Yttrium	0	0,24	3,17

2.1.13.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Es wurden keine Materialdaten für das BAU- und Green-Economy-Szenario berechnet.

2.1.13.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Der Einsatz von HTS-Generatoren in WKA ist noch sehr unsicher; in Hinsicht darauf ist zu beobachten, wie sich die Technologie weiter entwickelt. Zudem lassen sich die Materialbedarfe noch nicht genau quantifizieren. Der Einsatz von Yttrium-Barium-Kupferoxid-Gruppen erscheint wahrscheinlich, die sich daraus ergebenden spezifischen Materialbedarfe sind jedoch noch nicht zufriedenstellend geklärt.

2.1.13.7 Quellen

Arnold, 2012	HTSL-Generatoren und -Motoren bringen entscheidende Systemvorteile
European Commission Joint Research Centre, 2012	European Commission Joint Research Centre. (2012). Strategic Energy Technology Plan. Luxemburg: Publications Office of the European Union
E&T 2012	Energie & Technik, HTSL-Generatoren und -Motoren bringen entscheidende Systemvorteile, http://www.energie-und-technik.de/smart-energy/artikel/86995/
Fraunhofer IWES, 2011	Fraunhofer IWES, Windenergie-Report Deutschland 2011
Fraunhofer IWES, 2014	Windenergiereport Windenergie Report Deutschland 2014
Frost & Sullivan, 2010	Copper content assessment of wind turbines, Final Report V01, by Frost & Sullivan. Presented to ECI; July 12, 2010
GWEC, 2014	Global Wind Energy Outlook. 2014
IEA, 2012	International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012. Paris
IEEE 2013	R. Qu, Y. Liu, J. Wang, Review of Superconducting Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines, http://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/ASC2012-4LPG-09.pdf
Wuppertal Institut, 2014	Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf

2.2 Umwelttechnologien im Leitmarkt Energieeffizienz

Die Energieeffizienz ist mit Abstand der größte Leitmarkt im Bereich der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz. Mit 825 Mrd. Euro entfiel 2013 rund ein Drittel des gesamten globalen Marktvolumens der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz auf die Energieeffizienz (BMUB 2014). Nach Schätzungen des Beratungsunternehmens Roland Berger würde der Leitmarkt Energieeffizienz zwischen 2013 und 2025 ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 4,3 % aufweisen. Infolgedessen würde das globale Marktvolumen der Energieeffizienz im Jahr 2025 etwa 1.365 Mrd. Euro betragen. Die Energieeffizienz bleibt zwar der Leitmarkt mit dem größten Volumen, aber ihr Anteil am Gesamtmarkt der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz sinkt auf 25 % in 2025.

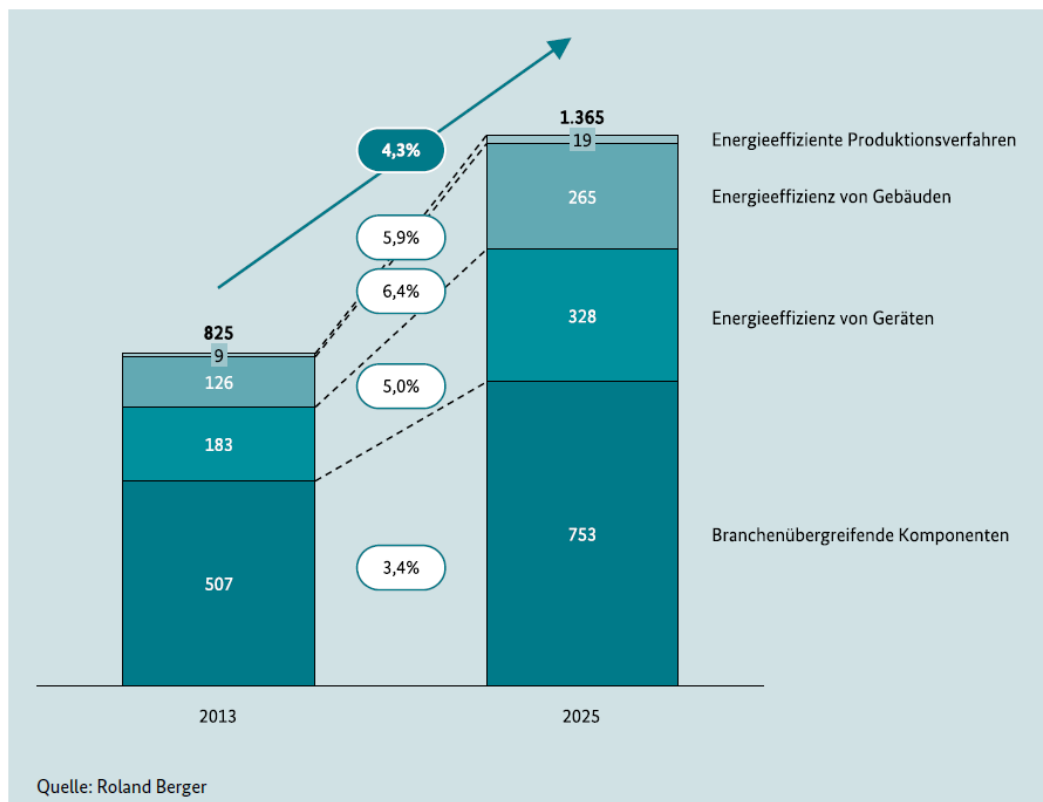
Die Grundlage für die Einschätzung der Größe des Leitmarktes Energieeffizienz bildet die Systematisierung der Marktsegmente, wie folgt:

1. Energieeffiziente Produktionsverfahren, wie z. B. bei der Metallerzeugung, in der Grundstoffchemie usw.
2. Energieeffizienz von Gebäuden, wie z. B. effiziente Heizungs-, Klima-, Lüftungstechnik, Wärmedämmung usw.
3. Energieeffizienz von Geräten, wie z. B. Green IT, energieeffiziente Beleuchtung usw.
4. Branchenübergreifende Komponenten, wie z. B. elektrische Antriebe, Mess-, Steuer- und Regeltechnik und Prozessleittechnik usw.

Die Systematisierung orientiert sich an den Bereichen beziehungsweise Verbrauchergruppen, die große Potentiale für Energieeinsparungen bieten: Industrie, Gewerbe und Dienstleistungen sowie der Immobiliensektor.

Die Branchenübergreifenden Komponenten stellen das größte Marktsegment innerhalb des Leitmarktes dar, weisen jedoch mit 3,4 % die geringste jahresdurchschnittliche Wachstumsrate auf. Die stärkste Wachstumsdynamik verzeichnet das Marktsegment Energieeffizienz von Gebäuden mit einer jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate von 6,4 %, siehe Abbildung 2-18.

Abbildung 2-18: Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Energieeffizienz 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)



Quelle: BMUB (2014)

Im Marktsegment Branchenübergreifende Komponenten stellen die Elektrischen Antriebe mit einem Volumen von 156,5 Mrd. Euro (2013) aktuell die größte Technologielinie dar. Im Jahr 2025 werden die Elektrischen Antriebe weltweit ein Marktvolumen von 251,4 Mrd. Euro erreichen. Ein wichtiger Treiber des Wachstums dieser Technologielinie ist die universelle Einsetzbarkeit von Elektromotoren und die kontinuierliche Verbesserung ihrer Effizienz. Die Technologielinien Mess-, Steuer- und Regeltechnik sowie Prozessleittechnik spielen eine wesentliche Rolle als Basis für ressourceneffiziente Produktionsverfahren. Diese zwei Technologielinien erreichten 2013 ein globales Marktvolumen von 232,9 Mrd. Euro. Für 2025 ist eine Steigerung auf 337,2 Mrd. Euro zu erwarten (BMUB 2014).

Der Großteil des globalen Marktvolumens im Marktsegment Energieeffizienz von Geräten entfällt auf Energieeffiziente Haushaltsgeräte und Energieeffiziente Beleuchtung. Das Marktvolumen der beiden Technologielinien addierte sich 2013 auf 112,5 Mrd. Euro und wird bis 2025 auf 200,3 Mrd. Euro anwachsen. Die Technologielinie Energieeffiziente Beleuchtung wird im Zeitraum 2013 bis 2025 mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 6,1 % zulegen. Ausschlaggebend für diese dyna-

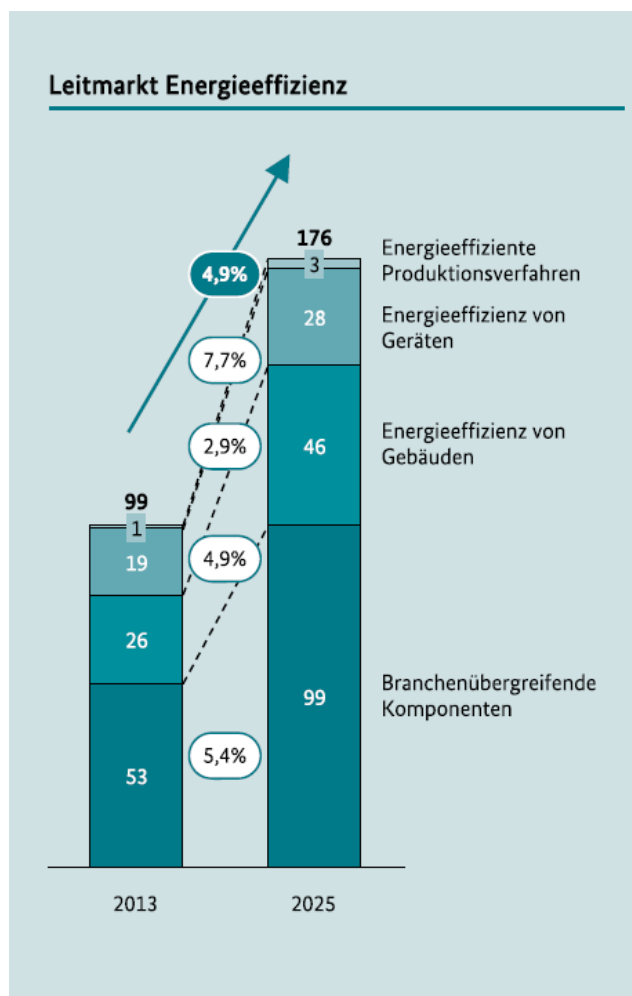
mische Entwicklung ist vor allem die zunehmende Marktdurchdringung von energiesparenden LED und Halogenlampen (BMUB 2014).

Das Marktsegment Energieeffizienz von Gebäuden wird sich bis 2025 mit einer jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate von 6,4 % entwickeln. Die Technologielinie Effiziente Heizungs-, Klima-, Lüftungstechnik legt mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 7,7 % überproportional zu. Die effiziente Heizungs-, Klima-, Lüftungstechnik wird bis 2025 ihren Anteil am globalen Marktvolumen der Energieeffizienz von Gebäuden von 36 % im Jahr 2013 auf 41 % ausbauen (BMUB 2014).

Das Marktvolumen der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz in Deutschland bezifferte sich im Jahr 2013 auf 344 Mrd. Euro. Die Energieeffizienz ist mit einem Marktvolumen von 100 Mrd. Euro der größte Leitmarkt der deutschen Green-Tech-Branche (BMUB 2014). In diesem Leitmarkt waren 2013 ca. 510.000 Personen beschäftigt (BMUB 2014). Der Anteil deutscher Unternehmen am Weltmarkt für den Leitmarkt Energieeffizienz betrug ca. 12 % in 2013 (BMUB 2014). Für 2025 wird für den deutschen Energieeffizienzmarkt ein Marktvolumen von 176 Mrd. Euro prognostiziert, was etwa 24 % des Gesamtmarktes der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz bedeutet (BMUB 2014).

Die folgende Abbildung 2-19 zeigt die Entwicklung des Leitmarktes Energieeffizienz in Deutschland zwischen 2013 und 2025.

Abbildung 2-19: Entwicklung des Marktvolumens in Deutschland 2013-2025 –Leitmarkt Energieeffizienz (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)

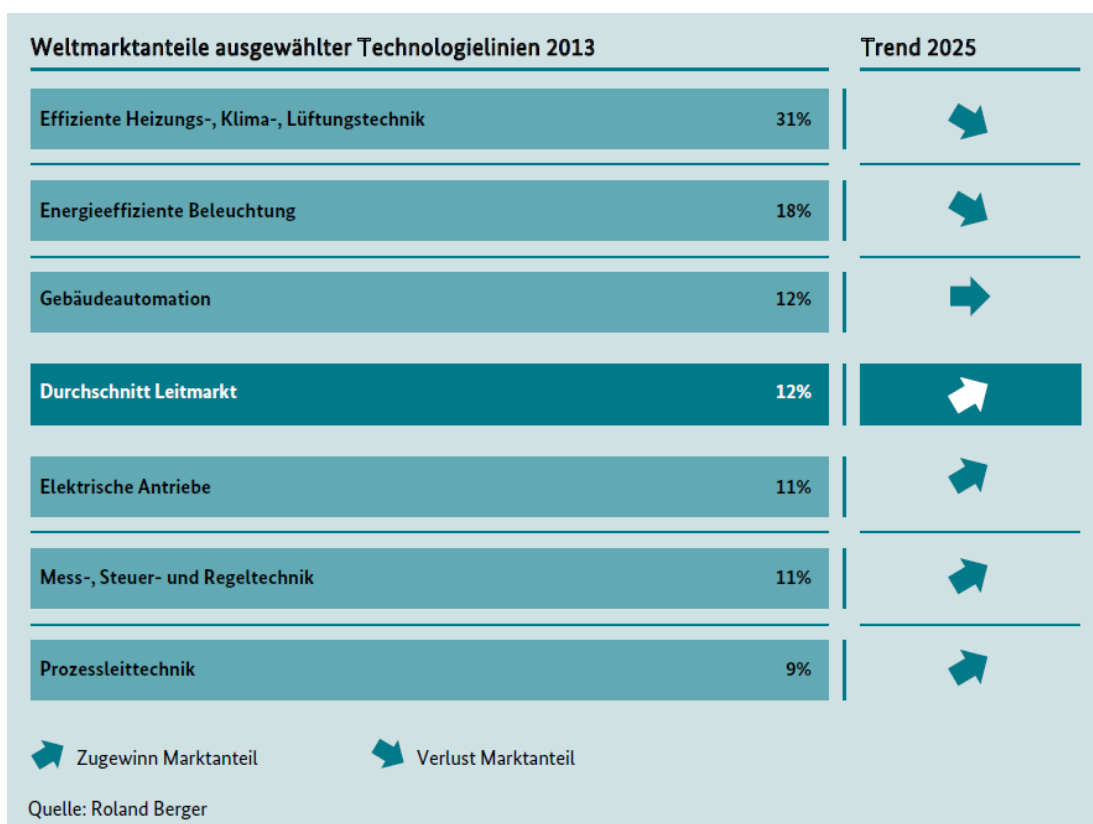


Quelle: BMUB (2014)

Die elektrischen Antriebe, die Mess-, Steuer- und Regeltechnik und effiziente Heizungs-, Klima-, Lüftungstechnik gehören zu den zehn führenden Technologielinien Deutschlands in 2013. Gemeinsam erreichten sie eine Marktgröße von ca. 47 Mrd. Euro in 2013 in Deutschland (BMUB 2014). Bei elektrischen Antrieben wird sogar ein jährliches Wachstum von 60 % bis 2025 in Deutschland prognostiziert (BMUB 2014).

Die folgende Abbildung 2-20 zeigt die eingeschätzten Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Energieeffizienz in 2013 und den Trend bis 2025. Der Weltmarktanteil deutscher Hersteller an der Effizienten Heizungs-, Klima-, Lüftungstechnik lag 2013 bei 31 % (BMUB 2014). Im Bereich der elektrischen Antriebe, Mess-, Steuer- und Regeltechnik und Prozessleittechnik wird erwartet, dass Deutschland seinen Weltmarktanteil bis 2025 weiter ausbauen wird.

Abbildung 2-20: Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Energieeffizienz 2013 und Trend bis 2025



Quelle: BMUB (2014)

2.2.1 UT Nr. 2: „Kompressoren“

2.2.1.1 Technologiebeschreibung

Bei einem Kompressor handelt es sich um einen Verdichter (i.d.R. Schraubenverdichter), der von einem Elektromotor angetrieben wird und auf diese Weise Druckluft erzeugt und damit das wichtigste Aggregat eines Druckluftsystems darstellt. Hauptquellen für Energieverluste sind die diabatische Kompression (Wärmeverlust) sowie Motorineffizienzen; darüber hinaus treten Ineffizienzen insbesondere auch bei der Auslegung der Druckluftanlage sowie bei Leckagen auf. Wesentliche Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz bestehen daher in einer bedarfsgerechten Auslegung und Steuerung der Druckluftanlage, einer Identifizierung und Beseitigung von Leckagen sowie einer Ab-

wärmenutzung z. B. durch Wärmeauskopplung bei der Kühlung der Verdichter (vgl. BMUB 2012; Öko-Institut 2015).

Vor dem Hintergrund der – je nach vorliegendem Druckluftsystem – möglichen Ineffizienzen wurde das relative Umweltentlastungspotential als sehr hoch eingeschätzt. So wurden nach Auswertung vorhandener Literaturquellen in Hinblick auf Energie bzw. CO₂-Emissionen auf der Ebene der Kompressoren Einsparpotentiale in Höhe von 30 % während der Gebrauchsphase identifiziert. Durch Systemoptimierung und konsequente Abwärmenutzung sind auf der Ebene der Druckluftsysteme Reduktionen bis zu 90 % möglich; es ist jedoch zu beachten, dass es sich hierbei um Einsparungen auf Systemebene handelt und kein intrinsisches Einsparpotential der Kompressoren selbst darstellt. (NABU 2013, Öko-Institut 2015)

In Hinblick auf die Marktdynamik haben Kompressoren mit 8 % bereits jetzt einen signifikanten Anteil am Leitmarkt „Energieeffizienz“; das Wachstum bis 2025 beträgt 3,4 % p.a. Die Bedeutung wurde daher auf globaler Ebene als „mittel“ eingestuft. Allerdings ist der Anteil Deutschlands am Weltmarkt mit 11 % bereits heute erheblich und wird voraussichtlich überproportional auf 16 % ansteigen. Zudem befinden sich wichtige Kompressorenhersteller in Deutschland (z. B. Kaeser). Die wirtschaftliche Bedeutung von Kompressoren wurde daher im deutschen Bezugsrahmen als „hoch“ eingestuft. (Green-Tech Atlas 4.0)

2.2.1.2 Spezifische Einheit

Vor dem Hintergrund der für den spezifischen Materialbedarf verfügbaren Daten wurde die spezifische Einheit als 1 Kilowatt (kW) installierte Kompressor-Motorenleistung (einer typischen Druckluft-Anlage mit insgesamt 300 kW Leistung) definiert.

2.2.1.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Die Materialbedarfe je spezifischer Einheit wurden aus der Dokumentation der Ökobilanz-Datenbank „EcoInvent“ entnommen (Classen et al. 2009; Steiner / Frischknecht 2007). Unterschiede zwischen dem Status quo (2013) und den Zukunftsszenarien (2025 und 2050) wurden nicht angenommen, da es sich bei Kompressoren bereits um eine ausgereifte Technik handelt.

In der folgenden Tabelle werden die Materialbedarfe für die relevanten Rohstoffe (Chrom, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Vanadium und Wolfram) zusammengefasst, die sich v.a. auf den Einsatz von Edelstählen, unlegierten Stählen und Kupfer als wesentliche Werkstoffe für Kompressoren zurückführen lassen.

Tabelle 2-78: Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (1 kW installierte Kompressor-Motorenleistung) – Eigene Annahmen

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Chrom	300	300	300
Kupfer	1000	1000	1000
Mangan	77	77	77
Molybdän	2,4	2,4	2,4
Nickel	137	137	137
Niob	4,6	4,6	4,6
Vanadium	4,1	4,1	4,1
Wolfram	5,9	5,9	5,9

2.2.1.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Belastbare Daten aus öffentlich verfügbaren Studien zur Entwicklung des Kompressorenmarktes auf nationaler wie globaler Ebene konnten nicht gefunden werden. Daher müsste auf die in Kapitel 2.2.1.1 genannten generischen Wachstumsraten für den Leitmarkts zurückgegriffen werden. Darauf wurde jedoch aus inhaltlichen Gründen verzichtet (siehe folgendes Kapitel).

2.2.1.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Eine Ermittlung der gegenwärtigen wie zukünftigen Materialbedarfe auf der Basis der in Tabelle 2-78 aufgeführten spezifischen Materialbedarfe konnte nicht durchgeführt werden, da dies nicht sachgerecht wäre. Grund hierfür ist, dass die in Kapitel 2.2.1.1 genannten Einsparpotentiale (bis zu 90 % Energie- bzw. CO₂-Einsparungen) nur durch Systemoptimierungen der Druckluftanlage und v.a. auch eine konsequente Nutzung der Abwärme der Kompressoren erzielen lassen. Die hierfür ggf. erforderlichen Materialbedarfe (z. B. durch Wärmetauscher) sind jedoch stark anlagenspezifisch und konnten im Rahmen der vorliegenden Studie nicht auf generischer Ebene quantifiziert werden. Ermittelt werden konnten lediglich die Materialbedarfe für die Installation eines Kompressors (s.o.), wodurch jedoch per se keine Umweltentlastung erzielt werden kann.

Auf qualitativer Ebene kann allerdings festgehalten werden, dass die ggf. erforderlichen Anlagenkomponenten für eine Systemoptimierung (z. B. neue Rohrleitungen für die Druckluftanlage) bzw. Abwärmenutzung (z. B. Wärmetauscher) typischerweise legierten bzw. nichtlegierten Stahl benötigen und am Ende ihrer Nutzungsphase via Recycling gut zurückgewonnen werden können. Folglich wird nicht davon ausgegangen, dass eine solche Optimierung von Kompressoren / Druckluftanlagen eine aus Ressourcensicht kritisch zu bewertende „Umwelttechnologie“ darstellt.

2.2.1.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Nicht erforderlich.

2.2.1.7 Quellen

- | | |
|-----------------------------|---|
| BMUB 2012 | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 3.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin. |
| BMUB 2014 | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Büchele R. et al., Roland Berger Strategy Consultants, Berlin, Juli 2014. |
| Classen et al. 2009 | Classen, M.; Althaus, H-J.; Blaser, J. et al; Life Cycle Inventories of Metals; Ecoinvent Report No. 10, Dübendorf, 2009 |
| NABU 2013 | NABU 2013: Kreibich, R., Hofmann, D., Handke, V. und Scharp, M. 2013. Ressourcenschonung durch ausgewählte grüne Zukunftstechnologien. Auftraggeber Naturschutzbund Deutschland NABU, Bearbeitung IZT. |
| Öko-Institut 2015 | Möller, M.; Baron, Y.; Manhart, A.; et al.; Background report for the development of an EMAS Sectoral Reference Document on Best Environmental Management Practice for the Electrical and Electronic Equipment manufacturing sector, Preparatory findings supporting the development of an EMAS Sectoral Reference Document, Freiburg, 2015 |
| Steiner / Frischknecht 2007 | Steiner, R.; Frischknecht, R.; Metals Processing and Compressed Air Supply, Ecoinvent Report No. 23, Uster, 2007 |

2.2.2 UT Nr. 5: „RFID“

2.2.2.1 Technologiebeschreibung

Die Bezeichnung „RFID“ steht für eine als „Radio Frequency Identification“ bezeichnete Technologie zur Kennzeichnung von Objekten mittels elektronischer Codenummer. Die RFID Technologie besteht im Wesentlichen aus 2 Komponenten, einerseits dem passiven Transponder-Tag und andererseits aus dem aktiven Lesegerät, welches vom Tag berührungslos Daten auslesen (oder auch schreiben) kann. Die Funktionsweise des RFID-Systems basiert auf einem Austausch von digitalen Informationen via Magnetfeldern oder Funkwellen. Dabei dient das Magnetfeld bzw. Funk nicht nur der Datenübertragung sondern auch der temporären Energieversorgung des passiven Transponders. Letzterer benötigt dadurch keine eigene Energiequelle (z. B. Batterie) und kann dadurch sehr klein gehalten werden. Ein Transponder besteht im Wesentlichen nur aus einem winzigen Mikrochip und einer Antenne. Die Antenne übernimmt die Funktion der Energieversorgung und Datenübertragung während der Mikrochip im einfachsten Fall lediglich eine digitale Identifikationsnummer speichert und bei Aktivierung durch das Lesegerät aussendet. Anspruchsvollere Tags enthalten neben der ID-Nummer auch kryptografische Mechanismen zur sicheren Authentifikation und Datenverschlüsselung (z. B. Smart-cards). Spezielle Tags können auch mit Sensoren ausgestattet werden (Oertel et al. 2004).

Obwohl die RFID-Technologie auf dem oben skizzierten Grundprinzip beruht, unterscheiden sich die technischen Varianten hinsichtlich ihrer Bauformen erheblich voneinander (Erdmann et al. 2009). Je nach Frequenzbereich der Funkwellen⁵ unterscheidet sich die Bauform und Größe der Antennen, der Chips und die Art des Trägermaterials. Außerdem entscheiden die jeweiligen Anwendungsgebiete der RFID Tags über die Größe und Bauform (robust oder Leichtgewicht) der Tags. Die Größe der Lesegeräte hingegen hängt ab von der gewünschten Reichweite/Geometrie des Auslesebereichs sowie der erforderlichen Mobilität bzw. Integration in die Infrastruktur der Umgebung. Als Querschnittstechnologie ermöglicht RFID einen Einsatz in vielfältigen Anwendungsbereichen in Industrie, Handel, Verkehr, und Gütermanagement. Weitgehende Szenarien der Technologieentwicklung (Internet of Things) prognostizieren eine umfassende Kennzeichnung und digitale Verwaltung aller anthropogenen Gegenstände mit eindeutiger ID-Nummer (Electronic Product Code (EPC)). Dieser würde mittels RFID Tag auf oder in den Gegenständen befestigt werden.

Die stoffliche Zusammensetzung der RFID Tags hängt sehr stark von der Bauform und dem Anwendungsbereich ab. Robuste Tags für Industrieanwendungen sind üblicherweise grösser und schwerer als Einwegtags auf Verpackungsmaterialien für Handelsgüter. Im Textilbereich werden textile RFID Tags in Etiketten von Kleidungsstücken integriert. Die Antennen für flexible Tags können auch mit Druckverfahren auf Papier oder Folie aufgebracht werden. Vor dem Hintergrund extremer Heterogenität der RFID Technologie sind repräsentative Studien über die Materialien und deren Mengen in RFID Systeme nicht verfügbar vgl. Angerer (2009). Erdmann et al. (2009) stützen sich in einer Studie zur Auswirkung von RFID Tags in Recyclingprozessen auf eine Szenarienanalyse. In diesem Kontext werden Annahmen über die durchschnittliche Zusammensetzung von RFID Tags abgeleitet (Tabelle 2-79) und Prognosen für zukünftige RFID-Stoffströme bis 2026 modelliert (Tabelle 2-81). Eine Studie von RAND macht Angaben über die prognostizierte Entwicklung von RFID-Antennenmaterialien bis 2026 (Tabelle 2-78). Diese Prognosen gehen von einem starken Einfluss der Rohstoffpreise auf Materialauswahl und Design der Tags aus. Es herrscht ein empfindlicher Preisdruck auf die generelle Entwicklung im RFID Markt und der Trend zu kostengünstigen Massenprodukten begünstigt die Auswahl preisgünstiger Materialien (wie Aluminium) und kostengünstige Herstellungsverfahren (leitfähige gedruckte Antennen auf Silberbasis). Zukünftige technologische Innovationen im Bereich der Polymerelektronik werden möglicherweise den Einsatz siliziumbasierter Chips auf RFID Tags obsolet ma-

5 Häufige RFID Systeme arbeiten mit 868/915 MHz (UHF) oder Microwellen (2,45 or 5,8 GHz)

chen. Hingegen ist ein Ersatz der Metalle durch leitfähige Polymere in den Antennen bis auf weiteres unwahrscheinlich, weil letztere eine zu geringe Leitfähigkeit aufweisen.

Tabelle 2-79: Zusammensetzung typischer RFID Tags basierend auf ISO/IEC TR 24729-2:2007

Komponente	Material	Masse [mg]		
		76,2 mm * 76,2 mm Tag	15 mm * 97 mm Tag	15 mm * 148 mm Tag
Deckschicht	PP	270	65	100
	Papier	525	130	200
Klebstoff	Acrylat	115	30	45
IC	Silizium	0,5	0,5	0,5
ACP	Epoxy-basiertes Material	0,8	0,8	0,8
ACP Metall	Nickel	0,1	0,1	0,1
Klebstoff	Polyurethan	40	10	15
Antenne	Kupfer	340	105	140
	Aluminium	50	15	20
	Silber (gedruckt)	36,3*	10,9	14,5*
	Bonding Agent (gedruckt)	15,3*	4,6	6,1*
Substrat	PET	410	100	155
Klebstoff	Acrylat	155	40	60
Gesamt	Tag (ohne Deckschicht)	Cu: 1021,4 Al: 731,4 Ag: 733,0*	Cu: 286,4 Al: 196,4 Ag: 196,9	Cu: 401,4 Al: 281,4 Ag: 282,0*

Quelle: (Erdmann et al. 2009)

Tabelle 2-80: Prognose der RFID Antennenmaterialien im UHF Bereich (868/915 MHz)

Shares of antenna materials in % for HF & UHF labels combined												
Year	2011			2016			2021			2026		
Scenarios	Cu	Ag	Al	Cu	Ag	Al	Cu	Ag	Al	Cu	Ag	Al
Al domination	9	1	90	7	1	92	5	1	94	3	1	96
Cu domination	9	1	90	11	1	88	13	1	86	15	1	84
Ag domination	9	1	90	9	2	89	9	3	88	9	4	87

Quelle: (Schindler et al 2012)

Die Materialzusammensetzung eines modellhaften RFID Tags (entsprechend der Annahmen zur spezifischen Einheit) berechnet sich aus den Angaben von Erdmann et al. (2009) und Schindler et al. (2012) wie folgt: Es wird ein Mittelwert der Masse per Fläche aus den drei in Tabelle 2-79 verzeichneten Tags gebildet. Der Durchschnittswert der Fläche beträgt 32 cm² und entspricht damit den Annahmen zur spezifischen Einheit. Die daraus berechneten Materialmengen sind in Tabelle 2-81 verzeichnet (Menge 1). Zum Vergleich werden die Prozentangaben zu Antennenmaterialien von Schindler et al. (2012) (Szenario „Ag domination“) auf eine durchschnittliche Antenne mit 0,25g Gewicht umgerechnet (Menge 2). Zu beachten ist der Umstand, dass die in den Quellen angegebenen Metalle nicht als Materialgemisch auf ein und denselben Tag vorliegen sondern einen Durchschnittswert über verschiedenartige Tags abbilden. Die Antenne eines einzelnen Tags besteht immer nur aus jeweils einem Metall, je nach zugrunde liegender Technik.

Beispiel für die Materialzusammensetzung eines passiven RFID Tags mit Abmessungen von 93 x 23 mm für die Verwendung mit einer HDPE Transportverpackung für den Gemüsehandel.

Die Tabelle 2-81 & Tabelle 2-82 verdeutlichen die enorme Bandbreite der möglichen Materialzusammensetzung in verschiedenen RFID Tags. Aus Gründen der Plausibilität im Kontext des hier angenommenen Verwendungszwecks (low-cost Tags für Verkaufsverpackungen) wird die Menge 2 als Basis für weitere Berechnungen verwendet (Begründung: Einsatz kostengünstiger Print-Verfahren mit silberbasierten Leitpasten bei low-cost Tags).

Tabelle 2-81: Zusammensetzung eines RFID Tags (Beispiel)

Komponente	Material	Prozent (%)	Gewicht (g)
Substrate	Paper	39,36	0.2302
	PET	31.07	0.1818
Antenne	Adhesive	24.20	0.1417
	Aluminium	5.32	0.0310
Chip	Silicon	0.05	0.0003
Total		100	0.5850

Quelle: Aliaga et al. (2011)

Tabelle 2-82: Materialbedarf für eine durchschnittliche Variante eines RFID Tags von 32 cm²

Material	Komponente	Menge 1	Menge 2
Aluminium	Antenne	0,403 g	0,217 g
Kupfer	Antenne	0,569 g	0,0225 g
Nickel	Leitpaste	0,0001 g	0,0001 g
Silber	Antenne	0,404 g	0,010 g
Silizium	Mikrochip	0,0005 g	0,0005 g

Quellen: eigene Berechnung auf Basis von (Erdmann et al. 2009, Schindler et al. 2012)

2.2.2.2 Spezifische Einheit

Im Rahmen dieser Analyse wird der Materialeinsatz für ein flexibles RFID Tag der UHF Technologie bewertet. Der Einsatzzweck dieses RFID Tags ist die automatische und berührungslose Objektidentifikation von Produkten im Einzelhandel (vom Lagermanagement bis zur Kasse). Der Tag ist auf den Verkaufsverpackungen von Konsumprodukten angebracht.

Es wird angenommen, dass ein solches Tag die Bauform eines flexiblen Etiketts von der Größe 5,7x5,7 cm besitzt und insgesamt (mit Trägersubstrat) ca. 50µm dick ist.

Die zur Produktidentifizierung erforderlichen Sender-Empfänger-Systeme (Lesegeräte und Back-end IT-Systeme) werden hier nicht mit betrachtet.

2.2.2.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Tabelle 2-83: Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU)

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Kupfer	0,0225 g	0,0225 g	0,0225 g
Nickel	0,0001 g	0,0001 g	0,0001 g
Silber	0,01 g	0,01 g	0,01 g
Silizium (Metall)	0,0005 g	0,0005 g	0,0005 g

2.2.2.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Aus den frei verfügbaren Quellen lässt sich keine schlüssige Aussage zur gegenwärtigen und zukünftigen Marktentwicklung der RFID Technologie ableiten. Vorhandene Marktzahlen sind inkonsistent und betreffen meist nur einen Teil des Gesamtmarktes. Zumeist ist nicht ersichtlich auf welche geographische Systemgrenze sich die vorhandenen Marktdaten beziehen. Außerdem sind vorliegende Marktdaten bereits veraltet (z. B. Jahr 2007) weil sie zu einem Zeitpunkt erhoben wurden, an dem die RFID Technologie noch im Anfangsstadium der Marktdurchdringung war. Die folgenden Tabellen geben Ausschnitte der verfügbaren Rahmendaten aus Literaturquellen wider.

Tabelle 2-84: Marktpotentiale je Marktsegment nach (Erdmann et al. 2009)

Anwendung	2007	2012	2017	2022	Potenzial	geschätzt nach:
Distribution						
Pakete	5	100	250	1.000	3.000	BIEK 2007
Briefe und sonstige Post	0	0	900	3.000	20.000	Bundesnetzagentur 2007, KEK 2005
Fluggepäck	1	10	60	120	150	BMVBW 2008
Einwegverpackungen						
Großgewerbe	13,5	180	900	3.600	60.000	Schüler 2008
Lebensmittel PEV	0	180	1.800	10.000	170.000	Schüler 2008
Bedarfsgegenstände PEV	2,5	175	875	2.000	30.000	Schüler 2008
Medikamente PEV	1,5	60	400	1.500	4.000	Schüler 2008
Kleidung PEV	1	20	100	200	3.000	ITE 2008
EE-Geräte PEV	1	20	100	200	2.000	BITKOM/ ZVEI
CDs/DVDs PEV	0,5	10	50	100	3.000	Phono-News
Mehrwegsysteme						
Kühlkette	0	1	20	100	k. A.	
Großgewerbe (sonstige)	1,5	19	80	300	s. o.	
Büchereien	5	10	20	30	350	Stat. BuA 2008
Archivierung	0,3	10	500	1.000	k. A.	
Konsumgüter						
Kleidung	0	10	50	200	3.000	ITE 2008
EE-Geräte	0	10	50	200	2.000	BITKOM/ ZVEI
CDs/DVDs	0	5	25	100	3.000	Phono-News 2007
Personenbezogene Anwendungen						
Smart Cards	50	60	80	100	k. A.	
Smart Ticket Verkehr	0	10	60	600	4.000	BMVBW 2008
Smart Ticket Freizeit	10	10	20	150	1.000	Stat. BuA 2008
Gesamt	92,8	900	6.340	24.000		

Quelle: (Erdmann et al. 2009)

Tabelle 2-85: Szenarien der RFID Marktentwicklung nach (Erdmann et al. 2009)

Anwendungsbereich	2007	2012	2017	2022
Distribution	6	110	1.210	4.120
Einwegverpackungen	20	645	4.225	17.600
Mehrwegsysteme				
Bestandsaufbau	6,8	40	620	1.430
Rückfluss	-	6,8	40	620
Konsumgüter				
Bestandsaufbau	0	25	125	500
Rückfluss	-	0	25	125
Personenbezogene Anwendungen	60	80	160	850
RFID-Tags im System	86	840	5.700	23.300

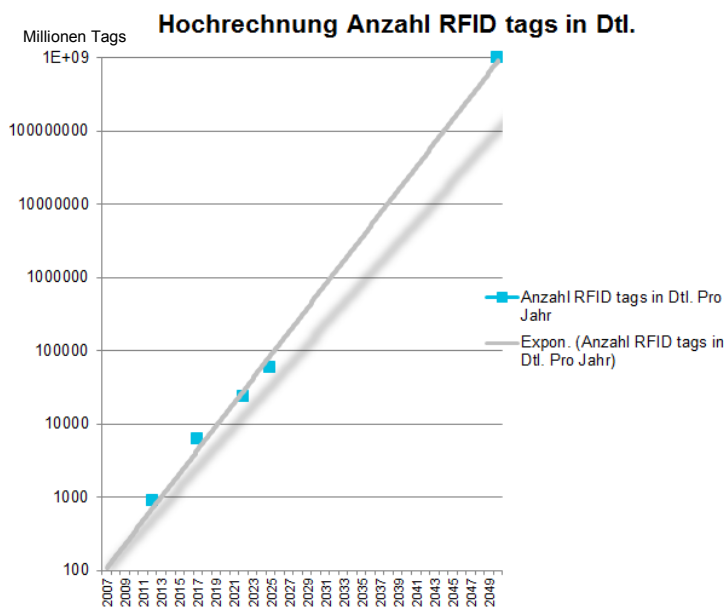
Quellen und Anmerkungen: Berechnungen des IZT basierend auf Bridge 2007 und IDTechEx 2008; RFID-Tags im System zuzüglich Rückfluss, ohne Aufbau; gerundete Werte

Quelle: (Erdmann et al. 2009)

Tabelle 2-86: Prognosen (aus Literatur) und Trendextrapolation

Jahr	Stückzahlen Dtl.	Stückzahlen Retail Welt	Marktgröße Welt
2007	93 Mio.		
2009		1,98 Mrd.	
2010		2,31 Mrd.	\$5.63 Mrd.
2012	900 Mio.		\$6.96 Mrd.
2014		3 Mrd. (nur in Kleidung)	\$8.89 Mrd.
2017	6340 Mio.		
2022	24000 Mio.		
2025	60 Mrd.		\$27.31 Mrd.
Quellen:	(Erdmann et al. 2009)	IDTechEx	IDTechEx
2050 (extrapoliert)	10 exp 13		\$500 Mrd.

Abbildung 2-21: Extrapolation der Anzahl von RFID Tags in Deutschland (pro Jahr)



Quelle: Eigene Berechnung

Aus den oben zitierten Quellen lässt sich auf Basis einer kühnen Trendextrapolation (Abbildung 2-21) eine weitere Steigerung der Nutzung von RFID Tags in Deutschland ableiten. Diese rein rechnerische Extrapolation ergibt eine Stückzahl von $10 \exp 14$ bis $10 \exp 15$ Tags im Jahr 2015. Dies ist ein extrem optimistisches Szenario und dürfte nur bei umfassender Einführung des „Internet der Dinge“ Realität werden. Ein realistischeres Szenario dürfte etwa in der Größenordnung von $10 \exp 13$ Tags im Jahr 2050 liegen (= 1 Mio. Stück pro Einwohner in Jahr).

2.2.2.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Es gibt keinerlei Anhaltspunkte in der verfügbaren Literatur für die Abschätzung der nationalen und globalen Marktentwicklung von RFIDs zwischen 2025 und 2050. Eine lineare Extrapolation bis 2050 wäre auf der Grundlage von bestehenden Prognosen bis 2022 bei dieser Umwelttechnologie nicht sinnvoll (siehe vorherige Tabelle und Abbildung für die resultierenden hohen Stückzahlen für 2050). Aus diesem Grund wird empfohlen, die Materialzahlen für 2025 auch für das Jahr 2050 unverändert zu übernehmen.

Tabelle 2-87: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 5: „RFID“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Kupfer	20	1.350	1.350	1.350	1.350
Nickel	0,1	6,0	6,0	6,0	6,0
Silber	9,0	600	600	600	600
Silizium (Metall)	0,45	30	30	30	30

Tabelle 2-88: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 5: „RFID“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Kupfer	68	4.500	4.500	4.500	4.500
Nickel	0,3	20,0	20,0	20,0	20,0
Silber	30	2.000	2.000	2.000	2.000
Silizium (Metall)	1,5	100	100	100	100

Die Extrapolation der zukünftigen Materialbedarfe für Deutschland und den globalen Markt leitet sich aus den oben skizzierten Markttrends für RFID sowie aus den spezifischen Materialmengen eines Referenzsystems ab. Letzteres basiert auf den Angaben für ein 32 cm² großen RFID Tags (Tabelle 2-82). Der Einfluss zukünftiger technischer Innovationen (z. B. Datenverschlüsselung, Frequenzbereiche) auf die Gestalt der RFID Tags lässt sich aus heutiger Sicht nicht vorhersehen. Die Extrapolation basiert deshalb auf den spezifischen Materialmengen heutiger RFID Tags. Diese kann sich in Zukunft stark verändern. Zudem ist zu beachten, dass die zugrundeliegende Extrapolation der Marktentwicklung im Sinne eines worst-case Szenarios (Massenmarkt) zu interpretieren ist. Die tatsächliche zukünftige Marktdiffusion der RFID Technologie kann hingegen durch ökonomische Faktoren sowie begrenzte Ressourcenverfügbarkeit geringer ausfallen. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über den möglichen Materialbedarf im Falle einer unlimitierten Verbreitung von RFID im Massenmarkt.

Tabelle 2-89: Extrapolation des Materialbedarfs für 32 cm² RFID Tags in Deutschland

Material	Menge per Tag	Menge 2013 in t/a	Menge 2025 in t/a	Menge 2050 in t/a
Kupfer	0,0225 g	20,3	1350	2.250.000
Nickel	0,0001 g	0,1	6	1.000
Silber	0,010 g	9	600	1.000.000
Silizium	0,0005 g	0,45	30	50.000

2.2.2.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Der Materialbedarf für die RFID Technologie lässt sich nicht nur anhand der passiven Transponder (Tags) berechnen sondern sollte auch die aktiven Komponenten (Lesegeräte) und Dateninfrastruktur berücksichtigen. Obwohl diese im Vergleich zu den Tags eine lange Lebensdauer aufweisen ist bei einer stark zunehmenden Marktdurchdringung der RFID Technologie mit einer nennenswerten Anzahl von Lesegeräten zu rechnen. Der Materialbedarf für die RFID Tags sollte mittels Messung der Materialzusammensetzung für eine repräsentative Palette von Tags konkretisiert werden. Dazu sollten Proben von verschiedenen Herstellern und Einsatzgebieten mit berücksichtigt werden.

2.2.2.7 Quellen

Aliaga C. et al. (2011) Influence of RFID tags on recyclability of plastic packaging. Waste Management 31: 1133–1138

Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Lüllmann, A., Erdmann, L., Scharp, M., Handke, V., Marwede, M. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage

Erdmann, L., L M Hilty, H J Althaus, S Behrendt, R Hirschier, C Kamburow, B Oertel, P Wäger, T Welz (2009) Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung. Umweltbundesamt, Berlin. UBA-Texte 27/2009 ISSN 1862-4804

- IDTechEx (2014) RFID Forecasts, Players and Opportunities 2014-2024.
<http://www.idtechex.com/research/reports/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2014-2024-000368.asp>
- Schindler, R., N. Schmalbein, V. Steltenkamp, J. Cave, B. Wens, & A. Anhalt. (2012). "Smart Trash: Study on RFID Tags and the Recycling Industry." Cambridge, UK: RAND Corp.
- Urban, Arnd I. und Hal, Gerhard (2009) Mit RFID zur innovativen Kreislaufwirtschaft. Universität Kassel.
- Oertel, B., Wölk, M., Hilty, L.M. Köhler, A.R. et al. (2004) Security Aspects and Prospective Applications of RFID Systems.
Herausgeber. BSI – Federal Office for Information Security

2.2.3 UT Nr. 8: „Aerogele“

2.2.3.1 Technologiebeschreibung

Aerogele sind hochporöse, transluzente Festkörper, deren größter Volumenanteil (zu rund 95 %) aus Poren besteht. Aerogele können auf Silikat-, Kohlen- und Kunststoffbasis erzeugt werden. Aerogele werden u. a. als Isolator eingesetzt, z. B. in der transparenten Wärmedämmung. Da der Durchmesser der Poren von Aerogelen nur wenige Nanometer (typischerweise 20 nm) beträgt, wird in dem Dämmmaterial die Luftzirkulation und damit die Weiterleitung von Wärme und Schall weitgehend unterbunden. Trotz seiner geringen Dichte verfügt das Material zudem über eine hohe Härte. Ein weiteres Einsatzgebiet ist ihre Nutzung als Isolator in Supercaps (IZT 2009; Öko-Institut 2013).

Aerogele ermöglichen eine effektive Wärmedämmung auch in schwer zugänglichen Bereichen (z. B. in Altbauten) sowie 25-50 % geringere Dämmstoffdicken EPS-Dämmstoffplatten (Referenztechnologie) und bieten dadurch erheblichen Einsparpotentiale in Hinblick auf Energie und CO₂-Emissionen während der Gebrauchsphase von Immobilien.

In Hinblick auf die ökonomische Relevanz hat die Energieeffizienz bei Gebäuden mit 19 % bereits derzeit einen erheblichen Anteil am Leitmarkt „Energieeffizienz“, das Wachstum bis 2025 beträgt 6,4 % p.a. und ist damit höher als bei anderen Subsektoren. Der Anteil Deutschlands am Weltmarkt beträgt in diesem Segment derzeit 21 % und wird bis 2025 voraussichtlich auf 17 % sinken; allerdings sind deutsche Unternehmen (z. B. BASF) sehr aktiv im Bereich der Entwicklung und Vermarktung nanoporöser Dämmstoffmaterialien. (BMUB 2014)

2.2.3.2 Spezifische Einheit

Da es sich bei Aerogelen um Wärmedämmstoffe handelt, die proportional zum eingesetzten Volumen ihre Wirkung entfalten, wird als spezifische Einheit 1 Kubikmeter (1m³) festgelegt.

2.2.3.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Aerogele für die Wärmedämmung werden typischerweise auf Silikatbasis hergestellt, weitere metallische beziehungsweise im Rahmen dieser Studie als relevant eingeschätzte Rohstoffe kommen nicht zum Einsatz. Aus diesem Grund enthält die folgende Tabelle keine Einträge für die spezifischen Materialbedarfe, sowohl für den Status quo (2013), als auch für die beiden Zukunftsszenarien (2025 und 2050).

2.2.3.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Im Rahmen der Ermittlung der Materialbedarfe konnten keine Bedarfe für die untersuchten kritischen Rohstoffe ermittelt werden. Daher wird aus Relevanzgründen auf eine Beschreibung der nationalen und globalen Marktentwicklung verzichtet.

2.2.3.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Da auf der Ebene der spezifischen Materialbedarfe keine für die im Sinne der Studie relevante Rohstoffe ermittelt werden konnten, ergeben sich folglich auch keine nennenswerten zukünftigen nationalen und globalen Materialbedarfe nach dem BAU- und Green-Economy-Szenario.

2.2.3.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Nicht erforderlich.

2.2.3.7 Quellen

- BMUB 2014 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Büchele R. et al., Roland Berger Strategy Consultants, Berlin, Juli 2014.
- ISI und IZT 2009: Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Stuttgart 2009.
- Öko-Institut 2013 Möller, M.; Hermann, A.; Groß, R. et al.; Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Zürich, vdf Hochschulverlag, 2013
- RESTRA 2014: ISI 2014: Ermittlung von Substitutionspotentialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien, UFO-Plan 371193339

2.2.4 UT Nr. 12: „Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle“

2.2.4.1 Technologiebeschreibung

Korrosion metallischer Bauteile ist einer der wichtigsten Ursachen für Verluste an wertvollen Materialien aus der Technosphäre. Traditionelle Methoden zum Korrosionsschutz basieren oft auf der Verwendung schwermetallhaltiger Oberflächenbeschichtungen. Die klassische Feuerverzinkung basiert auf der Beschichtung von Stahl mit einer relativ dicken Zinkschicht. Der Korrosionsschutz ergibt sich aus der elektrochemischen Reaktion des unedlen Zink mit dem Korrosion-auslösenden Elektrolyten während das Eisen geschützt ist solange eine Reserve an Zink vorhanden ist. Gelöstes Zink entweicht in die Umwelt. Das gleiche Prinzip liegt auch der Verwendung schwermetallhaltiger Lacke und Anstriche zu Grunde, diese enthalten Blei, Chrom oder Kadmium in unterschiedlichen Anteilen. Für Korrosionsschutz von Blechdosen mit Kontakt zu Lebensmitteln wurde oft Weißblech verwendet, welches eine Zinn-Beschichtung aufweist, die chemisch relativ beständig und ungiftig ist.

Die Verwendung von schwermetallhaltiger Oberflächenbeschichtungen birgt nicht nur Gefahren für Umwelt und Gesundheit sondern stellt auch ein Ressourcenproblem dar, weil diese Beschichtungen sich mit der Zeit auflösen und ersetzt werden müssen. Diese Metalle gehen aus dem Wertstoffkreislauf verloren. Nanotechnologie ist eine Möglichkeit für die Herstellung schwermetallfreier Korrosionsschutzbeschichtungen für Metalle. Diese Nanobeschichtungen sind zum einen wesentlich dünner als traditionelle Oberflächenbeschichtungen, sie verbrauchen daher weniger Material. Außerdem enthalten sie keine Schwermetalle und sind daher in dieser Hinsicht unbedenklich für Mensch und Umwelt. Des Weiteren sind Nanobeschichtungen wesentlich langlebiger oder sogar selbstheilend. Längere Haltbarkeit geht einher mit verbesserter Korrosionsschutzwirkung.

Nanobeschichtungen mit Schichtdicken bis ca. 300 nm für den Korrosionsschutz werden üblicherweise aus anorganisch-organische Hybridpolymeren erzeugt (Siebenlist, 2001). Diese lassen sich mit Hilfe von Sol-Gel-Verfahren durch Hydrolyse und Polykondensation von Alkoxiden herstellen. Dabei handelt es sich um in-situ-Reaktionen von Siliziumverbindungen (Silane) in wässrigen Lösungen. Daraus entsteht eine Sole, die mit Hilfe von organischen Komponenten sowie Katalysatoren (Säuren oder

Basen) in ein Gel umgesetzt wird. Dieses kann durch Tauchen oder Sprühen auf Oberflächen aufgebracht werden. Anschließend erfolgt eine Aushärtung durch Zugabe von Sinteradditiven (z. B. Triethylborat (TEB)) und Hitzezufuhr wodurch das Gel zu einer sehr dünnen Schicht aushärtet. Alkalische Sole haben laut Fürbeth (2012) einen Oxidgehalt von 22 g l⁻¹. Der Anteil an organischen Komponenten beeinflusst die Härte der Schicht und kann in weitem Umfang eingestellt werden.

Andere nano-basierte Verfahren des schwermetallfreien Korrosionsschutzes beruhen auf der Einbringung von polymerischen Nano-Kapseln in die Beschichtung. Die ca. 300 nm großen Polymer-Kapseln wirken als Wirkstoff-Depot und können bei Rissen oder Kratzern einen Selbstheilungseffekt auslösen. Die Wände dieser Kapseln bestehen aus Kunststoff und das Innere kann mit Wirkstoffen (z. B. Inhibitoren) gefüllt sein. Die Nano-Kapseln haben typischerweise einen 10-20 % Anteil im Beschichtungsmaterial. Die Nano-Kapseln lassen sich im galvanischen Bad zusammen mit metallischen Überzügen elektrochemisch auf metallischen Bauteilen abscheiden.

Weitere Forschungen zum Korrosionsschutz auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder Graphen werden in der Literatur berichtet, aber es ist nicht bekannt ob diese in Zukunft in der Praxis zur Anwendung kommen werden.

Polymer-basierte Nano-Kapseln bestehen aus Kunststoffen, die chemisch mit Hilfe von in-situ Prozessen erzeugt werden. Diese enthalten keine Metalle.

Anorganisch-organische Hybridpolymere bestehen aus Siliziumverbindungen mit organischen Molekülgruppen. Abgesehen von amorphem Silizium sind im Gel zunächst keine Metalle enthalten. Je nach Anwendungszweck werden weitere anorganische Nanomaterialien wie Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid zugefügt. (Fürbeth, 2012)

Tabelle 2-90 und Tabelle 2-91 veranschaulichen die verschiedenen Rezepturen sowie die Anteile der Metalle im Gel. Das Si/Al/Zr-Gel enthält ca. 5 % Zirkoniumoxid (Fürbeth, 2012).

Aus diesen Angaben lässt sich der Zirkoniumgehalt einer solchen Beschichtung überschlagsmäßig ableiten:

Anteile im festen Gel:

- Zirkoniumoxid 5 %; Dichte ZrO₂ (monoklin) 5,7 g·cm⁻³
- Aluminiumoxid 95 %; Dichte Al₂O₃: 3,94 g·cm⁻³

Das entstehende Misch-Gel hat dem entsprechend eine Dichte von etwa 4 g·cm⁻³

Bei einer Schichtdicke von 300 Nanometern (0,3 Mikrometer) ergibt sich eine Masse des Al/Zr-Gels von ca. 1,2 g. Bei einem Zirkoniumoxidgehalt von 5 % ergibt sich pro Quadratmeter eine Masse an ZrO₂ von 0,06 g. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Atommassen (Zr = 91224u; 2*O= 32000u) errechnet sich der Gehalt an Zirkonium mit 0,044 g / m².

Tabelle 2-90: Zusammensetzung eines Sol-Gels mit Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid Nanomaterialien

System	Zusammensetzung (Mol-% Oxide)	Vorstufen
Si/Zr/Al (+ B)	91,3:7,7:1	Sol-Komponenten: Al-Sol III, (B: B(OEt) ₃) <i>Dispersionen: SiO₂ (W340), ZrO₂ (Nyacol)</i>
Si/Zr/Al	70:5:25	Sol-Komponenten: Si: TEOS, MTEOS; Zr: ZNP + (DEA) <i>Dispersion: Al₂O₃ (23% in EtOH)</i>
Si/Si/Zr/Al/Li	77,5:14:1,5:7	Sol-Komponenten: Si: TEOS, MTEOS; Zr: ZNP; Li: Li(OEt) (10 % in EtOH) <i>Dispersionen: Al₂O₃: (23% in EtOH); SiO₂ (15% in EtOH); SiO₂: Pulver MP2 (1,1 Gew.-%)</i>

Quelle: (Fürbeth, 2012)

Tabelle 2-91: Zusammensetzung eines Sol-Gels mit Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid Nanomaterialien (verwendetes Edukt)

Sol-Komponente	Verwendetes Edukt	Abkürzung	Lieferant
Si	Tetraethoxysilan	TEOS / Si(OEt) ₄	ABCR
Si	Triethoxysilan	TREOS / HSi(OEt) ₃	
Si	Methyltriethoxysilan	MTEOS / H ₃ CSi(OEt) ₃	ABCR
Si	Triethoxyfluorosilan	TREFS / FSi(OEt) ₃	
B	Triethylborat	TEB / B(OEt) ₃	Fluka
B	Tributylborat	TBB / B(OBut) ₃	
P	Triethylphosphat	TEP / P(OEt) ₃	Merck
Al	Aluminiumtriethylat		ABCR
Li	Lithiumethylat (10 % in Ethanol)	LiOEt	Fluka
Zr	Zirkonium(IV)-propoxid (70% in Propanol)	ZNP	Merck Sigma Aldrich
Co	Co(NO ₃) ₂ *6 H ₂ O		Merck
Ca	Ca(NO ₃) ₂ *4 H ₂ O		Fluka
Mg	Mg(NO ₃) ₂ *6 H ₂ O		Merck
Lösemittel	Ethanol	EtOH	
Katalysator	Salpetersäure	HNO ₃	
Katalysator	Salzsäure	HCl	
Katalysator	Ammoniumhydroxid	NH ₄ OH	

Quelle: (Fürbeth, 2012)

2.2.4.2 Spezifische Einheit

Im Rahmen dieser Analyse wird der Materialeinsatz für 1 m² behandelte Oberfläche mit Korrosionsschutz für 10 Jahre betrachtet.

Dünnschichten aus anorganisch-organische Hybridpolymeren ersetzen dickschichtige schwermetallhaltige Lackierungen und weisen sehr gute korrosionsschützenden Eigenschaften auf. Substitutionseffekte sind außerhalb des Betrachtungsrahmens.

2.2.4.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Tabelle 2-92: Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU)

Material	Menge per m ²	Menge 2013 in t/a	Menge 2025 in t/a	Menge 2050 in t/a
Zirkonium	0,044 g	Keine Daten	Keine Daten	Keine Daten

2.2.4.4 Nationale und globale Marktentwicklung

In der Fachliteratur sind keine relevanten / sinnvollen Daten zur Marktentwicklung dieser Technologie auffindbar. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (2015) gibt die Gesamtfläche der Korrosionsschutzbeschichteten Stahlfläche an Stahl- und Stahlverbundbrücken in Deutschland mit über 15 Mio. Quadratmetern an. Dieser Bedarfswert wird als Basis für eine Abschätzung des Bedarfs für schwermetallfreien Korrosionsschutz zugrunde gelegt. Es wird angenommen, dass im Basisszenario 10 % der Fläche mit der neuen Technologie behandelt werden. Unter Einbezug einer erwünschten Standzeit der Korrosionsschutzbeschichtung von 25 Jahren wird für Deutschland ein jährlicher Bedarf von 60.000 m² ermittelt. Der globale Bedarf für schwermetallfreie Korrosionsschutzbeschichtung wird anhand des deutschen Weltmarktanteils von 13,15 % hochgerechnet. Die Prognose (BMUB 2014) zum Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz sieht eine Steigerung um den Faktor 2,55 bis 2025 vor. Daraus wird ein kontinuierlicher Wachstumstrend bis 2050 antizipiert. Im Green Economy Szenario basiert die Marktprognose auf der Annahme, dass der schwermetallfreie Korrosionsschutz nicht nur an der Verkehrsinfrastruktur eingesetzt wird, sondern auch in anderen Wirtschaftsbereichen (Energiesektor, Fahrzeugbau, Schifffahrt etc.). Daraus wird eine vorsichtige Annahme abgeleitet, dass der gesamte Marktumfang das Zehnfache der heutigen Korrosionsschutzfläche im Verkehrsbau betragen könnte. Die Extrapolation der zukünftigen Marktentwicklung im Green Economy Szenario lehnt sich an das zuvor beschriebene Verfahren an. Es bleibt jedoch anzumerken, dass die beschriebenen Szenarien hypothetischer Natur sind und nur im Sinne einer groben Hochrechnung zu betrachten sind.

2.2.4.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Tabelle 2-93: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 12: „Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Zirkonium	0,003	0,007	0,017	0,673	1,72

Tabelle 2-94: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 12: „Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Zirkonium	0,020	0,053	0,137	5,25	13,7

2.2.4.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die stoffliche Zusammensetzung der Korrosionsschutztechnologie unterliegt anhaltender wissenschaftlich-technischer Innovation und kann sich daher in Zukunft deutlich ändern. Die oben beschriebene Technologie hat das Potential für weitere Anwendungsgebiete. Daher sollte eine vertiefende Analyse der zukünftigen Marktentwicklung speziell auf die möglichen Einsatzgebiete zugeschnitten werden. Für globale Prognosen des Rohstoffbedarfs sollte nicht nur der Materialgehalt je spezifischer Einheit sondern auch Produktions- und Verarbeitungsverluste beim Aufbringen der Korrosionsschutzschichten berücksichtigt werden.

2.2.4.7 Quellen

- Bundesanstalt für Straßenwesen (2015) <http://www.bast.de/DE/FB-B/Fachthemen/b2-korrosionsschutz/b2-korrosionsschutz.html>
- BMUB 2014 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
- Fürbeth, W. (2012) Neue Ansätze zum Korrosionsschutz für Metalle durch nanopartikuläre Schichtsysteme und nanoskalige Polymerfilme, Habilitationsschrift, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
- Neuner, M. (2010) Winziger Schutz von Oberflächen, KONSTRUKTION & ENGINEERING
- Siebenlist, J. (2001) Präziser Oberflächenschutz gelingt der Nanotechnik auch ohne Chrom. Ingenieur.de

2.2.5 UT Nr. 13 b: „Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode“

2.2.5.1 Technologiebeschreibung

Die Chlor-Alkali-Elektrolyse stellt einen zentral wichtigen Prozess in der Grundstoffchemie dar. Sie wird zur Produktion der wichtigen Basischemikalien Chlor und Natronlauge benötigt und verursacht in Deutschland jährlich einen Energieverbrauch von 14,5 MWh/a. Die Prozessführung kann in Hinblick auf ihre Energieeffizienz gesteigert werden, wenn die derzeit üblichen Elektrolyseverfahren (Membran-, Diaphragma- und Amalgamverfahren) durch eine Elektrolyse mit einer Sauerstoffverzehrkatode ersetzt werden. Bei dieser Art von Elektrode bringen die in porösen Strukturen elektrisch angeordneten Katalysatoren Gase in der Dreiphasengrenze flüssig-fest-gasförmig zur Reaktion, wodurch eine Senkung der Elektrolysespannung von 2,3V auf 2V erreicht werden kann. Durch die Zufuhr von Sauerstoff lässt sich zudem die Wasserstoffbildung unterdrücken und es entstehen nur Chlor und Natronlauge als Produkte. (Bayer 2015, Cleaner Production Germany 2015)

Durch die Senkung der Zellspannung können im Falle der Substitution des Membranverfahrens 30 % Energie eingespart werden; bis zu 50 % Energieeinsparung können erzielt werden, wenn die Sauerstoffverzehrkatode (SVK) statt des Amalgamverfahrens verwendet wird. Diesen relativen Einsparpotentialen während der Gebrauchsphase wird eine hohe Relevanz beigemessen, da aufgrund des hohen Energiebedarfs der Chlor-Alkali-Elektrolyse zudem erhebliche absolute Entlastungsmöglichkeiten bestehen. So können in Deutschland jährlich bis zu 10,5 Mio. MWh Primärenergie bzw. 2,6 Mio. t CO₂ eingespart werden. (Bayer 2015, Cleaner Production Germany 2015)

Bezüglich der Marktrelevanz ist zu berücksichtigen, dass die Energieeffizienz in der Grundstoffchemie derzeit zwar nur einen relativ geringen Beitrag zum Leitmarkt „Energieeffizienz“ liefert; dieser wird aber bis 2025 voraussichtlich mit 5,9 % Wachstum p.a. im Vergleich zu den anderen Subsektoren überproportional wachsen. In diesem Kontext wurde die ökonomische Bedeutung der Sauerstoffverzehrkathode als sehr hoch eingeschätzt. Der Anteil Deutschlands am Weltmarkt für elektrische Anträge ist mit 11 % bereits heute erheblich und wird voraussichtlich überproportional auf 16 % steigen. Eine Vermarktung der Sauerstoffverzehrkathode wird von Bayer und Thyssen-Uhde geplant; Bayer will seine Chlorproduktion schrittweise umrüsten, ebenso Firmen in der Region Asien/Pazifik. Da sich zudem auch die Patentrechte in Deutschland befinden, wurde die ökonomische Bedeutung für Deutschland ebenfalls als sehr hoch eingestuft. (Chemie.de 2011, BMUB 2014)

2.2.5.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird 1 Tonne Chlorgas definiert, da dieses bei gegenwärtiger Marktlage das primär gewünschte Produkt der Chlor-Alkali-Elektrolyse darstellt. Die in dem folgenden Kapitel quantifizierten Materialbedarfe werden folglich in erster Linie durch die Nachfrage nach Chlorgas induziert. Angesichts der Tatsache, dass bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse als weiteres Produkt Natronlauge (als Kuppelprodukt) anfällt, müsste aus ökobilanzieller Sicht eine Allokation der ermittelten Materialbedarfe auf Chlor und Natronlauge vorgenommen werden. Da bei der vorliegenden Studie die Relevanzabschätzung der Umwelttechnologie „Sauerstoffverzehrkathode“ in Hinblick auf ihre Rohstoffkritikalität im Vordergrund steht, wurde auf eine solche Allokation im Sinne einer konservativen Annahme allerdings verzichtet.

2.2.5.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Für die Ermittlung der Materialbedarfe wurden die Angaben Bulan (2015) herangezogen. Demnach besteht eine SVK in erster Linie aus Silber und Nickel: Der Silbergehalt der Elektrode liegt bei ca. 70 % und der Nickelgehalt beträgt ca. 25 %; die Polymerkomponente (v.a. PTFE) hat einen Anteil von nur ca. 5 % und wird angesichts der abgefragten Materialien vernachlässigt. In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Materialbedarfe in Hinblick auf Silber und Nickel je 1 Tonne Chlorgas zusammengefasst:

Tabelle 2-95: Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (1 Tonne Chlorgas) – Eigene Annahmen

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Nickel	13	13	13
Silber	37	37	37

2.2.5.4 Nationale und globale Marktentwicklung

In Hinblick auf die nationale und globale Marktentwicklung wird auf Daten von Bulan et al. (2013) zurückgegriffen. Daraus geht hervor, dass die Weltkapazität der Chlor-Alkali-Elektrolysen im Jahre 2012 75 Mio. t Chlorgas betrug, wobei in den zurückliegenden 20 Jahren eine Steigerung von 60 % verzeichnet werden konnte. Für Deutschland wird die Produktionskapazität auf 5,5 Mio. t beziffert. Bulan et al. (2013) gehen davon aus, dass der weltweite Bedarf „voraussichtlich weiter steigen“ wird, ohne jedoch eine Quantifizierung dieses angenommenen Wachstums vorzunehmen. Da auch in anderen öffentlichen Quellen keine Prognosen für 2025 und 2050 gefunden werden konnten, wird im Rahmen eines konservativen Ansatzes sowohl für die nationale als auch für die globale Marktentwicklung von einer weiteren Steigerung in Höhe von 100 % bis zum Jahre 2050 ausgegangen; dies entspricht in erster Näherung einer linearen Fortschreibung des Wachstums der zurückliegenden 20 Jahre.

2.2.5.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

In Hinblick auf den Anteil der SVK an der zuvor geschilderten Marktentwicklung ist allerdings zu beachten, dass diese Technologie nur für diejenigen Anlagen in Frage kommt, die nach dem Membranverfahren betrieben werden. Gegenwärtig hat dieses Verfahren einen Anteil von 55 % am deutschen Produktionsvolumen; in erster Näherung wird dies auch für den weltweiten Maßstab angenommen. Im Rahmen des BAU-Szenarios besteht nun die (konservative) Annahme darin, dass bis 2050 alle Anlagen mit Membrantechnologie auf ein Verfahren mit SVK umgestellt werden.

Beim Green-Economy-Szenario wird zusätzlich davon ausgegangen, dass das derzeit noch betriebene Amalgam-Verfahren (17 % Anteil am gesamten Produktionsvolumen) bis 2050 ebenfalls vollständig auf ein Membranverfahren mit SVK umgestellt wird (Bulan et al. 2013).

Für 2025 wird sowohl bei dem BAU- als auch bei dem Green-Economy-Szenario von einer linearen Interpolation der Entwicklung zwischen 2013 und 2025 ausgegangen, d. h. es werden die Steigerungen der Materialbedarfe zwischen 2013 und 2050 mit einem entsprechenden Faktor (12 bzw. 37) versehen.

Für den Status quo wird in Übereinstimmung mit Bulan(et al 2013) angenommen, dass das Produktionsvolumen lediglich 20.000 t beträgt. Dies entspricht der Kapazität der einzigen derzeit verfügbaren Testanlage.

Im Folgenden werden nun die Materialbedarfe für die nationalen und globalen Szenarien zusammengefasst:

Tabelle 2-96: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 13b: „Sauerstoffverzehrkatode“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Nickel	0,26	25,5	78,7	33,4	103
Silber	0,74	72,6	224	95,04	293

Tabelle 2-97: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 13b: „Sauerstoffverzehrkatode“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Nickel	0,26	348	1.073	455	1.404
Silber	0,74	990	3.053	1.296	3.996

Bei diesen Materialbedarfen ist unbedingt zu beachten, dass sowohl Silber als auch Nickel während des Betriebs der SVK nicht verbraucht werden, sondern nach Ablauf der Standzeit der SVK (> 4a) abzüglich der Recyclingverluste zurückgewonnen werden können (Bulan 2015).

2.2.5.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Im Rahmen einer Verfeinerung der Ergebnisse wird eine Berücksichtigung der in Kapitel 2.2.5.2 skizzierten Allokation der Materialbedarfe auf die beiden Kuppelprodukte der Chlor-Alkali-Elektrolyse (Chlorgas und Natronlauge) empfohlen. Weiterhin wäre auch zu prüfen, ob vor dem Hintergrund der tatsächlichen Innovationszyklen für das Szenario 2025 tatsächlich angenommen werden kann, dass bereits rund ein Drittel (12/37) aller auf Membrantechnologie basierenden Anlagen (und beim Green-Economy-Szenario zusätzlich rund ein Drittel aller mit dem Amalgamverfahren betriebenen Anlagen) auf eine Elektrolysezelle mit SVK umgestellt sein wird.

2.2.5.7 Quellen

- Bayer 2015 Effiziente Elektrolyse - Energie sparen in der Chlorproduktion, online verfügbar unter: <http://www.research.bayer.de/de/sauerstoffverzehrkatode.aspx>
- Bulan et al. 2013 Bulan, A.; Jung, J.; Jörissen, J.; Turek, Th.; Qualifizierung der NaCl-SVK Technologie zur Chlorherstellung für den betrieblichen Einsatz, Abschlussbericht, Leberkusen, 2013
- Bulan 2015 Bulan, A.; Schriftliche Mitteilung vom 14.08.2015
- Chemie.de 2015 Inbetriebnahme erster großtechnischer Anlage zur klimaschonenden Chlorproduktion, online verfügbar unter: <http://www.chemie.de/news/133888/inbetriebnahme-erster-grosstechnischer-anlage-zur-klimaschonenden-chlorproduktion.html>
- Cleaner Production Germany 2015 CO₂-Reduktion durch den Einsatz von SVK-Elektroden für die Chlor-Alkali-Elektrolyse, online verfügbar unter: [http://www.cleaner-production.de/projekte-publikationen/projekte/chemie/co2-reduktion-durch-den-einsatz-von-svk-elektroden-fuer-die-chlor-alkalielektrolyse.html?tx_exozetcpgproject_projects\[page\]=3&cHash=29e9ae23c97b440a95ff0760c5e6eafa](http://www.cleaner-production.de/projekte-publikationen/projekte/chemie/co2-reduktion-durch-den-einsatz-von-svk-elektroden-fuer-die-chlor-alkalielektrolyse.html?tx_exozetcpgproject_projects[page]=3&cHash=29e9ae23c97b440a95ff0760c5e6eafa)

2.2.6 UT Nr. 16: „Celitement“

2.2.6.1 Technologiebeschreibung

Celitement® ist ein neues Verfahren der Zementherstellung, das am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt wurde und den Energieverbrauch halbieren soll. Außerdem kommt Celitement® mit weniger Rohstoffen aus: Der Bedarf an Kalkstein sinkt um ein Drittel, die Beimengung von Gips als Zumahlstoff ist überflüssig. Celitement ist ein hydraulisches Bindemittel aus Kalk und Silikaten, welches zu Beton oder anderen Baustoffen verarbeitet werden kann. Die Herstellung ist jedoch wesentlich energieeffizienter als bei vergleichbaren Baustoffen und erzeugt nur ca. 50 % vergleichbare CO₂-Emissionen (KIT o.J.).

Das hier vorliegende Verfahren der Zementherstellung wurde ausgewählt, da es durch den Einsatz dieses Baustoffs zu erheblichen Energieeinsparungen bzw. reduzierten CO₂-Emissionen kommen kann. Die relative Einsparung in der Herstellungsphase wird im Vergleich zur klassischen Zementherstellung als Referenztechnologie auf 50 % eingeschätzt. Da Zementwerke für fünf bis sieben % des weltweiten CO₂-Ausstoßes verantwortlich sind, wird zusätzlich zu dem hohen relativen auch von einem erheblichen absoluten Einsparpotential ausgegangen. (BMUB 2012)

Zusätzlich zur sehr hohen Umweltrelevanz des neuen Verfahrens wird auch in Hinblick auf die Marktdynamik eine hohe Relevanz erwartet. So hat die Energieeffizienz bei Gebäuden mit 19 % bereits gegenwärtig einen erheblichen Anteil am Leitmarkt „Energieeffizienz“, das Wachstum bis 2025 wird auf 6,4 % p.a. geschätzt und ist damit höher als bei anderen Subsektoren. Der Anteil Deutschlands am Weltmarkt bei der Energieeffizienz bei Gebäuden beträgt derzeit 21 % und wird bis 2025 voraussichtlich auf 17 % sinken; aufgrund der Verfahrensentwicklung in Deutschland besteht jedoch spezifisch ein hohes Potential für die deutsche Wirtschaft. (BMUB 2014)

2.2.6.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird 1 Tonne Celitement-Zementklinker definiert, da die in der Literatur genannten Materialbedarfe zu seiner Herstellung diese Einheit als Bezugsgröße verwenden.

2.2.6.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Für die Ermittlung der Materialbedarfe wurden die Angaben von Hipp (2010) herangezogen. Demnach wird für die Herstellung von einer Tonne Celitement 380 kg Kalk, 690 kg Sand und 100 kg Wasser benötigt; die Verarbeitungstemperatur beträgt ca. 200 °C statt 1450 °C bei klassischem Zement. Daher wird keine Tabelle für die spezifischen Materialbedarfe ausgewiesen, weder für den Status quo (2013), noch für die beiden Zukunftsszenarien (2025 und 2050).

2.2.6.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Im Rahmen der Ermittlung der Materialbedarfe konnten keine Bedarfe für die kritischen Rohstoffe im Fokus dieser Studie ermittelt werden. Daher wird aus Relevanzgründen auf eine Beschreibung der nationalen und globalen Marktentwicklung verzichtet.

2.2.6.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Da auf der Ebene der spezifischen Materialbedarfe keine für die im Sinne der Studie relevante Rohstoffe ermittelt werden konnten, ergeben sich folglich auch keine nennenswerten zukünftigen nationalen und globalen Materialbedarfe nach dem BAU- und Green-Economy-Szenario.

2.2.6.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Nicht erforderlich.

2.2.6.7 Quellen

BMUB 2012	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 3.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
BMUB 2014	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 4.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Büchele R. et al., Roland Berger Strategy Consultants, Berlin, Juli 2014.
Hipp 2010	Hipp, Dietmar; Kurzer Prozess; Der Spiegel 31/2010, S. 128
KIT o.J.:	Bindendes Versprechen an die Umwelt, http://www.pkm.kit.edu/kit_experten_1161.php

2.2.7 UT Nr. 24: „Rechenzentren“

2.2.7.1 Technologiebeschreibung

Seit Einführung von Großrechnern Anfang der 60er Jahre, wird auch der Begriff Rechenzentrum verwendet. Als Rechenzentrum bezeichnet man Räumlichkeiten, in denen die zentrale Rechentechnik eines Unternehmens inklusive Infrastruktur untergebracht wird sowie die Organisation, die sich um die Rechentechnik kümmert. Das Rechenzentrum vermittelt eine Dienstleistung, die der eigenen oder fremden Firmen ihre Rechenleistung zur Verfügung stellt. Um die Rechen- und Serviceleistungen zentralisiert anbieten zu können, muss ein Rechenzentrum daher über leistungsfähige Computer- und Softwaresysteme verfügen. Klassischer Aufgabenbereich ist die datentechnische Aufarbeitung, Verarbeitung und Speicherung von Anwenderdaten. Neben diesem klassischen Aufgabenbereich spielen heutzutage Aspekte wie Verfügbarkeit, Sicherheit und Effizienz eine wichtige Rolle für den Betrieb von Rechenzentren.

Nach Angaben des Gabler-Wirtschaftslexikons (Gabler 2012) können drei verschiedenen Arten von Rechenzentren unterschieden werden:

- Unternehmenseigene Rechenzentren: ein Unternehmen besitzt ein oder mehrere Rechenzentren
- Gemeinschaftsrechenzentrum: ein von mehreren Unternehmen gemeinsam errichtetes, betriebenes und genutztes Rechenzentrum. Im Falle von Outsourcing kann ein Gemeinschaftsrechenzentrum auch rechtlich selbstständig sein.
- Servicerechenzentren: ein selbstständiges Unternehmen, das seine Leistungen anderen Unternehmen anbietet. Die Datenübertragung an das Rechenzentrum erfolgt in der Regel über Datenübertragungswege oder über Anlieferung auf Datenträgern.

Laut IZE (2008) und RAL-UZ 161 (2012) besitzt ein Rechenzentrum die Fähigkeit, Daten sicher, in großen Mengen, dauerhaft über einen langen Zeitraum und zentral zu verarbeiten. Dabei muss das

Rechenzentrum diese Fähigkeiten auch dann besitzen, wenn einzelne Eigenschaften nicht genutzt werden, z. B. der Betrieb über einen langen Zeitraum. Folgend werden die notwendigen Fähigkeiten konkretisiert:

1. Die Verarbeitung von Daten erschließt sich z. B. aus der Erfassung, Übertragung, Berechnung oder Speicherung.
2. Eine sichere Art und Weise der Datenverarbeitung wird versorgungstechnisch mit der „Mindestsicherheit“ zum „kontrollierten, von Datenverlust freien Herunterfahrens der Rechner im Schadensfall der Versorgungseinheiten“ beschrieben.

Die großen Mengen an verarbeiteten Daten beziehen sich relativ zu den technischen Möglichkeiten des Stands der Technik und stellen somit über die Zeit eine dynamische Größe dar.

2.2.7.2 Spezifische Einheit

Als Definition der spezifischen Einheit wird nach Borderstep (2010) die Referenz-Server-Einheit (ASU; Average Server Unit) definiert. Die folgende Abbildung zeigt die einzelnen ASUs, wie sie in Borderstep (2010) definiert wurden.

Tabelle 2-98: Referenz-Server-Einheiten (ASU), nach Borderstep 2010

Referenzprodukte	ASU	ASU-Spezifikation	Gewicht (g)	Bestand 2008
Tower (Stand-Alone)	ASU 1a	1xUnit/Chassis	10.000	900.000
Tower (Rechenzentrum)	ASU 1b	1xUnit/Chassis	10.000	190.000
Blades	ASU 2	1xBlades/Chassis	15.000	240.000
Rack	ASU 3	1x2 Rack Units/Chassis	20.000	640.000
Unix	ASU 4	2x2 Rack Units/Chassis	40.000	210.000
Mainframe	ASU 5	10x2 Rack Units/Chassis	160.000	4.000
2,5" Netzwerkspeicher (NS)	ASU 6	12 Festplatten/Chassis	10.000	50.000
3,5" Netzwerkspeicher (NS)	ASU 7	12xFestplatten/Chassis	15.000	480.000

Borderstep (2010) beschreibt die definierten ASUs wie folgt:

- Die ASU 1 ist ein mittelgroßer Tower-Server bestückt mit einem Prozessor.
- Die ASU 2 ist ein mittelgroßes Server-Blade bestückt mit zwei Prozessoren.
- Die ASU 3 ist ein 2 Rack Unit (2U, vgl. Glossar) Server bestückt mit vier Prozessoren.
- Die ASU 4 (Unix) und 5 (Mainframes) werden über die ASU 3 (2U Rack Server) skaliert.
- Die ASU 4 ist ein 2 x 2U Rack Server bestückt mit 8 Prozessoren.
- Die ASU 5 ist ein 10 x 2U Rack Server bestückt mit 20 Prozessoren.
- Die ASU 6 ist ein separater Netzwerkspeicher mit insgesamt 12 x 2,5" Festplatten einschließlich aller Referenz-Module-Einheiten (Average Module Unit, AMU⁶).
- Die ASU 7 ist ein separater Netzwerkspeicher mit insgesamt 12 x 3,5" Festplatten einschließlich aller Referenz-Module-Einheiten (AMU).

6 Mit den Referenz-Modul-Einheiten (AMU) werden die Basiseinheiten für die Ausstattungskonfiguration der betreffenden Referenz-Server-Einheiten beschrieben. Die gewählten AMUs sind Printed Circuit Board (PCB), Power Supply Units (PSU), Cooling, Chassis, Hard-Disk Drive (HDD) und Cable (Borderstep 2010).

Die genauen Spezifikationen der ASUs sind in Borderstep (2010) aufgeführt.

2.2.7.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Die Grundlage für die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung der definierten spezifischen Einheit bildet die Studie Borderstep (2010) sowie Sander et al. (2012). In Borderstep (2010) wurde ein vereinfachtes Mengengerüst der verbauten Materialien für die Rechenzentren in Deutschland (Referenzjahr 2008; Prognose 2015) erstellt. Aus den prognostizierten Materialmengen für Rechenzentren in Deutschland in 2015 wurden Metallgehalte pro ASU ermittelt (für die Annahmen siehe Tabelle 2-101, Tabelle 2-102, Tabelle 2-104), in dem die Gesamtmaterialmenge durch die Anzahl der spezifischen Server-Einheiten dividiert wurden. Die Konzentration von Gallium, Neodym und Tantal wird aus Sander et al. (2012) herangezogen (auf der Grundlage des Metallgehalts eines Desktop-PCs).

Tabelle 2-99: Entwicklung der globalen Serverzahlen (2008 – 2050) (Basis Szenario)

	2013	2025	2050
Anzahl physischer Server	36,55 Mio.	52,27 Mio.	74,74 Mio.
Quelle	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	Deutschland hat einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt (nach IZE 2008); Hochrechnung auf globaler Ebene	Deutschland hat einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt (nach IZE 2008); Hochrechnung auf globaler Ebene	Deutschland hat einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt (nach IZE 2008); Hochrechnung auf globaler Ebene
Anzahl Netzwerkspeicher	2,5“ – 11,2 Mio. 3,5“ – 11,2 Mio.	2,5“ – 16,02 Mio. 3,5“ – 16,02 Mio.	2,5“ – 22,90 Mio. 3,5“ – 22,90 Mio.
Quelle	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	Angelehnt an die Annahme bezüglich des Servermarktes (Marktanteil Deutschland 5 % am globalen Markt)	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2015	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2025

Tabelle 2-100: Entwicklung der globalen Serverzahlen (2008 – 2050) (Green Economy)

	2013	2025	2050
Anzahl physischer Server	36,55 Mio.	40,21 Mio.	44,23 Mio.
Quelle	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	Deutschland hat einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt (nach IZE 2008); Hochrechnung auf globaler Ebene	Deutschland hat einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt (nach IZE 2008); Hochrechnung auf globaler Ebene	Deutschland hat einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt (nach IZE 2008); Hochrechnung auf globaler Ebene
Anzahl Netzwerkspeicher	2,5“ – 11,2 Mio. 3,5“ – 11,2 Mio.	2,5“ – 12,32 Mio. 3,5“ – 12,32 Mio.	2,5“ – 13,55 Mio. 3,5“ – 13,55 Mio.
Quelle	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	Angelehnt an die Annahme bezüglich des Servermarktes (Marktanteil Deutschland 5 % am globalen Markt)	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2015	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2025

Tabelle 2-101: Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU) – Eigene Annahmen

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Blei	12,6	12,6	12,6
Gallium	0,016	0,016	0,016
Gold	1,587	1,587	1,587
Kupfer	13.899	13.899	13.899
Neodym	2,736	2,736	2,736
Nickel	12,0	12,0	12,0
Palladium	0,985	0,985	0,985
Platin	0,018	0,018	0,018
Ruthenium	0,010	0,010	0,010
Silber	11,5	11,5	11,5
Tantal	0,010	0,010	0,010
Zink	48,7	48,7	48,7
Zinn	222	222	222

2.2.7.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Die generelle Entwicklung der Informationstechnik hat einen erheblichen Einfluss auf den Materialbedarf und auch auf die Materialstruktur in deutschen Rechenzentren. Es ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft der Bedarf an IT-Leistung in Rechenzentren weiter deutlich ansteigen wird (Bordestep 2010, Stobbe et al. 2009, Prakash et al. 2014), vor allem aufgrund der zunehmenden Bedeutung der mobilen Geräte, wie Smartphones und Tablet-PCs sowie durch den wachsenden Markt für

Smart-Geräte mit Netzwerkschnittstellen und Softwarebasierten Lösungen für die Internetnutzung (Prakash et al. 2014).

IZE (2008) zieht den Serverbestand als Indikator für eine Abschätzung des Marktvolumens der Rechenzentren heran. Die USA sind der größte Servermarkt weltweit, mit einem Anteil von rund 38 %. Mit 25 % liegt die Europäische Union (EU-27) auf Platz zwei, gefolgt vom asiatisch-pazifischen Raum (ohne Japan) mit einem Anteil von 16 %. Deutschland hat einen Anteil von 20 % am EU-Servermarkt sowie einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt. Der weltweite Serverbestand wuchs zwischen 1998 und 2006 von 9,4 Mio. auf 29 Mio. Dies entspricht einem Wachstum von 15 %. Das Wachstum in Deutschland betrug im selben Zeitraum 17 %. Lag der Serverbestand 1998 noch bei 400.000, so waren es 2006 bereits 1,4 Mio.

Die Borderstep Studie (2014) hat analysiert, dass innerhalb von Europa Deutschland, Großbritannien und Frankreich die drei größten Rechenzentrumsmärkte darstellen. Weltweit werden allerdings in den USA, Japan und China mehr Server verkauft als in Deutschland. Gemeinsam mit Großbritannien liegt Deutschland aber auch im weltweiten Vergleich unter den Top 5 der Rechenzentrumsstandorte. Allerdings verliert Deutschland als Rechenzentrumsstandort im internationalen Wettbewerb an Bedeutung, was einerseits auf die hohen Strompreise und andererseits auf die Veränderung in der Struktur der Rechenzentren allgemein zurückzuführen ist. Deutschland ist geprägt von vielen kleinen und mittleren Rechenzentren (Fläche kleiner als 100 m²). Der internationale Trend zeichnet sich aber hin zu größeren Rechenzentren (Borderstep 2014).

Nach Berechnungen des Borderstep Instituts (2014) hat sich zwischen 2003 und 2013 die Zahl der Server (inklusive virtueller Server) in deutschen Rechenzentren auf knapp vier Mio. fast vervierfacht. Die Zahl der physikalischen Server in Rechenzentren hat sich im genannten Zeitraum um ca. 50 % auf 1,6 Mio. erhöht. Auch für die Zukunft ist von weiterem Wachstum auszugehen. Setzen sich die aktuellen Entwicklungen weiter fort, so wird es im Jahr 2020 ca. 2,3 Mio. physikalische Server in deutschen Rechenzentren geben (plus 43 % gegenüber 2013). Neue Berechnungen des Borderstep Instituts (2015) zeigen, dass die Anzahl der physischen Server in 2014 auf 1,7 Mio. stieg, ein Plus von 7,5 % gegenüber 2013.

Laut einer Studie des Borderstep Instituts (Borderstep 2014) sind ca. 200.000 Vollzeit-Arbeitsplätze in Deutschland von Rechenzentren abhängig. Davon werden rund 120.000 Beschäftigte für den reinen Betrieb der Rechenzentren eingesetzt. Weitere 80.000 Personen sind direkt von Rechenzentren abhängig. Sie arbeiten in Systemhäusern, Baufirmen und spezialisierten Dienstleistern sowie im Handwerk ausschließlich für Rechenzentren.

In Anlehnung an die vorhandenen Marktzahlen werden in der vorliegenden Studie folgende Entwicklungen der Serverzahlen für 2013, 2025 und 2050 in Deutschland angenommen (Tabelle 2-102).

Tabelle 2-102: Entwicklung der Serverzahlen (2008 – 2050) in Deutschland (Business-As-Usual)

	2008	2013	2025	2050
Anzahl physischer Server	1,28 Mio.	1,83 Mio.	2,61 Mio.	3,74 Mio.
Quelle	Borderstep (2010)	Borderstep (2015)	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	-	Anzahl physischer Server in 2014 (1,7 Mio.) mit einem Anstieg von 7,5 %	Prognostiziertes Wachstum der Serverzahlen von 43 % zwischen 2013 und 2020 (nach Borderstep 2014) konservativ für den Zeitraum 2015-2025 angesetzt	Prognostiziertes Wachstum der Serverzahlen von 43 % zwischen 2013 und 2020 (nach Borderstep 2014) konservativ für den Zeitraum 2025-2050 angesetzt
Anzahl Netzwerkspeicher ⁷	2,5“ – 50.000 3,5“ – 480.000	2,5“ – 560.000 3,5“ – 560.000	2,5“ – 800.800 3,5“ – 800.800	2,5“ – 1,15 Mio. 3,5“ – 1,15 Mio.
Quelle	Borderstep (2010)	Borderstep (2010)	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	-	-	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2015	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2025

Die Annahmen sind teilweise vereinfacht und mit einigen Unsicherheiten behaftet. Möglicherweise stellen sie auch ein „Worst-Case-Szenario“ dar, denn die Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung der Rechenzentren, wie z. B. Virtualisierung und Konsolidierung der IT-Technik und Verbesserung der Serverlast könnten die Anzahl der installierten, physischen Server insgesamt reduzieren und somit den zukünftigen Materialbedarf verringern. Nichtsdestotrotz zeigen bisherige Entwicklungen (z. B. zunehmender Datenverkehr, zunehmende Rechenleistung) keinen abnehmenden Trend in den verkauften und installierten Serverzahlen (Borderstep 2015, Borderstep 2010, Stobbe et al. 2009).

Borderstep (2010) nimmt an, dass der Bedarf an Rechenleistung bis 2015 auch im Green IT Szenario weiter ansteigen wird. Diese These wurde in einigen aktuellen Studien, wie z. B. Borderstep 2015, Borderstep 2014 und Prakash et al. 2014, bestätigt. Allerdings ging Borderstep (2010) davon aus, dass der Bestand an physikalischen Servern durch einen starken Einsatz von Virtualisierung und weitere Konsolidierung in Rechenzentren bis zum Jahr 2015 nicht weiter ansteigen wird. Diese These wurde in neuen Studien (Borderstep 2015, Borderstep 2014 und Prakash et al. 2014) eher widerlegt. Die jeglichen Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung in Rechenzentren konnten nicht zu einer Reduzierung des Serverbestandes in Rechenzentren führen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Studie eher von einer sehr vorsichtigen Einschätzung ausgehend nicht ein abnehmender Serverbestand angenommen, sondern eher einen leicht steigender.

7 SSD wird aufgrund von fehlenden Daten nicht berücksichtigt.

Tabelle 2-103: Entwicklung der Serverzahlen (2008 – 2050) in Deutschland (Green Economy)

	2008	2013	2025	2050
Anzahl physischer Server	1,28 Mio.	1,83 Mio.	2,01 Mio.	2,21 Mio.
Quelle	Borderstep (2010)	Borderstep (2015)	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	-	Anzahl physischer Server in 2014 (1,7 Mio.) mit einem Anstieg von 7,5 %	Prognostiziertes Wachstum der Serverzahlen von 10 % im Zeitraum 2015-2025	Prognostiziertes Wachstum der Serverzahlen von 10 % im Zeitraum 2015-2025
Anzahl Netzwerk-speicher	2,5“ – 50.000 3,5“ – 480.000	2,5“ – 560.000 3,5“ – 560.000	2,5“ – 616.000 3,5“ – 616.000	2,5“ – 677.600 3,5“ – 677.600
Quelle	Borderstep (2010)	Borderstep (2010)	Eigene Annahmen	Eigene Annahmen
Eigene Annahmen	-	-	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2015	Hochgerechnet auf Grundlage des Verhältnisses Server zu Storage in 2025

2.2.7.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Auf der Grundlage der definierten spezifischen Einheit (Abschnitt 2.2.7.2) sowie eingeschätzter Entwicklung des Server- sowie Storage-Bestandes (Tabelle 2-102 und Tabelle 2-103) kann der jährliche Materialbedarf der Rechenzentren in Deutschland in den Szenarien Business-As-Usual und Green Economy berechnet werden. Dabei wurde zunächst das Delta der Bestandsentwicklung der Server- und Storage-Einheiten zwischen 2008, 2013, 2025 und 2050 ermittelt. Im nächsten Schritt wurde aus dem Delta der jährliche Bedarf an Server und Storage abgeleitet, der dann anschließend mit dem spezifischen Materialbedarf pro funktionelle Einheit multipliziert wurde. Das Ergebnis stellt dann den jährlichen Materialbedarf der Rechenzentren in den Stützjahren 2013, 2025 und 2050 dar. Die folgende Beispielrechnung illustriert das Vorgehen demonstrativ bei Business-As-Usual Szenario in Deutschland zwischen 2013 und 2015:

Tabelle 2-104: Schritte zur Berechnung des Materialbedarfs der Rechenzentren

Schritt 1-3	Berechnungen
Schritt 1: Berechnung des Delta der Bestandsentwicklung der Server- und Storage-Einheiten zwischen 2013 und 2025	Server: 2,61 Mio. – 1.83 Mio. = 780.000 Storage 2,5“: 800.000 – 560.000 = 240.000 Storage 3,5“: 800.000 – 560.000 = 240.000
Schritt 2: Berechnung des jährlichen Bedarfs an Server und Storage zwischen 2013 und 2025	Server: 780.000 Stück / 12 Jahre = 65.000 Storage 2,5“: 240.000 Stück / 12 Jahre = 20.000 Storage 3,5“: 240.000 Stück / 12 Jahre = 20.000
Schritt 3: Berechnung des jährlichen Materialbedarfs in 2025	Beispiel: Gold – 1,587 g * 65.000 Servern = 0,10315 t (in Tabelle 2-102 wurde der Goldbedarf auf 0,104 abgeschätzt, denn die Berechnung erfolgte auf der Grundlage von 2,613325 Mio. Servern in 2025 und 1827500 Servern in 2013)

Auf der Grundlage der definierten spezifischen Einheit (Abschnitt 2.2.7.2) sowie eingeschätzte Entwicklung der Serverzahlen (Tabelle 2-102 und Tabelle 2-103) ergibt sich daraus folgender Materialbedarf für Deutschland in den Szenarien Business-As-Usual und Green Economy:

Tabelle 2-105: Entwicklung des Materialbedarfs in Rechenzentren in Deutschland (2013-2050)

Materialbedarf (t) ⁸	2013	2025		2050	
	Referenzszenario ⁹	BAU	Green Economy	BAU	Green Economy
Blei	23,0	32,9	25,3	47,03	27,8
Gallium	0,028	0,041	0,031	0,058	0,034
Gold	2,9	4,15	3,19	5,93	3,51
Kupfer	25.400	36.322	27.940	51.940	30.734
Neodym	5,00	7,15	5,50	10,2	6,05
Nickel	22,0	31,46	24,2	45,0	26,6
Palladium	1,80	2,57	1,98	3,68	2,18
Platin	0,032	0,046	0,035	0,065	0,039
Ruthenium	0,018	0,026	0,020	0,037	0,022
Silber	21,0	30,0	23,1	42,9	25,4
Tantal	0,018	0,026	0,020	0,037	0,022
Zink	89	127	98	182	108
Zinn	405	579	446	828	490

8 Die Konzentration von Gallium, Neodym und Tantal wird aus Sander et al. (2012) herangezogen (auf der Grundlage des Metallgehalts eines Desktop-PCs).

9 Materialbedarf des Referenzszenarios entspricht den Angaben von Borderstep (2010).

Wie bereits oben erwähnt hat Deutschland einen Anteil von 5 % am weltweiten Servermarkt (IZE 2008). Davon ausgehend, dass dieser Anteil bis 2050 gleich bleibt, ergibt sich die Entwicklung des globalen Serverbestandes in Business-As-Usual und Green Economy-Szenario wie dargestellt in Tabelle 2-99 und Tabelle 2-100.

Auf der Grundlage der definierten spezifischen Einheit (Abschnitt 2.2.7.2) sowie eingeschätzte Entwicklung des Server- sowie Storage-Bestandes kann der jährliche Materialbedarf der Rechenzentren in Deutschland in den Szenarien Business-As-Usual und Green Economy berechnet werden (Tabelle 2-106). Das Vorgehen zur Berechnung des jährlichen Materialbedarfs in 2013, 2025 und 2050 ist in diesem Abschnitt beschrieben. Der globale Materialbedarf der Szenarien in den Stützjahren 2013, 2025 und 2050 ist in folgender Abbildung dargestellt.

Tabelle 2-106: Entwicklung des globalen Materialbedarfs in Rechenzentren (2013-2050)

Materialbedarf (t) ¹⁰	2013	2025		2050	
	Referenzszenario	BAU	Green Economy	BAU	Green Economy
Blei	460	658	506	941	557
Gallium	0,567	0,810	0,623	1,16	0,69
Gold	58,0	82,9	63,8	119	70,2
Kupfer	508.000	726.440	558.800	1.038.809	614.680
Neodym	100	143	110	205	121
Nickel	440	629	484	900	532
Palladium	36,0	51,5	39,6	73,6	43,6
Platin	0,640	0,915	0,704	1,31	0,774
Ruthenium	0,360	0,515	0,396	0,736	0,436
Silber	420	601	462	859	508
Tantal	0,362	0,517	0,398	0,740	0,438
Zink	1.780	2.545	1.958	3.640	2.154
Zinn	8.100	11.583	8.910	16.564	9.801

10 Die Konzentration von Gallium, Neodym und Tantal wird aus Sander et al. (2012) herangezogen (auf der Grundlage des Metallgehalts eines Desktop-PCs).

2.2.7.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Nicht zutreffend.

2.2.7.7 Quellen

- Borderstep 2015 Hintemann, R.: Kurzstudie zur Entwicklung von Rechenzentren im Jahr 2014 - Deutliches Wachstum bei deutschen Rechenzentren im Jahr 2014, http://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2015/01/Hintemann_Kurzstudie_Rechenzentren_2014.pdf
- Borderstep 2014 Hintemann, R.; Clausen, J.: Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation, im Auftrag des BITKOM - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V., <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publicationen/Rechenzentren-in-Deutschland-Wirtschaftliche-Bedeutung-und-Wettbewerbssituation.html>
- Borderstep 2010 Hintemann, R.; Fichter, K.; unter Mitarbeit von Stobbe, L.: Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland. Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 370 893 302, UBA-FB 001420, Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Bundesverband Informationstechnik, Telekommunikation und Neue Medien (BITKOM), Dessau, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/materialbestand-rechenzentren-in-deutschland>
- Gabler 2012 Gabler Verlag (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Rechenzentrum, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/74895/rechenzentrum-v8.html>, abgerufen am 27.07.2015.
- IZE 2008 Technische Universität Berlin, Innovationszentrum Energie (IZE): Konzeptstudie zur Energie- und Ressourceneffizienz im Betrieb von Rechenzentren, Studie zur Erfassung und Bewertung von innovativen Konzepten im Bereich der Anlage-, Gebäude- und Systemtechnik bei Rechenzentren, Berlin 2008.
- Prakash et al. 2014 Prakash, S.; Baron, Y.; Liu, R.; in Zusammenarbeit mit Proske, M. und Schlösser, A.: Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT – cost/benefit analysis (SMART 2012/0064), Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Technische Universität (TU), Berlin, Europäische Kommission, DG CONNECT, Brüssel
- RAL-UZ 161 Energiebewusster Rechenzentrumsbetrieb, Ausgabe 2012, <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/buero/rechenzentrum>, abgerufen am 27.07.2015
- Sander et al. 2012 Sander, K.; Schilling, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Wilts, H.; von Gries, N.; Hobohm, J.: Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten, Meilensteinbericht August 2012, Ökopol GmbH in Zusammenarbeit mit Fraunhofer Gesellschaft ISI, TU-Darmstadt, TU Hamburg-Harburg, Im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 371 195 318, Dessau
- Stobbe et al. 2009 Stobbe, L.; Nissen, N.; Proske, M.; Middendorf, A.; Schlomann, B.; Friedewald, M.; Georgieff, P.; Leimbach, T.: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft, Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, Karlsruhe 2009.

2.2.8 UT Nr. 26: „Weiße OLED“

2.2.8.1 Technologiebeschreibung

Weiße OLEDs¹¹ werden oft als die nächste Generation energieeffizienter Beleuchtungstechnologie genannt (Kalyania & Dhobleb 2012). Die Technologie basiert auf dem Prinzip der polymeren Elektrolumineszenz in konjugierten (halbleitenden) Polymeren. Verschiedene halbleitende Polymere (z. B. PE-DOT/PSS, Poly(p-phenylenvinyl)) sind für die Verwendung in OLEDs geeignet. Allerdings konnte

11 Nicht zu verwechseln mit der als AMOLED bezeichneten Technologie für farbige Flachbildschirme.

das Innovationsziel, die Herstellung hoch effizienter und langlebiger OLED Leuchtmittel bei geringen Kosten, bisher noch nicht verwirklicht werden. Im Prinzip lassen sich OLEDs in Form sehr dünner Schichten auf Glasplatten oder Kunststofffolie mittels Drucktechnologien in großen Mengen und zu geringen Kosten herstellen. Zur Steigerung der Lichtausbeute bedarf es unter anderem einer Verbesserung der internen Quantenausbeute. Dies wird erreicht durch Aufbringen sehr dünner Aktivschichten, welche phosphoreszierende Substanzen enthalten. Diese bestehen üblicherweise aus einem organischen Wirtsmaterial, das (je nach Lichtfarbe) organo-metallische Komplexmoleküle mit Iridium, Platin, Osmium, Rhenium, oder Terbium enthalten kann (Adachi et al. 2001; Chen et al. 2009; Moss et al, 2013). Insbesondere die Iridium(III)komplex Moleküle ermöglichen eine interne Quantumeffektivität von beinahe 100 %. Darüber hinaus enthalten die OLEDs Indium in Form von transparenten ITO-Anodenmaterial sowie Silber und Barium als Kathodenmaterial. Weitere optische Dünnschichten befinden sich auf dem Substrat zur Verringerung reflexionsbedingter Lichtverluste. Die aktiven Schichten und die Elektroden werden in sehr dünnen Filmen (100 nm und geringen) gefertigt. Die Menge an kritischen Metallen pro OLED-Panel ist aufgrund der geringen Schichtdicken sehr gering. wOLEDs enthalten im Gegensatz zu wLEDs keine Phosphors auf Basis von Seltene-Erden-Elementen. Zudem entfällt die Notwendigkeit von Kühlkörpern weil sich wOLEDs im Betrieb weniger erhitzen als wLED.

Der zukünftige Verbrauch von Metallrohstoffen für die Herstellung von OLED-basierten Leuchtmitteln wird nicht nur von technischen Faktoren beeinflusst, sondern auch vom Produkt-Design und Konsummustern. Insbesondere die Nutzungsdauer der Lichtquellen und deren Ersatzraten bestimmen den Gesamtmaterialverbrauch. Bislang konnten sich starre, auf Glassubstrat basierende weiße OLEDs wegen ihres hohen Preises noch nicht in nennenswertem Umfang am Markt verbreiten. Hingegen wird der Technologie der flexiblen OLEDs ein großes Marktpotential prognostiziert, wenn es gelingt diese mittels Rolle-zu-Rolle-Produktionstechnologie kostengünstig auf Foliensubstrat herzustellen. In diesem Fall wird das Prinzip der „Economy-of-scale“ es ermöglichen, großflächige OLED Leuchtelemente in großen Mengen zu produzieren. Momentan ist die Qualität und Haltbarkeit der flexiblen OLED Leuchtelemente noch zu gering, besonders im Vergleich zu den günstig herstellbaren weißen LEDs.

Das Materialinventar von wOLED Leuchtmitteln bestimmt sich aus der Materialzusammensetzung der wOLED Paneele an sich sowie der zum Betrieb notwendigen Hilfskomponenten. Letztere umfassen die Treiberelektronik (Spannungswandler & AC/DC Konverter), Stütz- und Einbaurahmen sowie Sensoren etc. Eine Extrapolation der zukünftigen Nachfrage an Materialien für wOLEDs auf Basis des gegenwärtigen Stands der Technologie erscheint vor dem Hintergrund der rapiden technologischen Innovation nicht sinnvoll. Tabelle 2-107 fasst die in der Literatur verfügbaren Informationen zum Materialinventar von wOLED zusammen.

Angerer et al. (2009) beziffern den Indiumgehalt der transparenten Elektrode bei AMOLED Displays auf $1,88 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ und Silber auf $1,82 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$. Der Anteil des Zinns in der ITO Schicht liegt bei ca. 20 Gewichts%¹².

Diese Werte dürften trotz technischer Unterschiede auch auf wOLED Leuchtmittel übertragbar sein, da die Schichtdicke der ITO Schicht ebenfalls in der Größenordnung von 100 nm liegt.

12 <http://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/indiumzinnoxid/materialinfo-indiumzinnoxid>

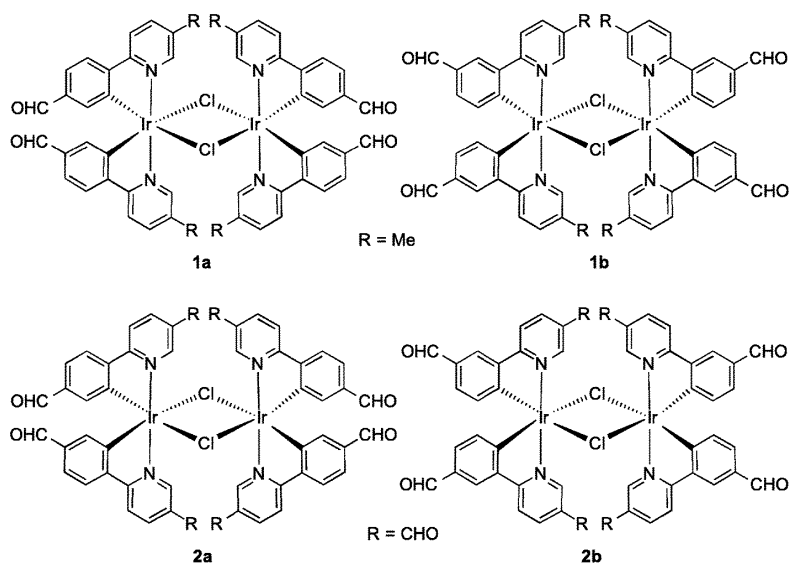
Tabelle 2-107: Berechneter Materialbedarf für wOLED Leuchtmittel zur Erzeugung von einem 800 Lumen Lichtstrom

Material	Komponente	Menge pro 1dm ² wOLED	Menge pro spezifischer Einheit*
Aluminium (Al)	Reflektorschicht	?	mg
Aluminium (Al)	Stütze, Elektronik	?	mg
Barium (Ba)	Sauerstoffabsorber	?	g
Indium (In)	Transparente ITO Elektrode	1,88 x10 ⁻³ g	7,52 x10 ⁻³ g
Iridium (Ir)	metall-organische Iri- dium(III)- Komplexmoleküle in der leuchtaktiven Dünnschicht	?	Pico-g
Kalzium (Ca)	Sauerstoffabsorber	?	
Kupfer (Cu)	Kontakte, Verdrahtung, Treiberelektronik	?	mg
Osmium (Os)	metall-organische Komplexe in der leuchtaktiven Dünnschicht	?	
Platin (Pt)	metall-organische Komplexe in der leuchtaktiven Dünnschicht	?	Pico-g
Rhenium (Re)	metall-organische Komplexe in der leuchtaktiven Dünnschicht	?	
Silber (Ag)	Elektrodenschicht, Reflektorschicht, Lot	1,82 x10 ⁻³ g	7,28 x 10 ⁻³ g
Silizium (Si)	Halbleitersubstrat IC's	?	?
Tantal (Ta)	Kondensatoren in Elektronik?	-	
Terbium (Tb)	?	?	?
Zinn (Sn)	ITO, Lot für Elektronik- teile,	ITO: 5 x10 ⁻³ g	ITO: 20 x10 ⁻³ g

* eigene Annahme für Berechnung: für 800 Lumen werden vier wOLED Paneele zu je 1 dm² Fläche benötigt

Quellen: eigene Zusammenstellung auf Basis der vorgenannten Quellen

Abbildung 2-22: Beispiele für leuchtaktive, Iridium-haltige metall-organische Komplexmoleküle in OLEDs



Quelle: (Wong et al. 2015)

Bardsley Consulting (2014) zitiert Aussagen, dass weniger als 1 % der Platingruppen-Metalle (Iridium oder Platin), welche in den Rohmaterialien der OLED Produktion eingesetzt werden, tatsächlich in das Produkt gelangen. Der Rest endet offensichtlich in den Produktionsabfällen.

2.2.8.2 Spezifische Einheit

Im Rahmen dieser Analyse wird der Materialeinsatz der wOLED Leuchtmittel auf eine Einheit von 800 Lumen (lm) bezogen. Diese Einheit bezeichnet den von einer ungerichteten Lichtquelle in alle Richtungen ausgehenden Lichtstrom. Zum Vergleich, die veraltete 75-80 W Glühlampe erzeugt einen Lichtstrom von etwa 800 Lumen. Heutige wOLED Leuchtmittel benötigen nur etwa 15-20W zur Erzeugung von 800 Lumen. Gegenwärtig kommerziell erhältliche wOLEDs Panels mit einer Größe von 1 dm² erzeugen einen Lichtstrom (luminous flux) zwischen 50 und 200 Lumen.

Die Lebensdauer der Leuchtmittel ist ein wesentlicher Aspekt der Ressourceneffizienz und wird besonders berücksichtigt. Heutige wOLED Leuchtmittel auf Glassubstrat haben eine mittlere Betriebszeit von bis zu 5000 Stunden (Moss et al, 2013) bis zu 30000 Stunden¹³ (Bloch, 2014) während flexible wOLED auf Foliesubstrat wesentlich rascher degradieren. Dies macht deren Anwendung in Produkten bislang unattraktiv. Gegenwärtige Innovationsprogramme zielen auf eine deutliche Verbesserung der Haltbarkeit flexibler wOLEDs.

¹³ Abhängig von der Leistungsaufnahme

2.2.8.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Tabelle 2-108: Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU)

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Barium	x	?	?
Indium	x	?	?
Iridium	x	?	?
Kupfer	x	?	?
Platin	x	?	?
Silber	x	?	?
Silizium (Metall)	x	?	?
Tantal	?	?	?
Terbium	?	?	?
Zinn	x	?	?

2.2.8.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Der potenzielle Markt für wOLED Beleuchtungen wird auf 6-8 Mrd. Euro geschätzt (Bloch, 2014).

In 2009 schätzte Bardsley die globale Produktion von wOLED Leuchtmitteln in 2015 auf 1 % des totalen Produktionsvolumens für Leuchtmittel. Dies entspräche einer Produktion von $1,5 \times 10^9$ kiloLumen oder $2,4 \times 10^8$ m² OLED Paneele (Bardsley, 2009).

Tabelle 2-109: Marktentwicklung im Sektor wOLED Beleuchtung

Jahr	Marktanteil
2011	0 %
2016	1 %
2025	5 %
2050	(25 %)

Quellen: eigene Zusammenstellung auf Basis der vorgenannten Quellen

Die angestrebte Massenproduktion billiger, flexibler OLEDs kann einen völlig neuen Trend im Beleuchtungsmarkt auslösen. Zum einen könnten punktförmige Lichtquellen (wLEDs) zukünftig von großflächigen OLED Lichtquellen abgelöst werden. Denkbar sind OLED Leuchtkörper in der Größenordnung von 1 m² für Innenbeleuchtung bis hin zu hunderten m² (durch Zusammenschaltung) im Außenbereich. Es wird also ökonomisch möglich sein in großem Umfang Orte zu beleuchten, die heute noch nicht beleuchtet werden. In diesem Zusammenhang können Reboudeffekte nicht ausgeschlossen werden. Zum anderen kann die Möglichkeit zur massenhaften Produktion billiger flexibler OLEDs neue Trends in Mode und Produktdesign ermöglichen. Das Aufbringen von kurzlebigen OLEDs auf Einwegprodukten (z. B. als Etiketten) erscheint ebenso vorstellbar wie die Integration in Kleidung. Prototypen so genannter photonischer Textilien mit integrierten LEDs (z. B. Galaxy Kleid) geben einen Eindruck der zukünftig mit OLEDs möglichen Mainstream Produkte mit kurzen Lebenszyklen (Seymour 2010). Der zukünftig erwartete technologische Fortschritt könnte so weit gehen, dass eine direkte Integration faserförmiger OLEDs in Textilien möglich wird (Mattana 2011). Unter innovationsorien-

tierten Produktdesignern herrscht die Erwartung, dass diese Technologien eines Tages im Modemarkt weit verbreitet sein werden. Unter diesen Umständen ist ebenfalls mit Reboundeffekten zu rechnen. Trotz der geringen Konzentrationen der Anfangs genannten Metalle in einzelnen Produkten kann es insgesamt zu einer Zunahme des Verbrauchs kritischer Rohstoffe führen.

2.2.8.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Verlässliche Prognosen oder Schätzungen über die zukünftige Marktentwicklung dieser jungen Technologie existieren nicht. Weder die EEA noch JRC machen hier konkrete Angaben.

In 2009 schätzte Bardsley den Iridiumgehalt der 30 nm dicken lichtemittierenden Schicht auf 6×10^{-4} g/m². Unter dieser Annahme wäre der globale Bedarf an Iridium für die OLED Produktion ca. 300 kg pro Jahr (10 % des globalen Iridiumangebots in 2009). Bei Indium, das in der 100 nm dicken ITO Anode 0.56 g/m² enthalten ist, läge der globale Bedarf für OLEDs bei 270 t pro Jahr (50 % des globalen Indiumangebots in 2009) (Bardsley, 2009). Diese Rechenbeispiele können nicht als Prognose des tatsächlichen Materialbedarfs interpretiert werden. Vielmehr verdeutlichen sie die potenzielle Nachfragerelevanz der wOLED Produktion im Kontext des globalen Rohstoffmarktes.

Es gibt gegenwärtig keine Recyclingverfahren für OLEDs (noch nicht einmal für wLED). Recycling von kritischen Elementen (In, Ir etc.) aus nanometer-dicken Dünnschichten ist technisch und ökonomisch kaum möglich, zumal wenn die OLEDs im allgemeinen Abfallstrom vorliegen.

Von einer Zusammenstellung von Materialbedarfsdaten für die nationalen und globalen Szenarien wurde Abstand genommen, da diese junge Technologie noch durch erhebliche Unsicherheiten und Unwägbarkeiten hinsichtlich Materialzusammensetzungen, spezifischen Materialbedarfen und Marktentwicklungen gekennzeichnet ist.

2.2.8.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Der Materialgehalt von wOLED lässt sich gegenwärtig nur mit labortechnischen Analysen von ausgewählten Prototypen ermitteln. Im Verlaufe dieser Studie hat sich gezeigt, dass diese Angaben aus der öffentlich verfügbaren Literatur nicht zu entnehmen sind. Zudem scheinen auch die Hersteller der bisher am Markt vorhandenen wOLEDs keine vollständigen Angaben zur Materialzusammensetzung zu geben. Für eine weiter gehende Trendprognose der Technologieentwicklung ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt zu früh, weil sich wesentliche Teile der wOLED Technologie (z. B. Licht emittierende Substanzen) noch immer im Stadium der Grundlagenforschung befinden. Dadurch ist es sehr wahrscheinlich, dass sich die stoffliche Zusammensetzung der wOLEDs in Zukunft noch verändert.

2.2.8.7 Quellen

- Adachi, C., Baldo, M. A., Thompson, M. E., & Forrest, S. R. (2001). Nearly 100 % internal phosphorescence efficiency in an organic light-emitting device. *Journal of Applied Physics* 90(10), 5048-5051
- Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Lüllmann, A., Erdmann, L., Scharp, M., Handke, V., Marwede, M. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage
- Bardsley, N. (2009) Critical Materials for OLED Lighting. OE SSL Manufacturing Workshop, April 2009, Fairfax, USA.
- Bloch, M., (2014) OLED-Licht macht rasante Fortschritte.
<http://www.elektroniknet.de/optoelektronik/oled/artikel/104595>
- Chen, Z., et al. (2009) A highly efficient OLED based on terbium complexes. *Organic Electronics* 10, 939–947
- Kalyania, T., & Dhobleb S.J. (2012) Organic light emitting diodes: Energy saving lighting technology—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2696–2723.
- Mattana, G. & Cosseddu, P. (2011) Organic electronics on natural cotton fibres. *Organic Electronics* 12, 2033–2039.

- Moss, R.L., Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J., Espinoza, L.T. et al. (2013) Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Herausgeber: JRC. Report EUR 25994 EN
- Seymour, S. (2010) Functional Aesthetics: Visions in Fashionable Technology. Vienna: Springer.
- Wong, M.Y., Xie, G., Tourbillon, C., Sandroni, M., Cordes, D.B., Slawin, A.M.Z., Samuel, I.D.W., Zysman-Colman, E., (2015). Formylated chloro-bridged iridium(III) dimers as OLED materials: opening up new possibilities. Dalton Trans. (44) 8419-8432. Online: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/dt/c4dt03127j>

2.2.9 UT Nr. 27: „Weiße LED“

2.2.9.1 Technologiebeschreibung

Weiße Licht Emittierende Dioden (wLED) basieren auf einer Festkörpertechnologie (Solid-State) bei welcher das Licht mittels Elektrolumineszenz erzeugt wird. Dazu werden Grenzflächen auf Halbleiterkristalle aus Galliumnitrid oder Indiumgalliumnitrid durch Stromfluss zur Emission eines monochromatischen Lichts angeregt. Durch die Elektrolumineszenz entsteht zunächst ein einfarbiges Licht mit sehr enger Spektralverteilung im Bereich rot, gelb, grün oder blau. Zur Erzeugung von weißem Licht lassen sich zwei physikalische Effekte nutzen: additive Farbmischung durch räumlich nahe Anordnung von roten, grünen und blauen LEDs sowie die Lumineszenzkonversion. Bei der ersteren Technologie lässt sich die Lichtfarbe durch separate Ansteuerung der drei farbigen LEDs dynamisch verändern. Dieser LED Typ wird oft für farblich variable Beleuchtungseffekte eingesetzt und ist weniger als weiße Lichtquelle geeignet weil die Erzeugung einer weißen Lichtmischung eine sehr genaue Abstimmung der einzelnen LEDs erforderlich macht. Deshalb verwenden die heute marktüblichen wLEDs das Prinzip der Lumineszenzkonversion, welches eine stabile weiße Farbmischung über einen langen Betriebszeitraum ermöglicht. Phosphor-converted white LEDs (pc-wLEDs) bestehen im Prinzip aus blauen Leuchtdioden, welche mit speziellen Phosphoreszenzstoffen beschichtet sind. Diese wandeln mittels Phosphoreszenz einen Teil des blauen Lichts in langwelligeres gelbes Licht um, welches als Komplementärfarbe zu blau eine Farbmischung ergibt die als weiß empfunden wird.

Heute handelsübliche pc-wLEDs weisen eine bis zu 40 % höhere Energieeffizienz im Vergleich zu herkömmlichen Kompaktfluoreszenzlampen (CFL) auf. Bereits jetzt übersteigt die Lichtausbeute der einzelnen wLEDs jene von CFL und bis zum Jahr 2020 wird eine weitere Verbesserung auf etwa 200 lm/W erwartet (Ye et al. 2010). Für den Einsatz in praktisch verwendbaren Leuchtmitteln werden meist mehrere wLEDs in geometrischer Anordnung aggregiert um eine nützliche Ausleuchtung zu bewerkstelligen. Dadurch kann die Energieeffizienz des gesamten Leuchtmittels geringer ausfallen als die einer einzelnen wLED.

Für die praktische Anwendung der wLED zu Beleuchtungszwecken im Kontext existierender Infrastrukturen (Wechselstromnetze im Haushalt mit 230V Spannungsebene) benötigen die wLED Leuchtmittel zusätzliche Komponenten. Eine integrierte Treiberelektronik wandelt die 230V Wechselspannung in eine Niedervolt Gleichspannung um. Diese Spannungswandler arbeiten auf Halbleiterbasis ohne Verwendung eines Transformators. Die Materialzusammensetzung entspricht näherungsweise der marktüblichen analogen Leistungselektronik. Außerdem benötigen wLED Leuchtmittel einen passiven Kühlkörper zur Wärmeableitung aus dem LED Halbleiterkristall. Der Kühlkörper besteht üblicherweise aus Aluminium. Weitere periphere Komponenten sind die Lampenfassung, Reflektoren und transparente Kunststoffkappen zur Erzeugung eines diffusen Streulichts.

Blaue LEDs Chips (dye) bestehen aus Galliumnitrid oder Indiumgalliumnitrid Halbleiterkristallen. Angerer et al. (2009) geben für diese Substanzen einen Gesamtverbrauch von 0,17 mg Indium und 0,53 mg Gallium pro 1 mm² LED-Chip an. Buchert et al (2012) beziffern die Dicke des Chips (dye) auf 10 µm und 250 µm, je nach Herstellungstechnologie. Daraus ergibt sich ein berechneter Materialverbrauch von 0,029 mg bzw. 0,17 mg für Indium und 0,0325 mg bzw. 0,53 mg für Gallium. Nach Angaben von Moss et al. (2013) enthalten High-Power wLED Chips (dye) auch Germanium.

Der gelbe Phosphoreszenzstoff besteht bei heutigen pc-wLEDs am häufigsten aus Yttrium-Aluminium-Granat (YAG). Die Feinabstimmung der Farbtemperatur des weißen Mischspektrums erfolgt durch Dotierung der YAG Leuchtstoffschicht mit Oxiden von Seltenen Erden (z. B. Ce, Gd, Eu und Tb¹⁴). Die Menge der verwendeten Phosphoreszenzstoffe und Dotierungssubstanzen per LED hängt von deren Größe, Leistung, Lichtfarbe und Hersteller ab. Generische Mengenangaben über den Gesamtverbrauch dieser Substanzen konnten im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden. Buchert et al (2012) haben die Substanzmengen im Phosphoreszenzstoff wie folgt abgeschätzt (Tabelle 2-110 & Tabelle 2-111):

Tabelle 2-110: Zusammensetzung eines typischen gelben Leuchtstoffs einer wLED (dye) (je Rohstoff)

Element	Y	Gd	Ce	Al	O	$(Y_{0,77}Gd_{0,2}Ce_{0,03})_3 Al_5 O_{12}$
Molare Masse (g/mol)	88,91	157,25	140,12	26,98	16,00	639,24
Koeffizient	2,31	0,6	0,09	5	12	1
Masseanteil (gerundet)	32 %	15 %	2 %	21 %	30 %	100 %
Masse pro LED [µg]	32	15	2	21	30	100

Quelle: Buchert et al (2012) S. 48

Tabelle 2-111: Zusammensetzung eines typischen gelben Leuchtstoffs einer wLED (dye)

Leuchtstoff	Molare Masse (g/mol)	Koeffizient für Eu^{2+}	Massenanteil Eu^{2+}	Masse Eu^{2+} pro LED [µg]
$Ca_{0,5}Sr_{0,45}Eu_{0,05}S$	99,14	0,05	8 %	0,9
$(Sr_{0,95}Eu_{0,05})_2Si_5N_8$	434,12	0,10	4 %	0,4
$Ca_{0,5}Sr_{0,45}Eu_{0,05}AlSiN_3$	168,14	0,05	5 %	0,6

Quelle: Buchert et al (2012) S. 48

Allerdings benötigen pc-wLEDs geringere Mengen an Phosphoreszenzstoffen als Leuchtstofflampen und CFL, weil sie viel kleiner sind. Der Materialeinsatz pro spezifische Einheit (800 Lumen) berechnet sich aus der Anzahl der pro Leuchtmittel verwendeten LEDs sowie der sonstigen Supportmaterialien. Heute übliche LED-Retrofit-Lampen mit E27 Glühlampenfassungen verwenden 40 bis 60 wLEDs in einer räumlich orientierten Schaltanordnung. Die einzelnen wLEDs (dye) können dabei zu Vierergruppen (Arrays) mit einem LED Chip pro Komponente (Package) aggregiert sein. Diese Arrays sitzen auf einem metallischen Kühlkörper (meist Aluminium) auf, welcher die im Betrieb entstehende Abwärme ableitet. Eine wichtige Funktion hat die im Leuchtmittel integrierte Treiberelektronik. Sie wandelt die Wechselspannung des Stromnetzes in eine Niedervolt Gleichspannung um und stabilisiert netzbedingte Spannungsschwankungen. Dies hat maßgeblichen Einfluss auf die Lichtausbeute und die Lebensdauer der wLED Leuchtmittel. Die Treiberelektronik besteht aus einer Leiterplatte mit passiven und aktiven Elektronikkomponenten. Zukünftige technische Innovation wird wachsende Anforderun-

14 Nach Auskunft aus der Industrie wird Terbium als Phosphoreszenzstoff aus technischer Sicht bei zukünftigen SSL Beleuchtungstechnologien eine geringere Rolle spielen. In der Praxis wird dies aber auch von rechtlichen (Patente) und ökonomischen (Rohstoffpreise) Faktoren abhängen.

gen an die Energieeffizienz und Leuchtstärke der wLED Leuchtmittel ermöglichen. Davon sind nicht nur die LEDs sondern auch die Treiberelektronik betroffen. Beispielsweise ermöglicht die Substitution Silizium-basierter Spannungswandler mit Galliumnitrid eine wesentlich bessere Schaltfrequenz, welche kompaktere und leistungsfähige wLED Leuchtmittel ermöglicht¹⁵. Weitere Forschungen, z. B. Chip Scale Package (CSP), zielen auf die Reduktion der Verwendung kritischer Rohmaterialien ab. In weiterer Zukunft könnten Phosphoreszenzstoffe gänzlich durch Quantum-dots ersetzt werden.

Die Abschätzung der gegenwärtig und zukünftig verwendeten Ressourcennengen für wLED Beleuchtung ist schwierig. Die Gründe liegen in der großen technologischen Heterogenität und Formenvielfalt der am Markt vorhandenen wLED Leuchtmittel sowie in der sich kontinuierlich verändernden Basistechnologie zur Herstellung der LEDs, der Phosphoreszenzstoffe sowie der Treiberelektronik. Die folgenden Abschnitte ermöglichen eine Grobabschätzung auf Basis der (lückenhaften) Datengrundlage zu heutigen wLED Leuchtmitteln mit E27 Fassung. Die Tabelle 2-112 bis Tabelle 2-117 geben Angaben zur stofflichen Zusammensetzung von wLED Leuchtmitteln bzw. der darin enthaltenen Komponenten aus verschiedenen Quellen wider. Grundlage der Abschätzung ist die Annahme, dass Leuchtmittel zur Erzeugung eines Lichtstromes von 800 Lumen (vergleichbar mit einer ungerichteten 75W Glühlampe) insgesamt 60 wLED Leuchtpunkte¹⁶ enthalten. Allerdings bleibt bei den meisten Quellenangaben die Anzahl der Leuchtpunkte per Chip (dye) ungewiss. Viele wLED Arrays integrieren vier oder mehr Leuchtpunkte pro Array oder per Package. Dazu kommt noch die im Leuchtmittel integrierte Treiberelektronik, Kühlkörper sowie Supportmaterialien.

Tabelle 2-112: Liste von Komponenten und Materialien in wLED Leuchtmitteln nach Hendrickson (2010)

Name	Material	Mass (g)	Mass %
Glass bulb	Glass	10.7	13.0%
LED board connectors	Gold plated copper	0.5	0.60%
Array (9 LEDs in 1 array)		1.5	1.80%
Local heat sink ring	Aluminum	5.7	6.90%
Heat sink outer cone	Aluminum	18.1	22.0%
Heat sink inner cylinder	Aluminum	13.1	15.8%
Edison base insulator	Acrylic, polycarbonate	4.2	5.10%
Inner insulator and adhesive connections	Acrylic, polycarbonate	6.6	8.00%
Printed circuit board, capacitors, resistors, transistors, diodes		10.1	12.2%
Edison base and leads	Tin plated steel	12.2	14.8%
	Total =	82.7	100%

Quelle: zitiert in: Navigant Consulting, Inc., 2012

15 <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2014/Maerz/led-lampen.html>

16 Je nach Quelle werden andere Zahlen genannt. z. B. Moss et al. (2013): 5-12 Stück High Power wLEDs per Leuchtmittel.

Tabelle 2-113: Liste von Komponenten und Materialien in LED Leuchtmitteln nach Olivetti et al. (2012)

Components/parts	LED	Weight (g)
Ballast PWBs	PWBs	24.7
Lamp Base	Insulating Base	15.8
	Potting Materials	28.5
	Edison Screw	3.0
	Screw Glass	4.0
	Heat Sink (Aluminum)	76.8
	n/a	n/a
	n/a	n/a
	Wires	n/a
LED module	Chips	5.0
	Phosphor Powder	n/a
	Lead Frame (PWBs)	n/a
Lens	Glass/Plastic	13.4 (plastic)
	E-Coating materials	
Container	Paper/Plastic	52.2 (paper)

Quelle: (Olivetti et al, 2012) S.17

Tabelle 2-114: Materialzusammensetzung eines wLED Leuchtmittels

Material	Menge	Anteil
Glas	1.85 g	1.06 %
Eisenmetalle	0.28 g	0.16 %
Aluminium	71 g	40.55 %
Andere Nichteisenmetalle (außer. Al)	5.15 g	2.94 %
Plastik	27.33 g	15.61 %
Elektronische Komponenten	29.5 g	16.85 %
Harz	40 g	22.84 %
Total	175.11 g	100 %

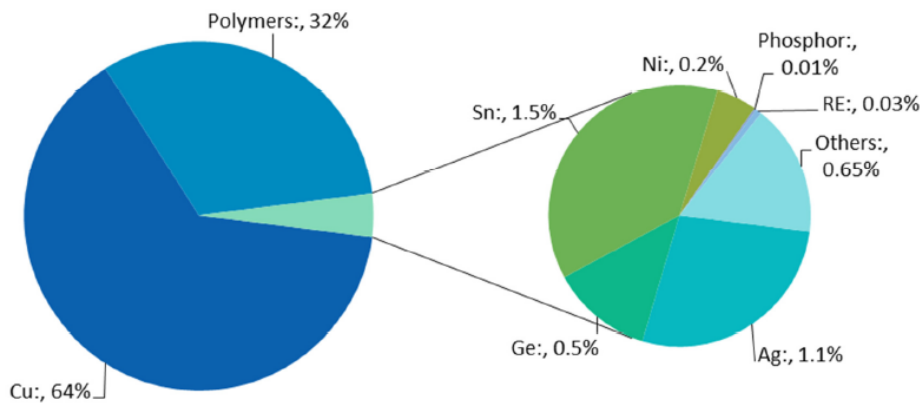
Quelle: OSRAM GmbH (2011)

Tabelle 2-115 Typischer Gehalt eines wLED Chips an kritischen Metallen

Element	In	Ga	Ce	Eu	Gd	Y
Masse pro LED (µg)	29,0	32,5	2,0	0,6	15,0	32,0

Quelle: Buchert et al (2012) S. 51

Abbildung 2-23: Materialzusammensetzung von wLED Chips mit 230 mg Masse



Source: European Lamp Companies Federation, personal communication (Dec 2012)

Quelle: Moss et al. (2013)

Tabelle 2-116: Konzentration von Metallen in Leiterplatten aus Netzteilen

Substanz	Menge	Quelle
Gold	10 g/t	(Gmünder, 2007)
Palladium (PGM)	17 g/t	(Gmünder, 2007)
Silber	373 g/t	(Gmünder, 2007)
Kupfer	41g/kg	(Morf, 2007)
Zinn	2 g/kg	(Morf, 2007)

Tabelle 2-117: Berechneter Materialbedarf für ein 800 Lumen wLED Leuchtmittel mit E27 Fassung

Material	Komponente	Menge pro wLED	Menge pro spezifischer Einheit
Aluminium (Al)	YAG-Phosphoreszenzstoff	21 µg	1,26 mg
Aluminium (Al)	Kühlkörper, Stütze, Elektronik	-	71g
Cer (Ce)	Dopingsubstanz im Phosphor	2 µg	120 µg
Europium (Eu)	Dopingsubstanz im Phosphor	0,6 µg	36 µg
Gadolinium (Gd)	Dopingsubstanz im Phosphor	15 µg	90 µg
Gallium (Ga)	Halbleitersubstrat	32,5 µg	1,95 mg
Gold (Au)	Beschichtung, Bondingdraht IC's	?	0,3 mg
Indium (In)	Halbleitersubstrat	29 µg	1,74 mg
Kupfer (Cu)	Kontakte, Verdrahtung, Treiberelektronik	147 mg	1,4 g
Nickel	wLED Chip	0,46 mg	5,5 mg
PGM	Treiberelektronik	-	0, 5 mg
Silber (Ag)	Beschichtung, Lot	2,53 mg	38 mg
Silizium (Si)	Halbleitersubstrat IC's	-	?
Stahl (Fe)	Kühlkörper, Stütze	-	0,28 g
Tantal (Ta)	Kondensatoren in Elektronik?	-	?
Terbium (Tb)	TAG-Phosphor ($Tb_3Al_5O_{12}$)	?	?
Yttrium (Y)	YAG-Phosphoreszenzstoff	32 µg	1,92 mg
Zinn (Sn)	Lot für Elektronikteile,	3,45 mg	59 mg

Quellen: eigene Zusammenstellung auf Basis der vorgenannten Quellen

2.2.9.2 Spezifische Einheit

Im Rahmen dieser Analyse wird der Materialeinsatz der wLED Leuchtmittel auf eine **Einheit von 800 Lumen (lm)** bezogen. Diese Einheit bezeichnet den von einer ungerichteten Lichtquelle in alle Richtungen ausgehenden Lichtstrom. Zum Vergleich, veraltete 75-80 W Glühlampen erzeugen einen Lichtstrom von etwa 800 Lumen¹⁷. Heutige wLED Leuchtmittel benötigen nur etwa 12-15 W zur Erzeugung von 800 Lumen.

Die **Lebensdauer der Leuchtmittel** ist ein wesentlicher Aspekt der Ressourceneffizienz und wird gesondert berücksichtigt. Heutige wLED Leuchtmittel haben eine nominale Lebensdauer von bis zu 50000 Stunden¹⁸ im Vergleich zu etwa 4000 Stunden bei Glühlampen.

¹⁷ <http://www.wirsindheller.de/Lichtstrom-Lumen-zu-Watt.40.0.html>

¹⁸ Die Alterung von wLED Leuchtmitteln bewirkt einen allmählichen Lichtstromrückgang und keinen plötzlichen Ausfall. Dementsprechend wird die Alterung mit verschiedenen standardisierten Faktoren (Lx, Bx, Cx, Fx) charakterisiert. Laut International Electrotechnical Commission (IEC) = L70B50 müssen bei Prüfung unter Standardbedingungen mindestens 50 % der Lampen an Ende ihrer Lebensdauer noch 70 % des anfänglichen Lichtstroms aufweisen.

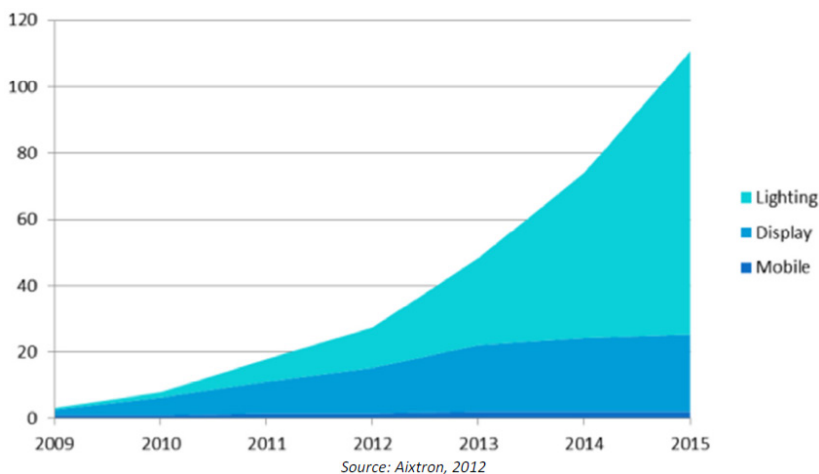
2.2.9.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Tabelle 2-118: Angaben zum Materialbedarf je spezifischer Einheit (in g pro ASU)

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Cer	0,00012 g	0,00012 g	0,00012 g
Europium	0,000036 g	0,000036 g	0,000036 g
Gadolinium	0,000090 g	0,000090 g	0,000090 g
Gallium	0,00195 g	0,00195 g	0,00195 g
Gold	0,0003 g	0,0003 g	0,0003 g
Indium	0,00174 g	0,00174 g	0,00174 g
Kupfer	1,400 g	1,400 g	1,400 g
Nickel	0,0055 g	0,0055 g	0,0055 g
Platin	0,0005 g	0,0005 g	0,0005 g
Silber	0,038 g	0,038 g	0,038 g
Yttrium	0,00192 g	0,00192 g	0,00192 g
Zinn	0,059 g	0,059 g	0,059 g

2.2.9.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Der Leuchtmittelmarkt befindet sich gegenwärtig im Umbruch. Es wird erwartet, dass der weltweite Beleuchtungsmarkt bis 2020 um jährlich 3 % wachsen wird (Baumgartner, 2012). Neben dem Wachstum spielt besonders der technologische Wandel eine tragende Rolle. Vor allem die Europäische ErP Richtlinie fordert die zunehmende Marktdurchdringung energiesparender Beleuchtungstechnologien. Mit dem schrittweisen Auslaufen der Marktzulassung von Glühlampen und Halogenlampen bekommen alternative Leuchtmittel wie wLCD eine zunehmende Bedeutung. Hatte die LED-Beleuchtung in 2011 noch einen Marktanteil von 9 % am gesamten Beleuchtungsmarkt wird diese für 2016 bereits auf 45 % geschätzt und auf 69 % im Jahr 2020 (Baumgartner, 2012). Weitergehende Prognosen gehen davon aus, dass wLCD bis 2025 einen Marktanteil von bis zu 95 % im Leuchtmittelsektor haben werden. In fernerer Zukunft (bis 2050) werden allerdings die wLED-basierten Leuchtmittel teilweise durch OLEDs ersetzt werden. Eine Abschätzung des Zeitraums und Ausmaßes dieses technologischen Wandels ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Es ist allerdings erwähnenswert, dass die OLED-basierten (flexiblen) Beleuchtungstechnologien aufgrund ihrer prognostizierten Kostengünstigkeit zu erheblichen Reboundeffekten führen können (mehr und großflächigere Beleuchtung als gegenwärtig vorhanden). Dieser Reboundeffekt lässt sich bereits heute im Zusammenhang mit wLED Leuchten beobachten (z. B. PV Gartenleuchten, LED Leuchtstreifen an Fassaden).

Abbildung 2-24: Weltweite Produktion von superhellen wLED Chips in Mrd. mm²

Quelle: Moss et al. (2013)

Die Marktentwicklung der SSL Technologie im Beleuchtungsmarkt lässt sich gegenwärtig nicht sinnvoll prognostizieren. Die International Energy Agency (IEA) rechnet mit konservativen Annahmen für die Marktdurchdringung der wLED Leuchtmittel (Waide, 2010). In 2009 schätzte Bardsley die globale Produktion von Leuchtmitteln in 2015 auf 150×10^9 kiloLumen (Bardsley, 2009). Dies entspricht einer globalen Produktion von $1,875 \times 10^{11}$ Stück Leuchtmitteln zu je 800 Lumen. Nach Moss et al. (2013) hat sich das weltweite Produktionsvolumen von superhellen wLED Chips in den letzten fünf Jahren mehr als verzwanzigfacht (Abbildung 2-24). Bis 2020 wird ein weiterer Anstieg des Produktionsvolumens auf 50 Mrd. mm² erwartet (Deubzer et al. 2012). Die IEA beziffert den globalen Markt für „general service“ (GLS) Lampen in 2007 auf $0,125 \times 10^{11}$ Stück. Navigant Consulting, Inc. (2014) hat Prognosen für die Marktentwicklung von wLED Leuchtmitteln im General Service Segment in den USA veröffentlicht. Die folgende Hochrechnung basiert auf einem Mittelwert (1×10^{11}) aus beiden Schätzwerten da keine belastbareren Zahlen verfügbar sind:

Tabelle 2-119: Globale Marktentwicklung im Sektor wLED Beleuchtung (abgeleitet von Trends in den USA)

Jahr	Marktanteil	Stückzahlen
2011	2 %	$0,2 \times 10^{10}$
2016	8 %	$0,8 \times 10^{10}$
2025	93 %	$9,3 \times 10^{10}$
2050	99 %	1×10^{11}

Quellen: eigene Zusammenstellung auf Basis der vorgenannten Quellen

In der EU hatte der Markt für gerichtete und ungerichtete „general service“ (GLS) Lampen in 2007 einen Umfang von 1,9 Mrd. Stück (Waide, 2010). Für 2025 schätzt die IEA den Markt für CFL Lampen auf ca. 800 Mio. Stück, allerdings mit starken Schwankungen. Schätzungen für wLED Leuchtmittel könnten in der gleichen Größenordnung liegen. Es gibt aber auch Grund zur Annahme, dass wLED bis 2025 auch CFL-Marktanteile übernehmen und insgesamt eine deutlich höhere Nachfrage erhalten.

Tabelle 2-120: Szenario zur EU-Marktentwicklung bei wLED Leuchtmitteln

Jahr	Marktanteil	Stückzahlen
2011	9 %	170 Mio
2016	45 %	855 Mio
2025	95 %	1,8 Mrd
2050	(75 %)*	1,4 Mrd

* angenommener Rückgang bei wLED Leuchtmitteln zugunsten von wOLED

Quellen: eigene Abschätzung in Anlehnung an vorgenannte Quellen

Tabelle 2-121: Prognose der Marktanteile für wLED Leuchtmittel nach Deubzer et al. (2012)

Product	Marktanteil 2011	Marktanteil 2020
LED luminary	9 %	58 %

Quellen: Deubzer et al. (2012)

2.2.9.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Es gibt gegenwärtig noch keine effektiven Recyclingverfahren für wLEDs. Die Sammlung gebrauchter wLED Leuchtmittel könnte theoretisch mit der gleichen Logistik wie bei CFL Lampen erfolgen. Allerdings enthalten wLEDs im Gegensatz zu CFL keine Schadstoffe so dass hier noch die regulatorische Grundlage für die Getrenntsammlung fehlt. Recycling von kritischen Elementen (Ga, Ge, REE etc.) aus Mikrometer-dicken LED Chips ist technisch und ökonomisch bislang kaum praktikabel. Das EU Forschungsprojekt „CycLED“ hat hier erste Vorarbeiten zu diesem Thema geleistet. Das Projektziel war die Entwicklung von geschlossenen Ressourcenkreisläufen im LED Markt (Level, undatiert).

Tabelle 2-122: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 27: „Weiße LED“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Cer	0,020	0,216	0,168	0,216	0,168
Europium	0,006	0,065	0,050	0,065	0,050
Gadolinium	0,015	0,162	0,126	0,162	0,126
Gallium	0,332	3,51	2,73	3,51	2,73
Gold	0,051	0,54	0,42	0,54	0,42
Indium	0,296	3,13	2,44	3,13	2,44
Kupfer	238	2.520	1.960	2.520	1.960
Nickel	0,935	9,9	7,7	9,9	7,7
Platin	0,085	0,9	0,7	0,9	0,7
Silber	6,46	68,4	53,2	68,4	53,2
Yttrium	0,326	3,46	2,69	3,46	2,69
Zinn	10,03	106	82,6	106	82,6

Tabelle 2-123: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 27: „Weiße LED“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Cer	0,24	11,16	12,0	11,16	12,0
Europium	0,072	3,35	3,6	3,35	3,6
Gadolinium	0,18	8,37	9,0	8,37	9,0
Gallium	3,9	181	195	181	195
Gold	0,6	27,9	30,0	27,9	30,0
Indium	3,48	162	174	162	174
Kupfer	2.800	130.200	140.000	130.200	140.000
Nickel	11,0	512	550	512	550
Platin	1,0	46,5	50,0	46,5	50,0
Silber	76,0	3.534	3.800	3.534	3.800
Yttrium	3,84	179	192	179	192
Zinn	118	5.487	5.900	5.487	5.900

2.2.9.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die stoffliche Zusammensetzung der wLED Leuchtmittel ließe sich am besten durch Laboranalysen von ausgewählten Referenzprodukten ermitteln. Dabei sollten nicht nur die Leuchtmittel der Marken berücksichtigt werden sondern auch low-cost Importprodukte. Diese können sich hinsichtlich Materialzusammensetzung und Lebensdauer deutlich unterscheiden. Gegenwärtige technische Innovationen lassen zudem erahnen, dass sich die Grundlagentechnologie in der kommenden Zeit noch verändern wird, um beispielsweise den Gehalt an Seltenen Erden in Phosphoreszenzstoffen zu reduzieren. Zudem sollten auch andere Bauformen von wLED Leuchtmitteln (z. B. gerichtete Strahler, Lichtbänder, flächige Arrays) mit untersucht werden.

2.2.9.7 Quellen

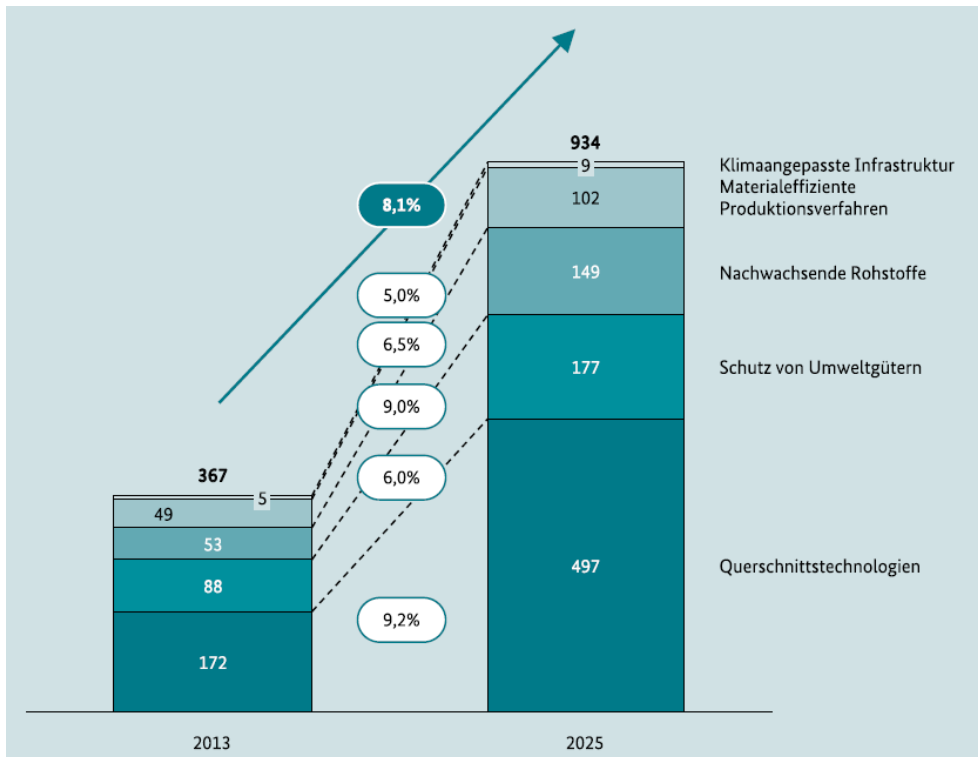
- Angerer, G. et al. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage
- Bardsley, N. (2009). Critical Materials for OLED Lighting. OE SSL Manufacturing Workshop, April 2009, Fairfax, USA.
- Baumgartner, T.; Wunderlich, F.; Jaunich A.; Sato R.; Bundy G.; Griebmann N.; Kowalski J.; Burghardt S.; Hanebrink J. (2012) Lighting the way, Perspectives on the global lighting market; McKinsey & Company (Hrsg.), 2. Auflage.
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel D. (2011) Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. Hrsg: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW)
- Deubzer, O., Jordan, R., Marwede, M., Chancerel, P. (2012) Deliverable 2.1: Categorization of LED products. Projekt "Cycling resources embedded in systems containing Light Emitting Diodes" <http://www.cyc-led.eu/index.php>
- Gmünder, S. (2007) Recycling - From Waste to Resource - Assessment of optimal manual dismantling depth of a desktop PC in China based on eco-efficiency calculations. Diploma thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,
- Hendrickson, C. T. (2010) Reducing environmental burdens of solid-state lighting through end-of-life design. Environmental Research Letters.
- Level, M. (undatiert) Business models for eco-innovative LED products, <http://www.cyc-led.eu/index.php>

- Moss R.L., Tzimas E., Willis P., Arendorf J., Espinoza L.T. et al. (2013) Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Herausgeber: JRC. Report EUR 25994 EN
- Navigant Consulting, Inc. (2012) Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps. Herausgeber: U.S. Department of Energy
- Navigant Consulting, Inc. (2014) Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications. Herausgeber: U.S. Department of Energy
- Olivetti, E.A. Huabo Duan, Randolph E. Kirchain (2012) Exploration into Environmental Assessment of Electrical Products. Phase I: Method Development for Carbon Footprint Assessment as Applied to Motor and Lighting Products
- OSRAM GmbH (2011) Material Declaration Sheet and RoHS Compliance Declaration (PARATHOM® CL A 40 Warm White DTC DIM BES)
- Schleicher, T., Liu, R., Gröger, J. (2013) Leuchten für die Anwendung in Büros und verwandten Einsatzbereichen. Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Öko-Institut e.V.
- Waide, P. (2010) Phase out of incandescent lamps - Implications for international supply and demand for regulatory compliant lamps, Herausgeber: International Energy Agency (IEA)

2.3 Umwelttechnologien im Leitmarkt Rohstoff- & Materialeffizienz

Der Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz umfasst die Marktsegmente Querschnittstechnologien, Schutz von Umweltgütern, Nachwachsende Rohstoffe, Materialeffiziente Produktionsverfahren sowie Klimaangepasste Infrastruktur. Das globale Marktvolumen betrug im Jahr 2013 367 Mrd. Euro. Bis zum Jahr 2025 wird mit einem starken Anstieg des globalen Marktvolumens auf 934 Mrd. Euro gerechnet. Das größte Marktsegment sind hier die Querschnittstechnologien (2013: 172 Mrd. Euro, 2025: 497 Mrd. Euro), gefolgt von Schutz von Umweltgütern und Nachwachsenden Rohstoffen (siehe folgende Abbildung). Überproportional wachsen in diesem Leitmarkt die Marktsegmente Querschnittstechnologien sowie Nachwachsende Rohstoffe.

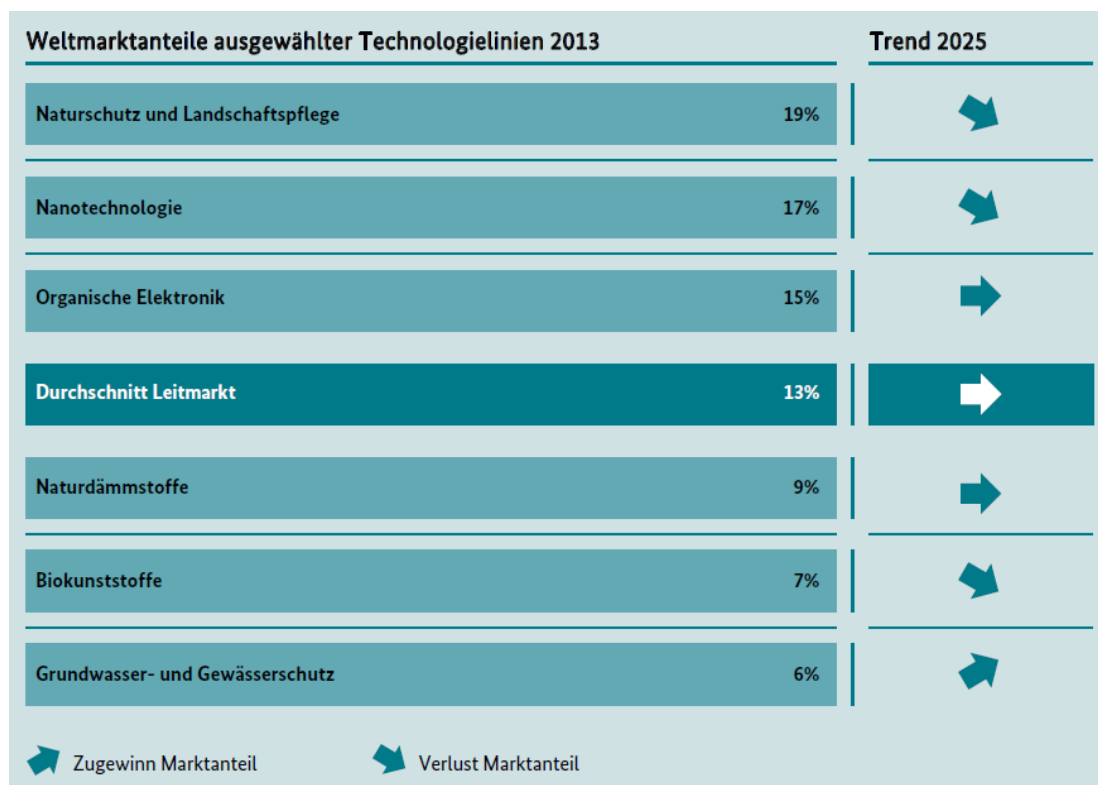
Abbildung 2-25: Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Rohstoff- und Materialeffizienz 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)



Quelle BMUB 2014

Das Marktvolumen für den Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz betrug in Deutschland im Jahr 2013 48 Mrd. Euro. Für 2025 wird mehr als eine Verdopplung auf 119 Mrd. Euro erwartet. Wie in der globalen Perspektive stellt das Marktsegment Querschnittstechnologien mit 25 Mrd. Euro (2013) bzw. 69 Mrd. Euro (2025) den größten Anteil (BMUB 2014). Der Weltmarktanteil deutscher Unternehmen beträgt in diesem Leitmarkt 13 %. Erwartet wird, dass die deutschen Unternehmen bis 2025 diesen Weltmarktanteil halten (siehe folgende Abbildung) – bei stark steigenden Gesamtmarkt (BMUB 2014).

Abbildung 2-26: Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Rohstoff- und Materialeffizienz 2013 und Trend bis 2025



2.3.1 UT Nr. 53: „Maßgeschneiderte Katalysatoren“

2.3.1.1 Technologiebeschreibung

Diese Umwelttechnologie umfasst maßgeschneiderte Edelmetallkatalysatoren in der Chemie (inkl. Petrochemie) und Feinchemie mit Potential zur Ressourcenschonung. Edelmetallkatalysatoren beschleunigen zahlreiche chemische Reaktionen unter Verbesserung der Energieeffizienz und der chemischen Ausbeuten. Sie sind ein bedeutender Faktor für Ressourceneffizienz in unterschiedlichsten Prozessen. Eine Vielzahl unterschiedlichster Katalysatoren mit diversen Trägermaterialien (im Falle der heterogenen Katalyse) und aktiven Schichten ist im Einsatz. In dieser Studie werden unter dieser Umwelttechnologie sämtliche edelmetallhaltigen Katalysatoren im industriellen Einsatz (Petrochemie, Chemie, Feinchemie inkl. Pharmaindustrie sowie Umweltkatalysatoren) subsummiert. Es werden die Edelmetalle Silber, Platin, Palladium, Ruthenium, Rhodium und Iridium hierfür eingesetzt. Gold spielt hier nur eine sehr untergeordnete Rolle (Hassan 2001) und wird daher hier nicht weiter betrachtet.

Ungeachtet der Vielzahl der eingesetzten Industriekatalysatoren und der entsprechenden Verfahren zeigt sich für die sechs oben genannten Edelmetalle ein unterschiedlich weites Einsatzspektrum. So wird der Silberbedarf im Bereich der Industriekatalysatoren sowohl in Deutschland als auch global zu über 90 % von der Ethylenoxidproduktion nachgefragt. Mit weitem Abstand folgen Silberkatalysatoren für die Formaldehydproduktion (Hassan 2001, Hassan 2003, Metals Focus 2015). Eine wichtige industrielle katalytische Anwendung von Platin ist die Ammoniakoxidation zu Salpetersäure. Allerdings werden Platinkatalysatoren auch in petrochemischen Prozessen eingesetzt. Dazu wird Platin in Pulver-, Festbett- und Wirbelschichtkatalysatoren für verschiedene chemische Prozesse, in der homogenen Katalyse (Silikonherstellung) sowie in Umweltkatalysatoren (z. B. katalytische Nachverbrennung) benötigt (Hagelüken 2005). Palladium findet sich in allen für Platin genannten Einsatzbereichen mit Ausnahme der Umweltkatalysatoren. Rhodiumkatalysatoren hingegen werden mit klarem

Schwerpunkt in der homogenen Katalyse eingesetzt (Hagelüken 2005). Ruthenium-Iridiumkatalysatoren werden z. B. in der Essigsäureherstellung verwendet (JM Interim 2013).

2.3.1.2 Spezifische Einheit

Aufgrund der Mannigfaltigkeit der diversen Edelmetallkatalysatoren und der damit verbundenen unterschiedlichen Prozesse ist für die Ziele dieser Studie hier keine sinnvolle Definition einer spezifischen Einheit möglich. Die Informations- und Datenlage bzgl. des Einsatzes von Edelmetallen in Industriekatalysatoren erlaubt jedoch die Größenordnung sowohl des nationalen Bedarfs in Deutschland als auch des globalen Bedarfs für das Basisjahr 2013 gut abzuschätzen. Unter Berücksichtigung der Entwicklungen der letzten 10 bis 15 Jahre auf diesem Gebiet sind entsprechende Annahmen auch für die zukünftige Entwicklung als Basis für die Szenarien zu treffen (siehe unten).

2.3.1.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Da wie oben geschildert keine sinnvolle spezifische Einheit für diese Umwelttechnologie gebildet werden kann, werden die absoluten nationalen und globalen Bedarfe an Silber, Platin, Palladium, Ruthenium, Rhodium und Iridium für Industriekatalysatoren aus Quellen direkt ermittelt (siehe unten).

2.3.1.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Entsprechend der generellen Vorgehensweise in dieser Studie stellen alle Bedarfszahlen den Bruttomaterialbedarf für die diversen Edelmetalle für industrielle Katalysatoren dar. Dieser Sachverhalt ist hier besonders wichtig zu unterstreichen, da gerade bei vielen Edelmetallkatalysatoren im industriellen Bereich das Recycling der Edelmetalle mit sehr hohen Rückgewinnungsraten (oft deutlich > 90 % Rückgewinnungsrate) in der globalen Praxis erfolgt (Hagelüken 2005, Hassan 2001, Hassan 2003). Diese Recyclingpraxis läuft grundsätzlich als B-t-B Verhältnis zwischen Katalysatorhersteller und Katalysatoranwender und wird daher wie ein direktes Recycling angesehen. Daher wird z. B. auch in renommierten Quellen wie z. B. (JM Interim 2013) auf die explizite Ausweisung des Bruttobedarfs sowie der Recyclingströme an Edelmetallen verzichtet und nur der Nettobedarf an Edelmetallen für Industriekatalysatoren ausgewiesen. Ungeachtet dessen sind die Verhältnisse Bruttobedarf zu Nettobedarf bei Edelmetallen in Industriekatalysatoren durch ausführliche Arbeiten im Detail bekannt (Hagelüken 2005, Hassan 2001, Hassan 2003, Metals Focus 2015). Mit folgenden Bruttobedarf/Nettobedarfverhältnissen ist nach diesen Erfahrungen im Bereich Industriekatalysatoren zu rechnen:

Platin: 2,81; Palladium: 14,4; Rhodium: 7,2; Iridium und Ruthenium: 14,4 (Annahme: Verhältnisse wie bei Palladium); Silber: 14,3

Alle sechs Edelmetalle können über pyrometallurgische Routen (sehr hohe Aufnahme rate in Kupferphase) und anschließende elektrolytische Raffination von Kupfer und schließlich Separation in Edelmetallscheidung mit sehr hohen Ausbeuten (meist > 90 %) zurückgewonnen werden. Bei Rhodium sind die Ausbeuten etwas geringer (und damit auch das Brutto/Nettoverhältnis). Dies ist auf etwas höhere Verluste bei der homogenen Katalyse zurückzuführen (Hagelüken 2005). Im Fall von Platin ist das relativ geringe Brutto/Nettoverhältnis im Kern auf einen relativ hohen Anteil der homogenen Katalyse für die Silikonherstellung zurückzuführen. Hier erfolgt ein Totalverlust des Platinkatalysators in das Produkt (Hagelüken 2005). Dies kann als eine – allerdings relevante - Ausnahme im Bereich Edelmetallkatalysatoren im industriellen Einsatz eingestuft werden.

Generell verläuft die Marktentwicklung bei Edelmetallkatalysatoren im industriellen Einsatz seit einigen Jahren auf globaler Ebene vielfach deutlich dynamischer als auf der nationalen Ebene in Deutschland. Insbesondere die überdurchschnittlichen Wachstumsraten in großen Märkten wie Asien mit entsprechendem Auf- und Ausbau von Kapazitäten an Chemie- und Raffinerieanlagen sind hier der Treiber (Metals Focus 2015). So ist seit 10 -15 Jahren in Deutschland die Kapazität für die Herstellung von Ethylenoxid stagnierend, einhergehend mit einem weitgehend konstanten Bedarf an Silber für Industriekatalysatoren in Deutschland. In der globalen Dimension kann hier jedoch weiterhin von einem

zumindest moderaten Wachstum ausgegangen werden. Platin, welches im Bereich Industriekatalysatoren besonders stark im Bereich Grundstoffe (Salpetersäure, Petrochemie, Silikon) eingesetzt wird, wird ebenso wie Silber für die letzten 10-15 Jahre als auch für die zukünftige Entwicklung in Deutschland als konstant eingeschätzt. Dies wird auch durch Abgleich europäischer Zahlen (Deutschland hat in der EU im Bereich Chemie etc. einen erheblichen Anteil) für den Platinbedarf für Industriekatalysatoren bestätigt (JM 2009, JM Interim 2013). Global gesehen ist auch für Platin weiter mit einem dynamischen Wachstum des Bedarfs für Industriekatalysatoren zu rechnen, wie auch ein Vergleich der Daten 2003 mit 2013 (JM 2009, JM Interim 2013) nahelegt.

Für Palladium hingegen, welches häufig in Industriekatalysatoren in der Feinchemie eingesetzt wird, zeigte sich zwischen 2003 und 2013 auch für Europa bzw. Deutschland ein deutlicher Zuwachs (Hagelücken 2005, JM 2009, JM Interim 2013). Dies wird ebenfalls für Rhodium, Iridium und Ruthenium angenommen. Gestützt durch erhebliche Zuwächse des Bedarfs auf globaler Ebene (JM 2009, JM Interim 2013) wird für Palladium, Rhodium, Iridium und Ruthenium sowohl auf nationaler als auch auf globaler Ebene in Zukunft von einem weiteren Wachstum des Bedarfs für Industriekatalysatoren ausgegangen. Details der Szenarioannahmen finden sich im nächsten Abschnitt.

2.3.1.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Edelmetallkatalysatoren sind in der Chemieproduktion etc. seit längerer Zeit weit verbreitet und lassen vielfach noch starkes Wachstum für viele Jahre erwarten. Generell wird für den Katalysatormarkt mittelfristig ein starkes Wachstum vorhergesagt (Business Standard 2015).

Die wesentlichen Szenarioannahmen im Bereich Edelmetallkatalysatoren für die nationale und die globale Ebene werden hier dargestellt. Generell wird aufgrund der bereits sehr starken Durchdringung von Edelmetallkatalysatoren in der Chemieindustrie und in verwandten Branchen hier auf unterschiedliche Annahmen für das BAU- und das Green-Economy-Szenario verzichtet. Entscheidend für das zu erwartende Wachstum sind hingegen die entsprechenden Megatrends bzgl. der Chemiebranche etc. Da konkrete mittel- und langfristige Prognosen für den Edelmetallbedarf bei Industriekatalysatoren nicht existieren, beruhen die Annahmen für die Szenarien auf Hintergrundwissen des Öko-Instituts (Hagelücken 2005) und Auswertung der Quellen zu den Tendenzen der letzten Jahre.

Platin: Aufgrund der Stagnation im nationalen Markt zwischen 2003 und 2013 in Europa bzw. Deutschland (JM 2009, JM Interim 2013) wird von einem konstanten Bruttobedarf für Deutschland ausgegangen. Der Wert von 2003 (Hagelücken 2005) für Platin in Industriekatalysatoren wird daher für die nationalen Szenarien bis 2050 konstant gehalten. Der Vergleich der Entwicklung des globalen Bruttobedarfs zwischen 2003-2013 weist ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 5,8 % auf (JM 2009, JM Interim 2013). Dieses durchschnittliche jährliche Wachstum wird zunächst unverändert bis 2025 fortgeschrieben. Nach 2025 bis 2050 wird von einer halbierten jährlichen Rate (2,9 %) ausgegangen.

Palladium: Auf nationaler Ebene wird für den Zeitraum 2014-2025 ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 1,8 % angenommen. Dies entspricht der halbierten Wachstumsrate zwischen 2003 bis 2013 (JM 2009, JM Interim 2013). Für 2026-2050 wird von einer weiter reduzierten, aber stetigen Wachstumsrate von 0,9 % ausgegangen. Auf globaler Ebene wird für Palladium in den Szenarien die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate der letzten Jahre (JM 2009, JM Interim 2013) zwischen 2014-2025 mit 8,1 % fortgeschrieben. Zwischen 2026-2050 wird global mit einer halbierten jährlichen Rate von 4,05 % gerechnet.

Rhodium: Mit Hilfe von Daten für Rhodium aus (Hagelücken 2005) für das Jahr 2003, der Kenntnis über den Anteil Deutschlands am globalen Bruttobedarf (5 % des Weltbedarfs) und der bekannten Entwicklung bis 2013 (JM 2009, JM Interim 2013) wird für 2014-2025 von einer halbierten jährlichen Rate von 5% (im Vergleich zum Zeitraum 2003-2013 mit 10 % jährlichem Wachstum) ausgegangen. Diese jährliche Rate wird für die nationalen Szenarien zwischen 2026-2050 weiter halbiert auf 2,5 %.

Die globalen Szenarien gehen für den Bruttobedarf von Rhodium für Industriekatalysatoren zwischen 2014-2025 von unverändert 10 % jährlicher Wachstumsrate aus. Diese Wachstumsrate halbiert sich zwischen 2026-2050 auf 5 % für die globalen Szenarien.

Iridium: Iridium wird von allen sechs hier untersuchten Edelmetallen im Bereich Industriekatalysatoren national wie global am geringsten nachgefragt. So finden sich bei Johnson Matthey erst seit jüngster Zeit entsprechende Daten für Iridium (JM Interim 2013). Die globalen Daten für das Startjahr 2013 konnte (JM Interim 2013) entnommen werden (Nettobedarf). Für die Abschätzung des Bruttobedarfs wurde das gleiche Verhältnis Bruttobedarf/Nettobedarf wie für Palladium angenommen. Für die Abschätzung des nationalen Startwerts für Iridium (2013) wurde das gleiche Verhältnis global/national wie bei Rhodium (Faktor 20 oder umgekehrt 5 %) angesetzt. Für die nationalen Szenarien wird nach eigener Annahme des Öko-Instituts für 2014-2025 eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 3,5 % pro Jahr angesetzt, die sich im Zeitraum 2026-2050 auf 1,75 % halbiert. Für die globalen Szenarien werden doppelt so hohe Wachstumsraten unterstellt: 7 % pro Jahr für 2014-2025 und 3,5 % pro Jahr für 2026-2050.

Ruthenium: Die Startwerte (2013) für den Rutheniumbedarf für Industriekatalysatoren wurden exakt so abgeschätzt wie beim Vorgehen zu Iridium. Die nationalen und globalen Szenarioannahmen (Wachstumsraten) von Iridium wurden ebenfalls für Ruthenium übernommen.

Silber: Aufgrund der weitgehenden Stagnation der Ethylenoxidproduktion in Deutschland wird für die nationalen Szenarien der jährliche Silberbedarf für Industriekatalysatoren basierend auf den Daten von (Hassan 2001, Hassan 2003) konstant gehalten. Für die globalen Szenarien wird das durchschnittliche jährliche globale Wachstum der Ethylenoxidproduktion (nach Metals Focus 2005 4,5 % p.a. zwischen 2000-2015) und damit der Silberbedarf für Industriekatalysatoren für den Zeitraum 2014-2025 fortgeschrieben. Für den weiteren Verlauf der globalen Szenarien (2026-2050) wird eine reduzierte durchschnittliche Wachstumsrate von 2,0 % p. a. unterstellt.

Die resultierenden Materialbedarfe (Bruttobedarfe) für die nationalen und globalen Szenarien sind in den beiden folgenden Tabellen für die Edelmetalle Platin, Palladium, Rhodium, Iridium, Ruthenium und Silber zusammengefasst.

Tabelle 2-124: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 53: „Maßgeschneiderte Katalysatoren“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Iridium	0,448	0,636	0,914	0,636	0,914
Palladium	5,79	7,04	8,62	7,04	8,62
Platin	3,73	3,73	3,73	3,73	3,73
Rhodium	0,912	1,46	2,37	1,46	2,37
Ruthenium	2,33	3,31	4,71	3,31	4,71
Silber	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8

Tabelle 2-125: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 53: „Maßgeschneiderte Katalysatoren“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Iridium	9,0	16,0	31,0	16,0	31,0
Palladium	260	512	1.030	512	1.030
Platin	61,0	103	178	103	178
Rhodium	18,0	39	88	39	88
Ruthenium	47,0	86	161	86	161
Silber	870	1.338	2.007	1.338	2.007

2.3.1.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Zurzeit wird kein unmittelbarer Untersuchungsbedarf für diese UT gesehen. Die Quellen-, Informations- und Datenlage ist im Bereich der Edelmetallkatalysatoren in industriellen Anwendungen zumindest soweit ausreichend, um die weitere Bearbeitung im Projekt zu gewährleisten.

2.3.1.7 Quellen

- Business Standard 2015 Global catalyst market to exceed \$20 bn in 2018, http://www.business-standard.com/content/b2b-chemicals/global-catalyst-market-to-exceed-20-bn-in-2018-115010800787_1.html; Zugriff am 1. März 2015.
- Hagelücken 2005 Hagelücken, C. (Umicore AG & Co. KG); Buchert, M.; Stahl, H.; unter Mitwirkung von Chakraborty, S.; Noll, T.; Schmied, M.; Schmitt, B.; Stoffströme der Platingruppenmetalle: Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. ISBN 3-935797-20-6, Clausthal-Zellerfeld: GDMB Medienverlag, 2005.
- Hassan 2001 Hassan, A.; Rohstoffeinsparung durch Kreislaufführung von verbrauchten Katalysatoren. UBA-Texte 21/01, ISSN 0722-186X, Berlin 2001.
- Hassan 2003 Hassan, A.; Stand der Verwertung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie sowie Einflussfaktoren zur Verbesserung der Kreislaufführung. UBA Texte 15/03, ISSN 0722-186X, Berlin 2003.
- JM 2009 Platinum 2009, published in May 2009 by Johnson Matthey.
- JM Interim 2013 Platinum Interim Review 2013, published in November 2013 by Johnson Matthey.
- Metals Focus 2015 Newman, P. et al; Silver Scrap: The forgotten Fundamental. Metals Focus prepared for the Silver Institute, September 2015.

2.3.2 UT Nr. 56: „Bleifreie Lote“

Diese Umwelttechnologie umfasst alle Arten von bleifreien Lötungen in der Elektronikbranche, vor allem Zinnlegierungen mit Silber, Kupfer und Zink. Die Umsetzung der Richtlinien 2011/65/EU (RoHS) und 2000/53/EU (Altfahrzeugrichtlinie) sind ein starker Treiber für die zunehmende Anwendung bleifreier Lote. Nicht einbezogen sind die mengenmäßig deutlich kleineren Mengen von bleifreien Lötungen im Karosseriebau und der Gebäudetechnik.

Ausgewählt wurde die Umwelttechnologie „Bleifreie Lote“, da das Umweltentlastungspotential durch die Substitution bleihaltiger Lote als „hoch“ einzuschätzen ist.

2.3.2.1 Technologiebeschreibung

Der Begriff „Bleifreie Lote“ umschreibt im vorliegenden Projekt bleifreie zinnhaltige Weichlote, die eingesetzt werden, um herkömmliche bleihaltige Lote zu substituieren. Das Hauptanwendungsgebiet

ist die Elektronik. Hier werden mittels des Weichlots elektrisch leitende Verbindungen von Leitungen, Drähten und Leiterplatten hergestellt. Bleifreie Lote werden auch im Industrie- und Karosseriebau eingesetzt. Nach EU (2014) findet jedoch nur rund ein Sechstel der zinnhaltigen Lote in diesem Sektor Anwendung (z. B. Verbinden von Kupferrohren, Zinndachrinnen, Feinlöten von Blechen, Verlöten von Konservendosen; siehe EU (2014)), so dass sich die vorliegende Untersuchung auf den Einsatz in der Elektronik beschränkt.

Mit dem Inkrafttreten der RoHS-Direktive (RoHS, 2002) darf in der EU seit 2006 wegen der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen kein bleihaltiges Lötzinn mehr in elektronischen Geräten verwendet werden, sofern für die Anwendung keine Ausnahmegenehmigungen erteilt werden. Auch weltweit gibt es starke Bemühungen, die bleihaltigen Weichlote durch bleifreie Lote zu substituieren. Teilweise sind die bleifreien Lote den bleihaltigen Loten jedoch in der Funktionalität und Zuverlässigkeit unterlegen, so dass es zahlreiche Ausnahmen gibt.

Die weltweite Substitutionsquote wird vom International Tin Research Institute (ITRI) auf 65 % geschätzt (BGR, 2014b). Es ist davon auszugehen, dass die Substitution in den kommenden Jahren weiter ansteigen wird, aber aufgrund technologischer Restriktionen in einigen Anwendungsfeldern nicht 100 % erreichen wird.

Bleifreie Lote verwenden überwiegend Zinn mit Zusätzen von Kupfer und Nickel. Teilweise kommt auch Silber zum Einsatz. Außerhalb Europas wird auch Bismut zugesetzt (BGR, 2014b). Darüber hinaus gibt es Speziallote, die im ppm-Bereich weitere Stoffe wie Nickel, Germanium, Gold und Indium zusetzen.

Nach Deubzer (2012) ergeben sich bei der Substitution von 1 kg Blei-Zinn-Lot bei durchschnittlichen Materialzusammensetzungen folgende Materialverschiebungen:

- Durch die vollständige Substitution von Blei ergibt sich eine Bleiersparnis von 365 g.
- Durch den Mehreinsatz von Zinn und anderen Legierungszusätzen ergeben sich Mehrverbräuche von 162 g Zinn, 23 g Silber, 5 g Kupfer und 0,3 g Zink.

2.3.2.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit wurde als ein 1 kg bleifreies Lot definiert.

2.3.2.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Der Materialbedarf je spezifischer Einheit wird nach Deubzer (2007) für die durchschnittliche Zusammensetzung gängiger bleifreier Weichlote angesetzt. Pro kg bleifreies Lot werden 939 g Zinn, 27 g Silber, 6 g Kupfer und 0,3 g Zinn bilanziert. Ein Experteninterview hat bestätigt, dass es bis heute keine signifikante Verschiebung bei der Materialzusammensetzung in den gängigen Weichlotanwendungen gegeben hat. Eine Darstellung der Zusammensetzung typischer Lote und ihres Marktanteils findet sich in Deubzer (2007). Die größten Marktanteile nimmt Deubzer für SnAg3.7Cu0.8 (64 %) und SnCu0.7 (21 %) an.

Der zukünftige Materialbedarf je spezifischer Einheit wird als konstant angenommen.

2.3.2.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Ausgangspunkt heute:

Es gibt keine statistischen Daten, die den aktuellen globalen und deutschen Einsatz von bleifreien Loten ausweisen, so dass im Projekt mit Abschätzungen gearbeitet wird. Nach BGR (2014b) werden 52 % des globalen Raffinadeverbrauchs von Zinn für Lote verwendet. Abzüglich der Lotanwendungen außerhalb der Elektronikbranche (rund 17 %) entspricht dies einem Zinnverbrauch von rund 146.000 t in Elektronik-Weichloten. Wenn davon ausgegangen wird, dass 65 % der Lote bleifrei sind, errechnet sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Zinngehalte von bleihaltigem und blei-

freiem Lot ein globaler Einsatz von rund 114.000 t bleihaltigen Loten in 2012/2013 im Elektronikbereich.

In Deutschland werden nach BGR (2014b) rund 27.000 t Zinn aus Primär- und Sekundärquellen eingesetzt, von denen rund 29 % für die Lötzinnproduktion verwendet werden. Analog zum globalen Markt errechnet sich ein deutscher Verbrauch für die Produktion bleifreier Lote von rund 5.600 t im Elektronikbereich. Es wird jedoch angenommen, dass in Deutschland im Vergleich zum globalen Durchschnitt aufgrund der RoHS-Direktive ein höherer Anteil der bleifreien Lote erzielt wird. Dieser wurde mit 75 % angesetzt.

Zukünftige Entwicklung:

Da es auch für die zukünftigen Entwicklungen keine verfügbaren Statistiken gibt, wird auch hier mit Abschätzungen gearbeitet. Zunächst einmal wird ein jährliches nationales und globales Wachstum der Elektronikbranche von 5 % bis 2025 und von 4 % von 2025 – 2050 angenommen.

Der Verbrauch an Weichlot wird jedoch nicht proportional wachsen, da durch die zunehmende Miniarisierung und alternative Verfahren wie das Sintern der spezifische Lötzinnbedarf pro funktionelle Elektroneinheit abnehmen wird (BGR, 2014b). Es wird davon ausgegangen, dass sich bis 2025 eine Reduktion des spezifischen Lötzinnbedarfs um 10 % und von 2025 bis 2050 eine weitere Reduktion um weitere 25 % ergeben wird.

Eine weitere Einflussgröße ist der Anteil der bleifreien Lote. Auch hier gibt es keine veröffentlichten Expertenschätzungen, so dass mit Annahmen gearbeitet wird. Für den deutschen Markt wird ein Anteil von 80 % in 2025 und 85 % in 2050 für das Basisszenario geschätzt (Green Economy Szenario 88 % und 92 %). Für den globalen Markt wird mit niedrigeren Anteilen von 75 % in 2025 und 80 % in 2050 für das Basisszenario geschätzt (Green Economy Szenario 85 % und 90 %).

2.3.2.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Auf der Grundlage des definierten spezifischen Materialbedarfs sowie der geschätzten Entwicklung des Einsatzes von bleifreien Loten ergibt sich daraus folgender globaler und nationaler Materialbedarf für Deutschland in den Szenarien Business-As-Usual und Green Economy:

Tabelle 2-126: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 56: „Bleifreie Lote“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Kupfer	34,2	58,2	124	64,2	134
Silber	154	262	559	289	605
Zink	1,71	2,91	6,21	3,21	6,72
Zinn	5.352	9.108	19.437	10.047	21.034

Tabelle 2-127: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 56: „Bleifreie Lote“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Kupfer	684	1.272	2.712	1.440	3.054
Silber	3.078	5.724	12.204	6.480	13.743
Zink	34,2	63,6	136	72	153
Zinn	107.046	199.068	424.428	225.360	477.951

2.3.2.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Eine Untersuchung der Weichlote außerhalb des Elektronikbereichs könnte ein noch umfassenderes Bild aufzeigen. Durch die deutlich geringere Mengenrelevanz werden sich dabei aber voraussichtlich keine relevanten neuen Aussagen ergeben.

Ein interessanter Aspekt ist die Substitution von bleifreien Loten durch andere Lotlegierungen oder andere Verbindungstechnologien. Eine gewisse Substitution wird durch die zunehmende Miniaturisierung mit veränderten Fertigungsprozessen ohnehin stattfinden. So wird beispielsweise die Sinter-technologie mit dünnen Silberschichten zunehmend angewandt. Ein Durchbruch bei alternativen bleifreien Lotlegierungen ist hingegen derzeit nicht abzusehen.

2.3.2.7 Quellen

- BGR 2014a Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Zinn. Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe, 2014, http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_sn.pdf?__blob=publicationFile&v=9
- BGR 2014b Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: DERA Rohstoffinformationen (20): Zinn, 2014, http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-20.pdf?__blob=publicationFile&v=9
- BMWi 2009; Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Stuttgart 2009
- DERA 2014; Elsner, H.: Zinn - Angebot und Nachfrage bis 2020, DERA Rohstoffinformationen 20, Deutsche Rohstoffagentur, Berlin 2014.
- Deubzer 2007 DEUBZER, Otmar: Explorative Study into the Sustainable Use and Substitution of Soldering Metals in Electronics – Ecological and Economical Consequences of the Ban of Lead in Electronics and Lessons to Be Learned for the Future; PhD thesis TU Delft, The Netherlands, January 2007, ISBN 978-90-5155-031-3, <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Af9a776cf-57c3-4815-a989-fe89ed59046e/>,
- Deubzer, 2012 Deubzer, Otmar, United Nations University/Fraunhofer IZM: Reducing hazardous substances in electronics; published in “Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook”, Edited by V Goodship, University of Warwick, UK and A Stevels, Delft University of Technology, The Netherlands; Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials No. 30, Cambridge, 28 November 2012; ISBN-10: 0857090895; ISBN-13: 978-0857090898
- ITRI 2011 Industrial Technology Research Institute 2011, in: European Commission 2014 - Report on Critical Raw Materials for the EU – Critical Raw Materials Profiles http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index_en.htm

2.3.3 UT Nr. 60: „Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen“

2.3.3.1 Technologiebeschreibung

Diese Umwelttechnologie umfasst Hochleistungs-Permanentmagnete (im Wesentlichen Neodym-Eisen-Bor-Magnete), die für Elektromotoren im industriellen Einsatz (sogenannte Servomotoren) für die Industrieautomatisierung eingesetzt werden. Anwendungen für Elektromotoren bzw. Generatoren für Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge und Energieerzeugung wie z. B. Windkraftanlagen sind hier angenommen. Synchronmotoren mit Permanentmagneten zeichnen sich durch sehr hohe elektrische Wirkungsgrade aus und weisen daher entsprechende Marktdynamik auf. Deutsche Hersteller von entsprechenden Elektromotoren haben technologische Weltgeltung.

2.3.3.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird ein Industrieservomotor im durchschnittlichen Leistungsbereich mit insgesamt 0,175 kg NdFeB-Magnet (BaWü 2014) definiert.

2.3.3.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Der Materialbedarf je spezifischer Einheit kann für die Seltenerdmetalle in den NdFeB-Magneten der Quelle (BaWü 2014) entnommen werden. Da bereits heute ernsthafte Bestrebungen in der industriellen Praxis erkennbar sind, den Dysprosiumgehalt (Dysprosium ist für die Temperaturstabilität des Permanentmagneten wichtig) in den NdFeB-Magneten zu reduzieren, wird für 2025 und 2050 ein reduzierter Dysprosiumgehalt angenommen; allerdings im Sinne dieses Arbeitsschrittes als konservativer Ansatz. Entsprechend ist der Neodymgehalt 2025 bzw. 2050 etwas höher. Der Kupfergehalt wurde aus Informationen aus (Buchert et al. 2011) abgeleitet.

Tabelle 2-128: Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050 (Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen)

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Dysprosium	12,25	8,75	8,75
Kupfer	1225	1225	1225
Neodym	28,875	32,375	32,375
Praseodym	9,625	9,625	9,625
Terbium	1,75	1,75	1,75

2.3.3.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Die hier betrachteten Servomotoren für den Industrieinsatz zeichnen sich durch hohe Einsatzflexibilität und hohe energetische Wirkungsgrade aus. Von Experten wird daher ein dynamisches Wachstum dieses Elektromotorensegments erwartet (BaWü 2014).

2.3.3.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

In 2013 wurden in Deutschland rund 500.000 Servomotoren in der Industrie neu eingesetzt. Ein deutliches Wachstum wird für dieses Motorensegment erwartet (BaWü 2014). Im BAU-Szenario werden sowohl auf nationaler wie auch auf globaler Ebene bis 2050 durchschnittliche jährliche Wachstumsraten von 4 % angenommen. Im Green-Economy-Szenario wird von doppelt so hohen Wachstumsraten, d. h. 8 % ausgegangen. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass 10 % der globalen industriellen Anwendungen in Deutschland erfolgen. In den beiden folgenden Tabellen sind die Absatzzahlen nach Einheiten für die nationale und die globale Perspektive für die Stützjahre aufgeführt.

Tabelle 2-129: Nationale Absatzzahlen nach BAU- und Green-Economy-Szenario

NATIONAL					
		BAU-Szenario		Green Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Verkäufe Ser- vomotoren	500.000	740.000	1.480.000	980.000	2.940.000

Tabelle 2-130: Globale Absatzzahlen nach BAU- und Green-Economy-Szenario

GLOBAL					
		BAU-Szenario		Green Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Verkäufe Ser- vomotoren	5.000.000	7.400.000	14.800.000	9.800.000	29.400.000

In den nachfolgenden beiden Tabellen sind für die nationalen und globalen Szenarien die Entwicklungen der Materialbedarfe aufgeführt.

Tabelle 2-131: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 60: „Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	6,13	6,48	12,95	8,58	25,7
Kupfer	613	907	1.813	1.201	3.602
Neodym	14,4	23,96	47,9	31,7	95,2
Praseodym	4,81	7,12	14,2	9,43	28,3
Terbium	0,875	1,295	2,59	1,72	5,15

Tabelle 2-132: Absoluter Materialbedarf je global (in t): UT Nr. 60: „Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	61,3	64,8	130	85,8	257,3
Kupfer	6.125	9.065	18.130	12.005	36.015
Neodym	144	240	479	317	952
Praseodym	48,1	71,2	142	94,3	283
Terbium	8,75	12,95	25,9	17,2	51,5

2.3.3.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es wurde für diesen Arbeitsschritt kein besonderer Untersuchungsbedarf identifiziert.

2.3.3.7 Quellen

- BaWü 2014 Öko-Institut e.V.: Buchert, M. et al. (2014): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, i.A. des Ministerium für Umwelt, Klima u. Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg, Stuttgart 2014
- Buchert et al. 2011 Buchert, M. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen (Anhang zum Schlußbericht); Öko-Institut e.V., Daimler AG, Tu Clausthal, Umicore, Förderung durch BMU, Darmstadt 2011.

2.3.4 UT Nr. 67: „Nanobeschichtung von Oberflächen“

2.3.4.1 Technologiebeschreibung

Diese Umwelttechnologie umfasst nanostrukturierte Oberflächen mit Lotuseffekt (Forbes 2009). Diese sind durch superhydrophobe mikro- und nanostrukturierte Oberflächen selbstreinigend. (Groß 2010) Die Beschichtung von Oberflächen mit Nanoschichten erhöht deren Abriebfestigkeit und mindert entsprechend den Verschleiß. Hierdurch können z. B. Schmieröle überflüssig werden. Die Schichtdicken betragen < 100 nm. Ausgenommen bei dieser Umwelttechnologie ist schwermetallfreier Korrosionsschutz (siehe UT Nr. 12: Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle).

2.3.4.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit ist definiert als 1.000 m² Oberfläche.

2.3.4.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Diese UT ist nicht materialrelevant im Sinne von SubSKrit: die Hauptbasis bilden SiO₂- und TiO₂-Beschichtungen mit organischen Kompositen (Groß 2010).

2.3.4.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Entfällt für diese Umwelttechnologie.

2.3.4.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Entfällt für diese Umwelttechnologie.

2.3.4.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es besteht kein weiterer Untersuchungsbedarf.

2.3.4.7 Quellen

- Forbes 2009 Forbes, P.: Selbstreinigende Materialien, Spektrum der Wissenschaft, August 2009.
- Groß 2010 Groß, F.: Anwendungsmöglichkeiten von Beschichtungen auf der Basis der chemischen Nanotechnologie; Nano-X GmbH, Oberhausen, 11. November 2010.

2.3.5 UT Nr. 68: „Precision Farming“

Ausgewählt wurde die Umwelttechnologie „Precision Farming“, da das Umweltentlastungspotential als „hoch“ einzuschätzen ist. Zudem sind die globalen Markterwartungen für Precision Farming dynamisch zu bewerten. Die Deutsche Bank Research sieht Precision Farming als wichtiges Beispiel für Industrie 4.0. Deutschland ist in Forschung und Unternehmensaktivitäten im Bereich Precision Farming führend.

Seit Ende der 90er Jahre wird Landtechnik zunehmend mit Precision Farming-Technologie ausgestattet. Nach Bokelmann et al. (2012) nutzten 2012 ca. 10 % der Landwirte in Deutschland die Precision Farming-Technologie.

2.3.5.1 Technologiebeschreibung

Die Umwelttechnologie Precision Farming umfasst Verfahren der teilflächenspezifischen / standortangepassten und zielgerichteten Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Hilfe modernster Sensor- und Satellitenortungstechnologie. Precision Farming ermöglicht dadurch kleinräumige Boden- und (Pflanzen-) Bestandsführung sowie gezieltere Saat, Düngung, Bewässerung, Ernte etc. Im Rahmen dieser Studie wird auf die Sensortechnik am Beispiel des Stickstoff-Sensors fokussiert, da diese Anwendung im Bereich Precision Farming bislang im Markt am weitesten verbreitet ist. Die Firma YARA ist national und global eindeutig Marktführer für den Einsatz von Stickstoff-Sensoren. Im Rahmen der Recherche konnte Kontakt zum Entwickler und Hersteller dieses Produktes (tec 5) aufgebaut werden.

Mit dem YARA N-Sensor® wird der Stickstoff-Versorgungszustand des Pflanzenbestandes schnell erfasst. Der Stickstoff-Sensor misst und analysiert das vom Pflanzenbestand reflektierte Sonnenlicht. Daraus wird anschließend die benötigte Düngermenge errechnet und direkt an die Streuer oder Spritze weitergegeben. Eine bedarfsgerechte Stickstoff-Düngung an jeder Stelle des Feldes wird somit sichergestellt. (YARA, 2015) Diese Technologie wird bislang ausschließlich für die Ausbringung von Stickstoff-Mineraldünger verwendet.

Die Firma YARA beschreibt die Wirkungsweise des Stickstoff-Sensors folgendermaßen: „Das über die Aufnahme-Optiken erfasste Licht wird über Glasfaserleiter an hochempfindliche Spektrometer übermittelt, spektral zerlegt und analysiert. Im sichtbaren Licht (Wellenlänge 400 bis 700 nm) und im unsichtbaren Infrarotlicht (Wellenlänge 700 bis 1000 nm) werden die Reflexions-Eigenschaften von Pflanzenbeständen von ihrem Stickstoff-Ernährungszustand beeinflusst. Dabei sind Chlorophyll-Gehalt und Biomasse die ausschlaggebenden Faktoren. Der N-Sensor ist in der Lage, Unterschiede im Spektrum des reflektierten Lichtes in beiden Wellenlängenbereichen zu erkennen. Der N-Sensor besteht aus zwei Spektrometern, Lichtleitern mit Optiken und der Betriebs-Elektronik, die zusammen in einer Box auf der Traktor-Kabine untergebracht sind.“ (YARA, 2015)

2.3.5.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit wurde als ein Stickstoff-Sensor eines Traktors definiert.

Der N-Sensor von YARA ist 1,80m lang und wiegt ca. 15 kg. Das Gehäuse ist aufgebaut aus Fiberglas und mit Aluminiumprofilen ummantelt, um die Stabilität zu gewährleisten. An jeder Seite befindet sich ein Messkopf (ca. 3,5 kg) mit Silizium-Detektoren, die für die ortsspezifische Bestimmung des Stickstoffgehaltes der Pflanzen und damit der notwendigen Dosierung des Mineraldüngers eingesetzt werden. In der Mitte des N-Sensors ist die USB-Schnittstelle integriert. (tec5, 2015) In der folgenden Abbildung ist sowohl der YARA N-Sensor® der 1. Generation abgebildet (blauer Sensor auf blauem Traktor) als auch die aktuelle Generation im Vordergrund (hellgrauer Sensor auf grünem Traktor).

Abbildung 2-27: YARA N-Sensor® auf dem Traktor montiert (Photo: tec 5, 2014; Zusätzlich rote Kreise mit freundlicher Genehmigung von tec5)



Quelle: tec 5 (2014)

Einen Eindruck der Messköpfe an den Seiten des YARA N-Sensors® gibt die folgende Abbildung.

Abbildung 2-28: Messkopf am YARA N-Sensor®



Quelle: Andres, 2014; mit freundlicher Genehmigung von tec5

2.3.5.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Bei der Betrachtung der stofflichen Zusammensetzung wurde sich auf den Stickstoff-Sensor fokussiert. Die Lebensdauer eines Stickstoff-Sensors beträgt ca. 20 Jahre. Der YARA N-Sensor® wiegt ca. 15 kg. Das Gehäuse ist aufgebaut aus Fiberglas mit Alugestänge. An jeder Seite befindet sich ein Messkopf (je ca. 3,5 kg) mit Silizium-Detektoren. In der Mitte des Sensors ist die USB-Schnittstelle integriert. (tec5, 2015)

In der Stickstoff-Sensortechnik werden die klassischen Rohstoffe im Leiterplattenbereich eingesetzt wie Tantal, Silber, Gold, etc., dazu Silizium-Detektoren (tec5, 2015). Diese Rohstoffe werden in Größenordnungen von max. wenigen g eingesetzt. Eine exakte Quantifizierung war im Rahmen der Recherche nicht möglich.

Der zukünftige Materialbedarf je spezifischer Einheit wird als konstant angenommen.

2.3.5.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Ausgangspunkt heute:

Der Stickstoff-Sensor ist heute v.a. in Europa und Südamerika (Brasilien) im Markt etabliert. Trotz großflächiger landwirtschaftlicher Nutzflächen in Nordamerika hat die standortspezifische Stickstoffdüngung dort den Markt (noch) nicht durchdrungen. Die Stickstoff-Sensortechnik wird überwiegend von größeren Dünge-Systemdienstleistern in der Landwirtschaft eingesetzt. Somit können sich die Investitionskosten für diese Umwelttechnologie schneller amortisieren. Weltweit sind bisher weniger als 2.000 Stickstoff-Sensoren verkauft. Gegenwärtig beträgt die jährliche globale Verkaufsrate einige hundert Stickstoff-Sensoren. (tec5, 2015)

Zukünftige Entwicklung:

Für die Zukunft erwartet tec5 weiterhin jährliche Absatzmengen von mindestens einigen hundert Stickstoff-Sensoren, wobei die Marktentwicklung schwierig prognostizierbar sind (tec5, 2015).

Unabhängig vom bisher genannten Stickstoff-Sensor schätzen Fachleute die Entwicklungspotentiale im Bereich Precision Farming als sehr vielversprechend ein. Roland Berger geht in einer aktuellen Studie von starken Wachstumsraten im Bereich Precision Farming aus. In der Studie „Business opportunities in Precision Farming: Will big data feed the world in the future?“ wird eine globale Marktentwicklung des Precision Farmings von +12 % CAGR von 2014 bis 2020 angenommen. In Europa wird eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 15 % prognostiziert. (Roland Berger, 2015)

Vor allem der Bereich der präzisen Gülleausbringung wird derzeit in Europa vorangetrieben. Hierbei spielt die ganzheitliche Betrachtung eine große Rolle (Stickstoffgehalt etc. der Gülle sowie des Bodens: Wieviel Dünger muss dem Boden zugeführt werden? Wieviel Nährstoffe werden dem Boden durch die Ernte entnommen?). Für die zukünftige Generation von Precision Farming werden neuartige technologische Komponenten benötigt wie z. B. InGaAs-Detektoren für die Nährstoffbestimmung der Gülle. (tec5, 2015)

2.3.5.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Für die untersuchte Technologie des Stickstoff-Sensors ist ungeachtet fehlender exakter Daten der spezifischen Materialbedarfe je Einheit keine nennenswerte Relevanz festzustellen. Die Leiterplatten-Elektronik inkl. Detektoren enthalten keine spezifischen Materialien im Vergleich zu gewöhnlichen Leiterplatten. Die gegenwärtigen und absehbaren Stückzahlen für Stickstoff-Sensoren lassen im Vergleich zu UTs im Masseneinsatz keine besondere Materialrelevanz erkennen. Daher wird hier von Szenarienberechnungen abgesehen.

2.3.5.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Der Materialbedarf des heutigen Precision Farming (Stickstoff-Sensor) ist nicht relevant im Sinne der Projektziele. Allerdings wird national wie auch global intensiv an der sensorgestützten Gülletechnik geforscht. In der Gülletechnik erfassen die Sensoren Inhaltsstoffe wie Nitrat, Phosphor etc. Für diese Sensortechnologie werden InGaAs-Sensoren eingesetzt. Diese Sensoren enthalten v.a. die Metalle Indium, Gallium und Arsen und sind in dieser Anwendung heute nicht substituierbar (tec 5, 2015).

Heute befindet sich diese Sensortechnologie jedoch noch im Forschungsstadium (z. B. EU-Projekt farmFUSE <http://www.farmfuse.eu/>). Aber es wird damit gerechnet, dass die Erfassung der Inhaltsstoffe (sowohl bei Düngung wie auch Ernte) den Markt in der Landwirtschaft national wie global durchdringen werden, der Zeitpunkt des Markteintritts ist noch ungewiss. Daher sollte in zukünftigen Studien die Umwelttechnologie Precision Farming insgesamt und die damit verbundenen notwendigen Sensor-Technologien nicht außer Acht gelassen werden.

2.3.5.7 Quellen

- Agricon, 2015 Das Werkzeug des modernen Landwirts; abgerufen am 12.10.2015 (<http://www.n-sensor.de/>)
- Andres, 2014 Andres, Florian: Vergleich der Vegetationsindices bestimmt mit dem Yara-N-Sensor und dem AO-GreenSeeker; Bachelorarbeit an der Universität Rostock; Rostock, 2014 (http://www.eurosoft.de/fileadmin/dokumente/agrar-office/bilder/greenseeker/BA_Florian_Andres_05_08_2.pdf)
- Bokelmann et al, 2012 Bokelmann, W.; Doernberg, A.; Schwerdtner, W.; Kuntosch, A.; Busse, M.; König, B.; Siebert, R.; Koschatzky, K.; Stahlecker, T.: Sektorstudie zur Untersuchung des Innovationssystems der deutschen Landwirtschaft; Humboldt-Universität zu Berlin; Mai 2012
- Roland Berger, 2015 Roland Berger Strategy Consultants GmbH: Business opportunities in Precision Farming: Will big data feed the world in the future? July 2015 (http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Business_opportunities_in_precision_farming_20150803.pdf)
- tec5, 2015 persönliches Interview am 16.10.2015 mit Herrn Maik Müller, Vorstand tec5 ; Oberursel
- tec 5, 2014 tec 5 Technology for Spectroscopy: Company information; abgerufen am 15.10.2015 (<http://www.tec5.com/text/46/en/products.html>)
- YARA, 2015 YARA International: N-Sensor; angerufen am 12.10.2015 (<http://www.yara.de/pflanzenernaehrung/tools-und-services/n-sensor/>)

2.3.6 UT Nr. 70: „Sensoren für die Schlackenaufbereitung“

Unter dieser Umwelttechnologie sind Sensoren für die Aufbereitung von Schlacken der Metallurgie und der Müllverbrennung zur Rückgewinnung von Metallen zusammengefasst.

Ausgewählt wurde diese Umwelttechnologie, da nach Wotruba et al.(2013) allein in Deutschland rund 8 Mio. t Hochofenschlacke, 6 Mio. t Stahlwerks- und Elektroofenschlacke sowie 1,3 Mio t Buntmetallhüttenschlacke pro Jahr anfallen, hinzu kommen noch Schlacken und Aschen aus MVA etc. Der weltweite Ausbau der Metallurgiekapazitäten und Verbrennungsanlagen lässt die entsprechenden Rückstände und damit auch das Rückgewinnungspotential von Metallen aus diesen Rückständen steigen.

2.3.6.1 Technologiebeschreibung

In der Schlackenaufbereitung von MVA-Aschen und metallurgischen Schlacken kommt überwiegend die traditionelle Aufbereitungstechnik mit Technologien wie Siebung, Windsichtung, Magnetabscheidung, Wirbelstromabscheidung, Brechen und Alterung zum Einsatz. Sensorgestützte Technologien mit einem möglichen Bedarf an kritischen Metallen sind nicht relevant, weil sie vorwiegend im Bereich größer 3 cm eingesetzt werden. Nach Expertenaussagen wird in der Schlackenaufbereitung hingegen mit kleinen Korngrößen bis zu 13 mm und kleiner gearbeitet. Zukünftige Aufbereitungsverfahren mit einer erhöhten Rückgewinnungsrate werden mit noch kleineren Korngrößen arbeiten. Hierfür werden keine Technologien mit kritischen Materialien zwingend benötigt, weder für die Zerkleinerung noch für die Metallabscheidung.

2.3.6.2 Spezifische Einheit

Da kein spezifischer Materialbedarf identifiziert werden konnte, wurde keine spezifische Einheit definiert.

2.3.6.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Wie in der Technologiebeschreibung dargestellt wurde kein spezifischer Materialbedarf von Technologiemetallen identifiziert.

2.3.6.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Da kein spezifischer Materialbedarf identifiziert werden konnte, wurde die Marktentwicklung nicht untersucht.

2.3.6.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Da kein spezifischer Materialbedarf identifiziert werden konnte, wurde kein Materialbedarf ermittelt.

2.3.6.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es wird kein weiterer Untersuchungsbedarf gesehen, da die Aufbereitungstechniken im Bereich der benötigten kleinen Korngrößen im Bereich der Metallrückgewinnung aus Schlacken derzeit und in absehbarer Zukunft ohne Sensortechniken arbeiten wird.

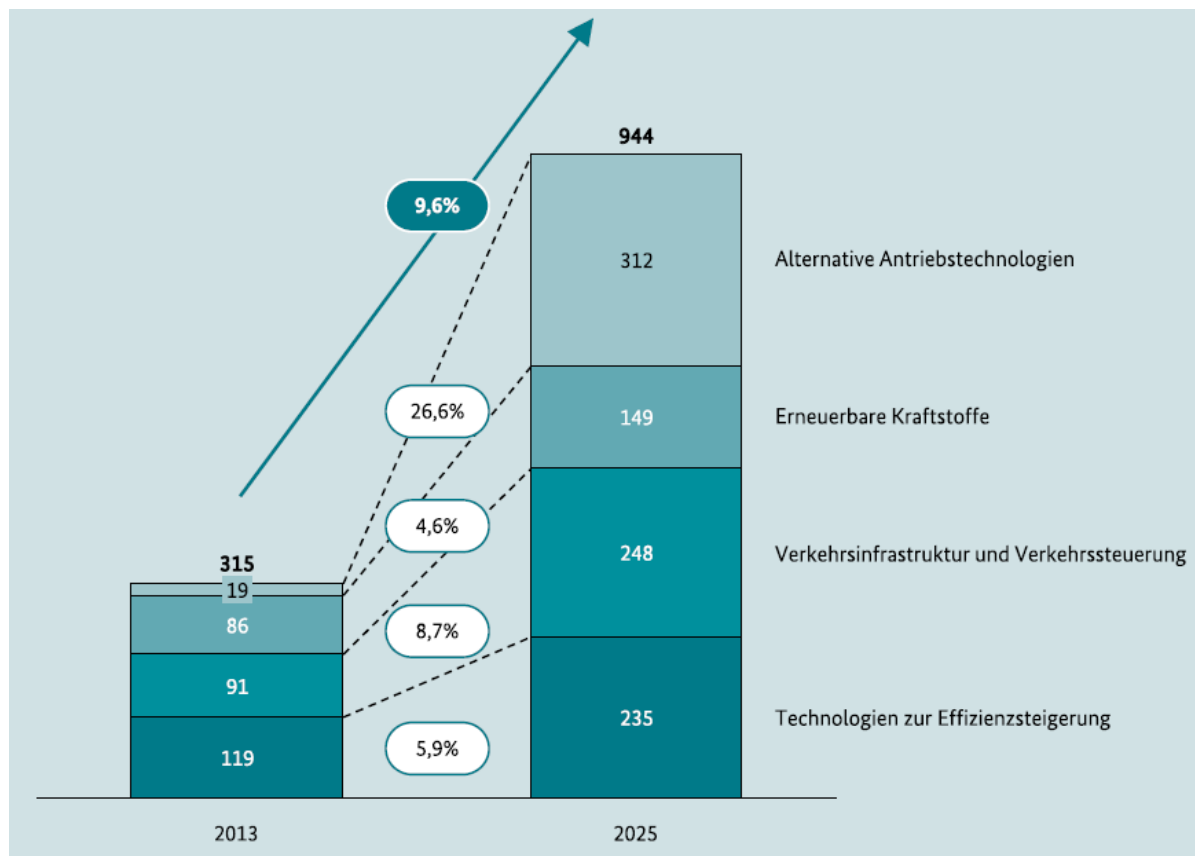
2.3.6.7 Quellen

BMUB 2012	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GreenTech made in Germany 3.0, Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin.
Wotruba et al. 2013	Wotruba, H. et al.: Aufbereitung metallurgischer Schlacken, Recycling und Rohstoffe, Band 6, TK Verlag, Berlin 2013.
Alwast Riemann 2010	Alwast, H. ; Riemann, A.: Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen, UBA-Texte 50/2010
Garth Pretz 2015	Nasse und trockene Entaschung in Abfallverbrennungsanlagen: Ergebnisse eines UFoPlan-Projekts. ATA-Gesprächskreis "Rückgewinnung von Metallen". Präsentation. Ingolstadt, 21.4.2015

2.4 Umwelttechnologien im Leitmarkt Nachhaltige Mobilität

Nach (BMUB 2014) lässt der Leitmarkt Nachhaltige Mobilität mit einer jahresdurchschnittlichen globalen Wachstumsrate von 9,6 % unter allen Leitmärkten die größte Dynamik zwischen 2013-2025 erwarten. Das weltweite Marktvolumen für Nachhaltige Mobilität würde demnach von 315 Mrd. Euro (2013) auf 944 Mrd. Euro (2025) anwachsen. Das Marktsegment Alternative Antriebstechnologien weist mit einer jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate von 26,6 % innerhalb dieses Leitmarktes das größte Potential auf. Erwartet wird, dass der globale Markt für Alternative Antriebstechnologien von 19 Mrd. Euro (2013) auf 312 Mrd. Euro (2025) anwachsen wird (BMUB 2014). Damit wird dieses Marktsegment 2025 das absolut bedeutendste im globalen Leitmarkt Nachhaltige Mobilität sein (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 2-29: Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Nachhaltige Mobilität 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)



Quelle BMUB 2014

Der Weltmarktanteil deutscher Unternehmen am Leitmarkt Nachhaltige Mobilität beträgt 2013 durchschnittlich 17 %. Die Unterschiede einzelner Technologielinien innerhalb dieses Leitmarktes differieren erheblich. So lag beispielsweise der Weltmarktanteil deutscher Unternehmen an der Technologielinie „Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren“ bei 50 %, bei Bioethanol hingegen nur bei 2 % (BMUB 2014). Bei den Technologielinien Elektroantriebe und Hybridantriebe werden für deutsche Unternehmen – ausgehend von niedrigen Anteilen – wachsende Weltmarktanteile erwartet, bei allen anderen Technologielinien im Leitmarkt Nachhaltige Mobilität hingegen stagnierende oder gar fallende Weltmarktanteile (siehe nachfolgende Abbildung).

Abbildung 2-30: Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Nachhaltige Mobilität 2013 und Trend bis 2025

Weltmarktanteile ausgewählter Technologielinien 2013		Trend 2025
Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren	50%	
Leichtbautechnologien	25%	
Durchschnitt Leitmarkt	17%	
Öffentlicher Personennahverkehr	8%	
Elektroantriebe	2%	
Hybridantriebe	2%	
Bioethanol	2%	

 Zugewinn Marktanteil
  Verlust Marktanteil

Quelle: BMUB 2014

2.4.1 UT Nr. 35: „Pedelects“

2.4.1.1 Technologiebeschreibung

Unter dieser Umwelttechnologie sind Pedelects bis 250 Watt zusammengefasst. S-Pedelects und E-Bikes sind ausgenommen, da S-Pedelects nur eine geringe Rolle spielen und E-Bikes hingegen letztlich eine andere Technologie darstellen: sie sind zwar in großen Stückzahlen in Asien verbreitet, werden aber fast ausschließlich mit Bleisäurebatterien mit elektrischer Energie versorgt. Zur Unterscheidung von Pedelect, S-Pedelect und E-Bike: Ein Pedelect (Pedal Electric Cycle) ist mit einem elektromotorischen Antrieb von bis zu 250 Watt ausgestattet, der beim Anfahren oder am Berg den Fahrer unterstützt. Bei zunehmender Geschwindigkeit verringert sich jedoch diese Unterstützung und wird bei Erreichen von 25 km/h unterbrochen. Straßenverkehrsrechtlich gilt das Pedelect als Fahrrad. Schnelle Pedelects (so genannte S-Pedelects) oder E-Bikes fallen aufgrund ihrer höheren Geschwindigkeitsleistung in den Geltungsbereich der Richtlinie EG-Richtlinie 2002/24/EG und sind damit Kraftfahrzeuge. S-Pedelects haben ebenfalls eine tretabhängige Motorunterstützung, die sich aber erst bei 45 km/h abschaltet. Der Motor eines E-Bikes dagegen unterstützt, ohne dass dabei in die Pedale getreten wird – bis zu einer Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h.

Für die Umwelttechnologie Pedelect werden der Elektromotor und die Traktionsbatterie berücksichtigt.

2.4.1.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit ist ein durchschnittliches Pedelect (bis 250W Leistung).

2.4.1.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Pedelecs sind heute üblicherweise mit einer Lithium-Ionenbatterie (NMC) und einem permanenterregten Synchronmotor ausgestattet. Für die Lithium-Ionenbatterien werden u. a. die Metalle Lithium, Mangan, Kobalt, Nickel sowie Kupfer benötigt. Für das Anodenmaterial der Batteriezellen wird heute üblicherweise natürlicher Graphit eingesetzt. Zwar ist synthetischer Graphit ebenfalls möglich, jedoch zurzeit noch zu teuer. Mittlerweile geht der Trend klar zu Lithium-Ionenbatterien (NMC) mit einem reduzierten Nickel- und Kobaltgehalt. Entsprechende Informationen zur Zusammensetzung sind im Rahmen des Projekts LCA-Li-Bat-Recycling (Buchert et al. 2015) zusammengetragen worden. Nach (Accurec 2015) kann von einem Gesamtgewicht für die Pedelec-Batterie von rund 2,85 kg ausgegangen werden. Die Elektromotoren der Pedelecs benötigen für die NeodymEisenBor-Magnete die Seltenerdmetalle Neodym, Praseodym und Dysprosium. Die Daten für die Seltenerdmetalle wurden aus (MORE 2014) entnommen. Dazu wird ebenfalls Kupfer für die Elektromotoren benötigt. Dieser Kupferbedarf wird aus Informationen von (Buchert et al. 2011) abgeleitet. In der nachfolgenden Tabelle sind die Daten der spezifischen Materialbedarfe (je Pedelec) für Materialien, die im Fokus dieser Arbeit stehen, zusammengefasst. Da keine anderen Informationen vorliegen, wurde im Sinne eines konservativen Ansatzes der spezifische Materialbedarf über den Szenariozeitraum nicht verändert.

Tabelle 2-133: Materialbedarf je Pedelec

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Dysprosium	3,25	3,25	3,25
Kobalt	28,8	28,8	28,8
Kupfer	2635	2635	2635
Lithium	34,5	34,5	34,5
Mangan	210,9	210,9	210,9
Natürlicher Graphit	270	270	270
Neodym	79	79	79
Nickel	55,6	55,6	55,6
Praseodym	19,8	19,8	19,8

2.4.1.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Die Verkaufszahlen von Pedelecs haben in den letzten Jahren eindeutig den Massenmarkt in Deutschland erreicht. So wurden bereits im Ausgangsjahr 2013 410.000 Einheiten abgesetzt.¹⁹ Für die Jahre bis 2020 ist nach (Jamerson 2015) mit einem weiteren dynamischen Wachstum im zweistelligen Prozentbereich zu rechnen.

2.4.1.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Diese Daten sind sowohl für das BAU als auch das Green-Economy-Szenario hinterlegt. Ab 2020 bis 2025 wird im BAU-Szenario von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 7 % ausgegangen, im Green-Economy-Szenario hingegen von 10 % jährlich. Ab 2026 bis 2050 wird aufgrund von zu erwartenden Sättigungstendenzen bis 2050 im BAU-Szenario von einem durchschnittlichen jährlichen

¹⁹ <http://www.ebike-news.de/ziv-410-000-verkaufte-e-bikes-im-jahr-2013-plus-8-%-zum-vorjahr/6921/>

Wachstum von 1 % ausgegangen, im Green-Economy-Szenario hingegen im gleichen Zeitraum von 2 % jährlich.

Die resultierenden Einheiten für die jeweiligen Stützjahre der Szenarien sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2-134: Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

NATIONAL					
		BAU-Szenario		Green Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Verkäufe Pedelecs	410.000	1.698.935	2.308.201	1.950.839	3.451.582

Auf globaler Ebene dominieren Europa und USA als Absatzmärkte für Pedelecs; während E-Bikes, die nicht im Betrachtungsfokus dieser Umwelttechnologie liegen, vor allem in Asien dominieren. Nach Daten von (Jamerson 2015) kann für 2013 von einem Absatz von rund 1,329 Mio. Einheiten ausgegangen werden, mit einem klaren Schwerpunkt in Europa. Die mittel- bis langfristigen Wachstumsraten für Pedelecs werden nach diesen Quellen global als sehr dynamisch eingeschätzt (zweistellige Wachstumsraten bis 2035). Danach wird bis 2050 im Rahmen einer Marktberuhigung ein weiteres jährliches Wachstum von 3 % im BAU-Szenario angenommen. Im Green-Economy-Szenario wird von einer noch größeren Wachstumsdynamik über den Szenariozeitraum ausgegangen (10 %-Punkte größeres Wachstum jährlich im Vergleich zum BAU-Szenario). Die dynamische globale Entwicklung für die Umwelttechnologie Pedelecs ist in den zu erwartenden Absatzzahlen für die beiden globalen Szenarien zusammengefasst.

Tabelle 2-135: Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

GLOBAL					
		BAU-Szenario		Green-Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Verkäufe Pedelecs	1.329.000	5.200.000	30.380.365	7.739.715	53.408.415

In den nachfolgenden beiden Tabellen sind die nach den nationalen und globalen Szenarien zu erwartenden absoluten Materialbedarfe für die oben als relevant identifizierten Materialien zusammengefasst. Es wird deutlich, dass bei dieser Umwelttechnologie aufgrund des dynamischen Wachstums sowohl auf nationaler Ebene, aber noch gravierender auf globaler Ebene ein starker Nachfrageanstieg bei den entsprechenden Materialien für die Lithium-Ionenbatterien zu erwarten ist.

Tabelle 2-136: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 35: „Pedelects“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	1,33	5,52	7,50	6,34	11,22
Kobalt	11,8	48,9	66,4	56,2	99,35
Kupfer	1.080	4.477	6.083	5.141	9.096
Lithium	14,2	58,7	80,0	67,4	119
Mangan	86,5	358	487	411	728
Natürlicher Graphit	111	459	623	527	932
Neodym	32,5	135	183	155	274
Nickel	22,8	94,5	128	109	192
Praseodym	8,13	33,7	45,8	38,7	68,4

Tabelle 2-137: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 35: „Pedelects“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	4,32	16,9	98,7	25,2	174
Kobalt	38,3	150	874	223	1.537
Kupfer	3.502	13.703	80.061	20.396	140.746
Lithium	45,9	180	1.049	267	1.845
Mangan	280	1.097	6.407	1.632	11.264
Natürlicher Graphit	359	1.404	8.204	2.090	14.422
Neodym	105	412	2.409	614	4.235
Nickel	73,9	289	1.690	431	2.972
Praseodym	26,3	103	602	153	1.059

2.4.1.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es besteht hier kein besonderer weiterer Untersuchungsbedarf.

2.4.1.7 Quellen

- Accurec 2015 Persönliche Mitteilung Herr Albrecht Melber (Accurec Recycling GmbH) vom 21. August 2015.
- Buchert et al. 2011 Buchert, M. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen (Anhang zum Schlußbericht); Öko-Institut e.V., Daimler AG, Tu Clausthal, Umicore, Förderung durch BMU, Darmstadt 2011.
- Jamerson, F.E.: Electric Bikes Worldwide Reports, Twelfth Edition 2015; www.ebwr.com
- MORE 2014 Bast, U.; Blank, R.; Buchert, M.; Elwert, T. et al.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben - Kennwort: MORE (Motor Recycling), Siemens AG (Konsortialführung) und 7 weitere Partner, gefördert vom BMBF 2015.

2.4.2 UT Nr. 37: „Hybridmotoren“

2.4.2.1 Technologiebeschreibung

Hybridmotoren sind elektrische Antriebsmotoren für sogenannte Hybridfahrzeuge (ganz überwiegend full hybrid). Antriebsmotoren für Plug-in Hybridfahrzeuge sind hier nicht abgedeckt. Hybrid-PKW sind bereits länger und mit größeren Stückzahlen im Markt als vollelektrische PKW. Auch in den diversen PKW-Szenarien spielen Hybrid-PKW mittel- und langfristig eine sehr große Rolle. Die Elektromotoren für Hybrid-PKW sind aufgrund ihres geringen Gewichts und Volumens in der Regel permanent erregte Synchronmotoren mit NeodymEisenBor-Magneten (Buchert et al. 2011, Schüler et al. 2015).

2.4.2.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit ist definiert als Synchronmotor mit Permanentmagnet und einer Leistung < 50 kW je HEV.

2.4.2.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Die Materialzusammensetzung von Elektromotoren für Hybridfahrzeuge ist im BMUB-Projekt „Optum-Ressourcen“ (Buchert et al. 2011) ausführlich hergeleitet und beschrieben worden. Die NeodymEisenBor-Magnete in diesen Motoren wiegen gut 1kg, mit dem gut bekannten Anteil der Seltenerdmetalle (im wesentlichen Neodym und Praseodym im Verhältnis des natürlichen Vorkommens sowie Dysprosium und untergeordnet Terbium zur Sicherstellung der Temperaturstabilität des Magneten und damit der Leistungsfähigkeit des Elektromotors) kann die Zusammensetzung abgeleitet werden. In Spuren ist auch noch Gallium den Magneten zugesetzt. Schließlich darf auch ein größerer Kupferbedarf für die Elektromotoren nicht außer Acht gelassen werden (Buchert et al. 2011). In den letzten Jahren hat es hervorgerufen durch die Preissprünge und Versorgungsdebatten vor allem in den Jahren 2010/2011 bzgl. Seltener Erden eine Reihe von Anstrengungen gegeben den Anteil von Dysprosium (besonders hohe Preise und als besonders kritisch hinsichtlich der Versorgung eingestuft) an den NeodymEisenBor-Magneten zu reduzieren. Hier zeigen sich bereits heute entsprechende Erfolge (Schüler et al. 2015). Daher ist für die Stützjahre 2025/2050 ein geringerer Dysprosiumgehalt und entsprechend ein etwas höherer Neodymgehalt angesetzt worden. Die entsprechenden spezifischen Materialwerte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 2-138 : Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Material (alphabetisch sortiert)	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Dysprosium	90	50	50
Gallium	0,435	0,435	0,435
Kupfer	7000	7000	7000
Neodym	150	190	190
Praseodym	50	50	50
Terbium	10	10	10

2.4.2.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Wie bereits bei der Beschreibung dieser Umwelttechnologie erwähnt, ist für Hybrid-PKW ein dynamisches Marktwachstum zu erwarten. Bereits im Startjahr 2013 wurden bereits rund 25.000 Hybrid-PKW in Deutschland zugelassen.²⁰

Dies gilt für die globale Marktentwicklung der Hybrid-PKW umso mehr, da Hybrid-PKW in wichtigen Märkten wie den USA und Japan bereits viel stärker vertreten sind als in Deutschland.

2.4.2.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Die Szenariodaten für 2025 bzw. 2050 wurden von (Schlesinger et al. 2014) abgeleitet. Sowohl im BAU-Szenario, aber noch viel stärker im Green-Economy-Szenario ist für das Jahr 2025 von deutlich höheren Zulassungszahlen für Hybrid-PKW im Vergleich zu 2013 auszugehen. Für das BAU-Szenario wird demnach im Jahr 2050 eine noch viel größere Zahl an jährlich neu zugelassenen Hybrid-PKW erwartet, im Green-Economy-Szenario hingegen sinkt diese Zahl leicht gegenüber 2025. Die Annahmen in diesem Szenario unterstellen eine viel schnellere Marktdurchdringung an vollelektrischen PKW sowie Plug-in Hybrid-PKW, so dass die „Übergangstechnologie“ Hybrid-PKW hier früher an Marktanteilen verliert.

Tabelle 2-139: Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

NATIONAL					
	2013	BAU-Szenario		Green Economy	
		2025	2050	2025	2050
Gesamte Neuzulassungen	2.952.431	3.325.000	3.325.000	3.325.000	3.325.000
davon Hybrid	25.053	200.000	665.000	540.800	514.700

In der nachstehenden Tabelle sind die Daten für die globalen Szenarien aufgeführt. Ausgehend von rund 2 Mio. Einheiten 2013 (OICA 2015) werden für 2025 bzw. 2050 folgende Zahlen für das BAU-Szenario bzw. für das Green-Economy-Szenario erwartet (IEA 2013).²¹ Auch in den globalen Szenarien sind nach dem Green-Economy-Szenario die jährlichen Neuzulassungen der Hybrid-PKW im Jahr 2025 noch größer als im BAU-Szenario. Allerdings macht sich für die Zahlen der neu zugelassenen Hybrid-PKW im Jahr 2050 im Green-Economy-Szenario aufgrund der stärkeren Marktdurchdringung ambitionierterer Antriebskonzepte (vollelektrische PKW, Brennstoffzellenfahrzeuge usw.) wieder ein Rückgang bemerkbar.

20 http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/n_umwelt_z.html?nn=652326

21 Das BAU-Szenario lehnt sich hierbei an das 4DS (4 degree) Szenario in (IEA 2013) an, das Green-Economy-Szenario entsprechend an das Improve-Szenario in der gleichen Quelle.

Tabelle 2-140: Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

GLOBAL					
		BAU-Szenario		Green Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Gesamte Neuzulassungen	87.595.998	130.000.000	200.000.000	130.000.000	200.000.000
davon Hybrid	2.000.260	12.082.600	61.119.700	21.144.600	30.960.100

In den nachfolgenden Tabellen sind die resultierenden absoluten Materialbedarfe für die nationalen und globalen Szenarien zusammengestellt.

Tabelle 2-141: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 37: „Hybridmotoren“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	2,25	10,0	33,25	27,0	25,7
Gallium	0,011	0,087	0,289	0,235	0,224
Kupfer	175	1.400	4.655	3.786	3.603
Neodym	3,76	38,0	126	103	97,8
Praseodym	1,25	10,0	33,3	27,0	25,7
Terbium	0,251	2,0	6,65	5,41	5,15

Tabelle 2-142: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 37: „Hybridmotoren“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Dysprosium	180	604	3.056	1.057	1.548
Gallium	0,87	5,3	26,6	9,20	13,5
Kupfer	14.002	84.578	427.838	148.012	216.721
Neodym	300	2.296	11.613	4.017	5.882
Praseodym	100	604	3.056	1.057	1.548
Terbium	20,0	121	611	211	310

2.4.2.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es besteht kein besonderer Untersuchungsbedarf zu dieser Umwelttechnologie. Die Datenlage ist ausreichend.

2.4.2.7 Quellen

Buchert et al. 2011 Buchert, M. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen (Anhang zum Schlußbericht); Öko-Institut e.V., Daimler AG, TU Clausthal, Umicore, Förderung durch BMU, Darmstadt 2011.

- IEA 2013 International Energy Agency: Global transport outlook to 2050. Targets and scenarios for a low-carbon transport sector; John Dulac
(https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdmobility/DULAC_23052013.pdf).
- OICA 2015 Weltautomobilverband: 2013 production Statistics (<http://www.oica.net/category/production-statistics/2013-statistics/>), abgerufen am 21.10.2015
- Schlesinger et al. 2014 Schlesinger et al.: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognosen. Endbericht, Juni 2014, Basel/Köln/Osnabrück; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG, GWS (Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH), EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln)
- Schüler et al. 2015. Schüler, D.; Schleicher, T.; Jenseit, W.; Degreif, S.; Buchert, M. (Öko-Institut) Substitution of critical raw materials in permanent magnets in wind turbines and electric vehicles, and in phosphors and LEDs for lighting

2.4.3 UT Nr. 38: „Elektroantriebsmotoren“

2.4.3.1 Technologiebeschreibung

Unter dieser Umwelttechnologie sind Elektroantriebsmotoren für vollelektrische PKW („Elektrofahrzeuge“ oder BEV), Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sowie für Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) zusammengefasst. Letztere verfügen neben einem Verbrennungsmotor über einen Elektromotor, der von einer Batterie mit Ladeanschluß („Plug-in“) gespeist wird. Vor allem bei den Elektromotoren für vollelektrische PKW existieren bereits sehr unterschiedliche Motorkonzepte. Diese Umwelttechnologie fokussiert jedoch auf permanent erregte Synchronmotoren mit NeodymEisenBor-Magneten (Buchert et al. 2011, Schüler et al. 2015).

2.4.3.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit ist definiert als Synchronmotor mit Permanentmagnet und einer Leistung >50kW je PHEV/BEV/FCEV.

2.4.3.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Die Materialzusammensetzung von Elektromotoren für BEV/PHEV/FCEV ist im BMUB-Projekt „Optum-Ressourcen“ (Buchert et al. 2011) ausführlich hergeleitet und beschrieben worden. Die NeodymEisenBor-Magnete in diesen Motoren wiegen rund 2,4 kg. Mit dem gut bekannten Anteil der Seltenen Erdmetalle (im wesentlichen Neodym und Praseodym im Verhältnis des natürlichen Vorkommens sowie Dysprosium und untergeordnet Terbium zur Sicherstellung der Temperaturstabilität des Magneten und damit der Leistungsfähigkeit des Elektromotors) kann die Zusammensetzung abgeleitet werden. In Spuren ist auch noch Gallium den Magneten zugesetzt. Schließlich darf auch ein größerer Kupferbedarf für die Elektromotoren nicht außer Acht gelassen werden (Buchert et al. 2011). In den letzten Jahren hat es durch die Preissprünge und Versorgungsdebatten vor allem in den Jahren 2010/2011 bzgl. Seltener Erdmetalle eine Reihe von Anstrengungen gegeben den Anteil von Dysprosium (besonders hohe Preise und als besonders kritisch hinsichtlich der Versorgung eingestuft) an den NeodymEisenBor-Magneten zu reduzieren. Hier zeigen sich bereits heute entsprechende Erfolge (Schüler et al. 2015). Daher ist für die Stützjahre 2025/2050 ein geringerer Dysprosiumgehalt und entsprechend ein etwas höherer Neodymgehalt angesetzt worden. Die entsprechenden spezifischen Materialwerte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 2-143: Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Dysprosium	210	120	120
Gallium	1	1	1
Kupfer	12600	12600	12600
Neodym	360	450	450
Praseodym	120	120	120
Terbium	24	24	24

2.4.3.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Im Startjahr 2013 wurden in Deutschland nur gut 7000 PHEV/BEV zugelassen; Brennstoffzellenfahrzeuge spielten noch keinerlei Rolle am Markt.²² Allerdings wird nicht zuletzt aufgrund der umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsförderung durch die Politik sowie den entsprechenden Anstrengungen durch die PKW-Hersteller in den nächsten Jahren mit steigenden Zulassungszahlen an PHEV/BEV und auch FCEV gerechnet. Dies gilt umso mehr für die zu erwartende globale Marktentwicklung für PHEV/BEV/FCEV. So werden BEV in der Volksrepublik China stark forciert, in Japan in jüngster Zeit nicht zuletzt FCEV.

2.4.3.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Die Szenariodaten für 2025 bzw. 2050 wurden von (Schlesinger et al. 2014) abgeleitet. Sowohl im BAU-Szenario, aber noch viel stärker im Green-Economy-Szenario ist für das Jahr 2025 von deutlich höheren Zulassungszahlen für PHEV/BEV/FCEV im Vergleich zu 2013 auszugehen.

Tabelle 2-144: Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

NATIONAL					
		BAU-Szenario		Green-Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Gesamte Neuzulassungen	2.952.431	3.325.000	3.325.000	3.325.000	3.325.000
Davon PHEV + FCEV + BEV	7.436	266.000	1.031.000	618.000	2.528.700

In der nachstehenden Tabelle sind die Daten für die globalen Szenarien aufgeführt. Ausgehend von rund 180.000 Einheiten 2013 (OICA 2015) werden für 2025 bzw. 2050 folgende Zahlen für das BAU-Szenario bzw. für das Green-Economy-Szenario erwartet (IEA 2013).²³ Auch in den globalen Szenarien sind nach dem Green-Economy-Szenario die jährlichen Neuzulassungen der PHEV/BEV/FCEV im Jahr 2025 noch größer als im BAU-Szenario. Dieser Trend setzt sich verstärkt fort wie die Zahlen für die jährlichen Neuzulassungen im Jahr 2050 zeigen. Im Green-Economy-Szenario deckt die Gruppe der PHEV/BEV/FCEV gut 75 % aller PKW-Neuzulassungen ab.

²² http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/n_umwelt_z.html?nn=652326

²³ Das BAU-Szenario lehnt sich hierbei an das 4DS (4 degree) Szenario in (IEA 2013) an, das Green-Economy-Szenario entsprechend an das Improve-Szenario in der gleichen Quelle.

Tabelle 2-145: Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

GLOBAL					
		BAU-Szenario		Green Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Gesamte Neuzulassungen	87.595.998	130.000.000	200.000.000	130.000.000	200.000.000
Davon PHEV + FCEV + BEV	178.623	4.530.900	31.946.600	24.165.200	152.100.500

Der abgeleitete absolute Materialbedarf national wie global wird in den folgenden Tabellen ausgewiesen.

Tabelle 2-146: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 38: „Elektroantriebsmotoren“

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

Tabelle 2-147: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 38: „Elektroantriebsmotoren“

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

2.4.3.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es besteht kein besonderer Untersuchungsbedarf zu dieser Umwelttechnologie. Die Datenlage ist ausreichend.

2.4.3.7 Quellen

Buchert et al. 2011 Buchert, M. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen (Anhang zum Schlußbericht); Öko-Institut e.V., Daimler AG, TU Clausthal, Umicore, Förderung durch BMU, Darmstadt 2011.

- IEA 2013 International Energy Agency: Global transport outlook to 2050. Targets and scenarios for a low-carbon transport sector; John Dulac
(https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdmobility/DULAC_23052013.pdf).
- OICA 2015 Weltautomobilverband: 2013 production Statistics (<http://www.oica.net/category/production-statistics/2013-statistics/>), abgerufen am 21.10.2015
- Schlesinger et al. 2014 Schlesinger et al.: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognosen. Endbericht, Juni 2014, Basel/Köln/Osnabrück; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG, GWS (Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH), EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln)
- Schüler et al. 2015. Schüler, D.; Schleicher, T.; Jenseit, W.; Degreif, S.; Buchert, M. (Öko-Institut) Substitution of critical raw materials in permanent magnets in wind turbines and electric vehicles, and in phosphors and LEDs for lighting

2.4.4 UT Nr. 39: „Karosserie“

Leichtere Karosserien sind ein wichtiger Beitrag zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von PKW. Sowohl der globale Markt hierfür als auch die Relevanz deutscher Firmen ist sehr groß.

2.4.4.1 Technologiebeschreibung

Diese Umwelttechnologie umfasst die Leichtbauweise von PKW mit hochfesten / ultrahochfesten Stählen. Es wird sich auf die hochfesten / ultrahochfesten Stähle fokussiert, da dies die am weitesten verbreitete Karosserieform im PKW-Bereich darstellt. Karosserien aus Kunststoff, Aluminium, GFK und CFK werden daher nicht tiefer betrachtet.²⁴ Mit einer leichteren Bauweise durch den Einsatz von hochfesten Stählen ist ein geringer Energieverbrauch im Betrieb des PKW verbunden. Insbesondere bei hochpreisigen Kraftfahrzeugen wurde immer schon mit Alternativen zum konventionellen Karosseriestahl und zu Stahlblechen gearbeitet.

2.4.4.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit wurde als 300 kg Karosserie eines PKW durchschnittlicher Größe definiert.

2.4.4.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Relevante Metalle der hochfesten und ultrahochfesten Stähle in der Karosserie sind Mangan und Silizium. In einer durchschnittlichen Pkw-Karosserie von 300 kg sind 1.800 g Mangan und 330 g Silizium enthalten. Wie in folgender Tabelle dargestellt, wird der Materialbedarf von Mangan und Silizium je Karosserie für die Jahre 2025 und 2050 konstant angenommen. (Schmid, 2015)

Tabelle 2-148: Bedarf Mangan und Silizium in einem durchschnittlichen PKW (spezifische Einheit) 2013, 2025, 2050

Material	2013 (Angabe in g je spez. Einheit)	2025 (Angabe in g je spez. Einheit)	2050 (Angabe in g je spez. Einheit)
Mangan	1.800	1.800	1.800
Silizium	330	330	330

24 Die Kunststoffkarosserie hat sich bisher nicht durchgesetzt, wohingegen Aluminium bei hochpreisigen Autos (Audi A8) häufiger verwendet wird (Automobil-Industrie o.J.). Deutliche Einsparungen versprechen Carbon-Karosserien, wie sie für den BMW i3 völlig neu entwickelt wurden. Es ist nicht absehbar, dass diese Spezialkarosserien einen entscheidenden Marktanteil erzielen.

2.4.4.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Der Einsatz von hochfesten und ultrahochfesten Stählen in der Pkw-Karosserie hat sich in den vergangenen Jahren etabliert. Beispielsweise bestehen ca. 70 % der Bleche der Rohbaukarosserie des Mercedes-Benz E-Klasse aus hoch- und ultrahochfesten Stahllegierungen (Daimler, 2015), die Karosserie des Opel Astra J zu 66 % (Wirtschaftsingenieur, 2011). In den vergangenen fünf Jahren ist der Anteil der hochfesten Stähle in der Karosserie von ca. 50 % in 2010 auf 70 % in 2015 angestiegen (Schmid, 2015).

Die großen Automobilkonzerne sind internationale „Global Player“ und setzen ihre Produkte weltweit ab. Daher wird der Anteil der Karosserien mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im nationalen Szenario gleich dem globalen Szenario prognostiziert.

Basis-Szenario

Im Basis-Szenario wird von einem weiterhin steigenden Einsatz der hoch- und ultrahochfesten Stähle ausgegangen. Das Basisjahr 2013 wird mit einem Einsatz von 60 % hoch- / ultrahochfesten Stählen definiert. Die Stützjahre 2025 und 2050 sind mit einem Einsatz von 90 % in 2025 und 100 % in 2050 prognostiziert. Es ist nicht absehbar, dass die Spezialkarosserien wie Aluminium oder Carbonfaser einen entscheidenden Marktanteil erzielen. Daher wird für die Szenarienberechnung vereinfacht von einem 100 %igen Einsatz der hoch- und ultrahochfesten Stähle ausgegangen.

Tabelle 2-149: Annahmen zur nationalen Pkw-Zulassung und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Basisszenario für 2013, 2015, 2050

Nationales Basis-Szenario	2013	2025	2050
Nationale Pkw-Neuzulassungen (nach KBA 2015 und Schlesinger et al 2014)	2 950 000	3 325 000	3 325 000
Anteil hoch-&ultrahochfeste Stähle auf dem Markt	60 %	90 %	100 %
Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen (national)	1 770 000	2 992 500	3 325 000

Tabelle 2-150: Annahmen zur globalen Pkw Produktion und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Basisszenario für 2013, 2015, 2050

Globales Basis-Szenario	2013	2025	2050
Globale Pkw-Produktion (nach OICA und IEA 2013)	87 595 998	130 000 000	200 000 000
Anteil hoch-&ultrahochfeste Stähle auf dem Markt	60 %	90 %	100 %
Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen (global)	52 557 599	117 000 000	200 000 000

Green Economy Szenario

Im Green-Economy entspricht die jeweilige Anzahl der verkauften / produzierten Pkw für 2013, 20205 und 2050 dem Basis-Szenario. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Antriebstechnologien der Pkw ändern, die Absatzmenge der Pkw aber analog dem Basis-Szenario steigt. Für die Umwelttechnologie der Karosserie wird prognostiziert, dass sich die hoch- und ultrahochfesten Stähle bereits bis 2025 zu 100 % in den Neuwagen durchsetzen.

Tabelle 2-151: Annahmen zur nationalen Pkw-Zulassung und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Green-Economy-Szenario für 2013, 2015, 2050

Nationales Green-Economy-Szenario	2013	2025	2050
Nationale Pkw-Neuzulassungen (nach KBA 2015 und Schlesinger et al 2014)	2 950 000	3 325 000	3 325 000
Anteil hoch-&ultrahochfeste Stähle auf dem Markt	60 %	100 %	100 %
Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen (national)	1 770 000	3 325 000	3 325 000

Tabelle 2-152: Annahmen zur globalen Pkw-Produktion und Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen im Green-Economy-Szenario für 2013, 2015, 2050

Globales Green-Economy-Szenario	2013	2025	2050
Globale Pkw-Produktion (nach OICA und IEA 2013)	87 595 998	130 000 000	200 000 000
Anteil hoch-& ultrahochfeste Stähle auf dem Markt	60 %	100 %	100 %
Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen (global)	52 557 599	130 000 000	200 000 000

2.4.4.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Bei der Szenario-Berechnung wird auf die Anzahl verkaufter PKW mit hoch- und ultrahochfesten Stählen zurückgegriffen. Die Herleitung der Neuwagen mit hoch- und ultrahochfesten Stählen sowie der spezifische Materialbedarf sind in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt. Daraus ergibt sich der absolute nationale wie globale Materialbedarf (siehe folgende Tabellen).

Tabelle 2-153: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 39: „Karosserie“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Mangan	3.186	5.387	5.985	5.985	5.985
Silizium (Metall)	584	988	1.097	1.097	1.097

Tabelle 2-154: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 39: „Karosserie“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Mangan	94.604	210.600	360.000	234.000	360.000
Silizium (Metall)	17.344	38.610	66.000	42.900	66.000

2.4.4.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es besteht kein besonderer Untersuchungsbedarf zu dieser Umwelttechnologie.

2.4.4.7 Quellen

- Daimler, 2015 Karosserie als Sicherheitsfaktor: Höchsthochste Materialien, (<http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210222-49-1210365-1-0-0-1210342-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html>) abgerufen am 25.8.2015
- IEA 2013 International Energy Agency: Global transport outlook to 2050. Targets and scenarios for a low-carbon transport sector; John Dulac (https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdmobility/DULAC_23052013.pdf).
- KBA 2015 Jahresbilanz der Neuzulassungen 2014 (http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_node.html) abgerufen am 21.10.2015
- OICA 2015 Weltautomobilverband: 2013 production Statistics (<http://www.oica.net/category/production-statistics/2013-statistics/>), abgerufen am 21.10.2015
- Schlesinger et al. 2014 Schlesinger et al.: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognosen. Endbericht, Juni 2014, Basel/Köln/Osnabrück; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG, GWS (Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH), EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln)
- Schmid, 2015 Telefonisches Interview mit Herrn Schmid (VW), 28.8.2015
- Wirtschaftsingenieur, 2011 www.der-wirtschaftsingenieur.de Hochfester Stahl als Konstruktionswerkstoff, veröffentlicht am 15.7.2011 (<http://www.der-wirtschaftsingenieur.de/index.php/hochfester-stahl-als-konstruktionswerkstoff/>) abgerufen am 25.8.2015

2.4.5 UT Nr. 40: „Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke“

2.4.5.1 Technologiebeschreibung

Unter dieser Umwelttechnologie sind neue, hocheffiziente, verbrauchsarme Triebwerke zusammengefasst. Der Triebwerksentwicklung kommt bei der Reduzierung von Emissionen, Treibstoffverbrauch und Lärmbelastung eine entscheidende Bedeutung zu. Werkstofflösungen wie neue Superlegierungen spielen hier eine entscheidende Rolle (VDI 2014).

2.4.5.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit wurden zwei Triebwerke eines durchschnittlichen Passagierflugzeugs (A320 bzw. B737) festgelegt.

2.4.5.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

In Flugzeugtriebwerken finden eine Reihe von Materialien Verwendung (VDI 2014). Allerdings gilt für die Triebwerke wie für den gesamten Flugzeugbau, dass Titan mit seinen besonderen Eigenschaften (leicht bei hohen Festigkeiten usw.) eine besonders dynamische und dominante Rolle eingenommen hat. So enthalten die aktuellen Modelle A320neo sowie B737max inzwischen ca. 12Gew% Titan (Leach 2015). Dies entspricht bei einem Leergewicht von rund 40 t²⁵ 4.800 kg Titan je Flugzeug, welcher hier als spezifische Einheit verwendet wird. Nach (Froes 2015) entfallen deutlich mehr als 50 % des verbauten Titans auf die Triebwerke. Ein für diese Flugzeugtypen repräsentatives CFM-56 Triebwerk hat 1500 kg Titan; d. h. bei 2 Triebwerken je Flugzeug entfallen 3.000 kg auf diese Komponente, die restlichen ca. 1.800 kg Titan werden für den Flugzeugrumpf benötigt. Für diese Umwelttechnologie wird auf das dominante Material Titan fokussiert. Für die Triebwerke wird für die Zukunft von einem konstanten spezifischen Titanbedarf ausgegangen.

25 http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a320_dt.php sowie http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_7378_dt.php

Tabelle 2-155: Spezifischer Rohstoffbedarf UT Nr. 40 „Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke“

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Titan	3.000.000	3.000.000	3.000.000

2.4.5.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Für die Flugzeugbranche wird nicht zuletzt durch zunehmende Globalisierungstendenzen auf allen Ebenen von einem anhaltenden dynamischen Wachstum ausgegangen (Zimm 2015). So wurden global im Jahr 2013 440 B737 sowie 493 A320 verkauft; also 933 Flugzeuge des hier betrachteten im Markt dominanten Mittelstreckentyps. Nach einer Projektion von (Zimm 2015) kann für das Jahr 2025 eine Verkaufszahl von zusammen 1.120 Einheiten B737 bzw. A320 erwartet werden. Für 2050 wurde die Wachstumsrate zwischen 2013 und 2025 linear fortgeschrieben und auf diese Weise eine Verkaufszahl von 1.600 Einheiten für 2050 erhalten. Für die nationalen Zahlen wurde ein 10 %-Anteil für Deutschland bezogen auf die globalen Daten abgeschätzt. Für diese Umwelttechnologie werden keine Unterschiede zwischen BAU- sowie Green-Economy-Szenario angenommen.

2.4.5.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

In den beiden folgenden Tabellen ist der resultierende Bedarf an Titan für die nationalen und globalen Szenarien zusammengefasst.

Tabelle 2-156: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 40: „AC-Triebwerke“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Titan	279	336	480	336	480

Tabelle 2-157: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 40: „AC-Triebwerke“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Titan	2.799	3.360	4.800	3.360	4.800

2.4.5.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die Quellen- und Datenlage für diese Umwelttechnologie ist gut. Es besteht daher in dieser Hinsicht kein weiterer Untersuchungsbedarf.

2.4.5.7 Quellen

Froes 2015 Froes, F. H.: Titanium Physical Metallurgy, Processing and Applications, ASM International®

Materials Park, Ohio 44073-0002; asminternational.org, USA 2015.

Leach 2015 Leach, W.: Titanium Demand and Trends in the Airframe Market, ATI Specialty Materials, International Titanium Conference, Orlando, USA, 5. Oktober 2015.

VDI 2014 Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung, Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Düsseldorf, März 2014.

Zimm 2015 Zimm, P.: Aerospace Production & Supply Chain Outlook, ICF International, International Titanium Conference, Orlando, USA, 5. Oktober 2015.

2.4.6 UT Nr. 41: „Leichtbau – Titan und Sc.-Airframe“

2.4.6.1 Technologiebeschreibung

Unter dieser Umwelttechnologie werden Titan- und Scandiumlegierungen für den Leichtbau von Flugzeugen zusammengefasst. Flugzeuge werden üblicherweise aus Aluminium gebaut. Neben kohlefaser-verstärkten Kunststoffen (CFK) sind Titan- und Scandiumlegierungen interessante Optionen zur Gewichtsreduktion in Flugzeugen.

2.4.6.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit ist definiert als ein durchschnittliches Passagierflugzeug (A 320 bzw. Boeing 737).

2.4.6.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Scandiumlegierungen haben im Flugzeugbau bislang noch keinen Einzug gehalten. Sie sind für die Anwendung Flugzeugbau trotz sehr interessanter Eigenschaften (u. a. niedrige Dichte: 2.985 g/cm³;) bislang noch nicht aus dem Forschungs- und Entwicklungsstadium hinausgetreten (VDI 2014). Dies liegt vor allen an dem bislang sehr niedrigen globalen Angebot von der Produktionsseite (Experten schätzen eine globale Größenordnung von 5 – 15 t zur Zeit) verbunden mit einem sehr hohen Preislevel für Scandium im Bereich von 5 bis 10 Mio. USD je Tonne Scandium (Castilloux 2015). Da der Einzug von Scandiumlegierungen in den kommerziellen Flugzeugbau derzeit nicht absehbar ist, wird Scandium hier nicht weiter betrachtet.

Titanlegierungen haben eine große Bedeutung im Flugzeugbau erlangt (Froes 2015). So enthalten die aktuellen Modelle A320neo sowie B737max inzwischen ca. 12Gew% Titan (Leach 2015). Dies entspricht bei einem Leergewicht von rund 40 t²⁶ 4.800 kg Titan je Flugzeug, welcher hier als spezifische Einheit verwendet wird. Nach (Froes 2015) entfallen auf die Triebwerke deutlich mehr als 50 % des verbauten Titans auf die Triebwerke. Ein für diese Flugzeugtypen repräsentatives CFM-56 Triebwerk hat 1.500 kg Titan; d. h. bei zwei Triebwerken je Flugzeug entfallen 3.000 kg auf diese Komponente.

Daher wird von rund 1.800 kg Titan für den Flugzeugrumpf ausgegangen. Für diesen wird für die Zukunft von einem konstanten spezifischen Titanbedarf ausgegangen.

Tabelle 2-158: Spezifischer Rohstoffbedarf für UT Nr. 41 „Leichtbau – Titan und Sc.-Airframe“

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Titan	1.800.000	1.800.000	1.800.000

2.4.6.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Für die Flugzeugbranche wird nicht zuletzt durch zunehmende Globalisierungstendenzen auf allen Ebenen von einem anhaltenden dynamischen Wachstum ausgegangen (Zimm 2015). So wurden global im Jahr 2013 440 B737 sowie 493 A320 verkauft; also 933 Flugzeuge des hier betrachteten im Markt dominanten Mittelstreckentyps. Nach einer Projektion von (Zimm 2015) kann für das Jahr 2025 eine Verkaufszahl von zusammen 1.120 Einheiten B737 bzw. A320 erwartet werden. Für 2050 wurde die Wachstumsrate zwischen 2013 und 2025 linear fortgeschrieben und auf diese Weise eine Verkaufszahl von 1.600 Einheiten für 2050 erhalten. Für die nationalen Zahlen wurde ein 10 %-Anteil für Deutschland bezogen auf die globalen Daten abgeschätzt. Für diese Umwelttechnologie werden keine Unterschiede zwischen BAU- sowie Green-Economy-Szenario angenommen.

26 http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a320_dt.php sowie http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_7378_dt.php

2.4.6.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

In den beiden folgenden Tabellen ist der resultierende Bedarf an Titan für die nationalen und globalen Szenarien zusammengefasst.

Tabelle 2-159: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 41: „Leichtbau“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Titan	167	202	288	202	288

Tabelle 2-160: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 41: „Leichtbau“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Titan	1.679	2.016	2.880	2.016	2.880

2.4.6.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die Quellen- und Datenlage für diese Umwelttechnologie ist gut. Es besteht daher in dieser Hinsicht kein weiterer Untersuchungsbedarf.

2.4.6.7 Quellen

- Castilloux 2015 Castilloux, R.: Why Everyone Is Talking About Scandium; The Gold Report, 4. Mai 2015; abgerufen am 21.11.2015 <http://www.mining.com/web/why-everyone-is-talking-about-scandium-ryan-castilloux/>
- Froes 2015 Froes, F. H.: Titanium Physical Metallurgy, Processing and Applications, ASM International®
- Materials Park, Ohio 44073-0002; asminternational.org, USA 2015.
- Leach 2015 Leach, W.: Titanium Demand and Trends in the Airframe Market, ATI Specialty Materials International Titanium Conference, Orlando, USA, 5. Oktober 2015.
- VDI 2014 Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung, Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Düsseldorf, März 2014.
- Zimm 2015 Zimm, P.: Aerospace Production & Supply Chain Outlook, ICF International, International Titanium Conference, Orlando, USA, 5. Oktober 2015.

2.4.7 UT Nr. 43. „Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren“

2.4.7.1 Technologiebeschreibung

Hier werden alle Fahrzeugabgaskatalysatoren (für PKW) subsummiert: der klassische geregelte Drei-Wege-Katalysator für Ottomotoren, Dieseloxydationskatalysatoren, NO_x-Speicherkatalysatoren als auch SCR-Katalysatoren (mit Harnstoffeindüsung). Die wichtigsten eingesetzten Technologiemetalle sind Palladium, Platin, Rhodium und Cer. Die katalytisch aktiven Platingruppenmetalle Palladium, Platin und Rhodium sind in den sogenannten Washcoat eingebunden, der auf einem temperaturstabilen Wabenkörper aus Keramik aufgetragen ist (Hagelücken 2005). Bzgl. der Edelmetallbeschichtung gibt es nicht die „eine“ Zusammensetzung; vielmehr sind je nach Motorentyp (Diesel, Otto), Hubraumklasse, Euronorm und nicht zuletzt Katalysatorhersteller eine Vielzahl von Zusammensetzungen an Platin, Palladium und Rhodium auf dem Markt (Hagelücken 2005). Das Seltenerdmetall Cer ist in Form von Cer(IV)-oxid als Bestandteil des Washcoats eingebunden und unterstützt nachhaltig die Effizienz des Autoabgaskatalysators (Bleiwas 2013).

2.4.7.2 Spezifische Einheit

Als spezifische Einheit wird ein durchschnittlicher Autoabgaskatalysator (für PKW) festgelegt.

2.4.7.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Zum Materialbedarf der Technologiemetalle von Autoabgaskatalysatoren ist die Quellen- und Datenlage gut. Der durchschnittliche Cergehalt je Autoabgaskatalysator konnte aus der umfangreichen und aktuellen Arbeit von (Bleiwas 2013) ermittelt werden. Der Durchschnittsgehalt an Cer beträgt demnach 65 g (bereits umgerechnet auf Cer als Metall). Der durchschnittliche PGM-Gehalt beträgt nach (Antrekowitsch et al. 2012) zurzeit 4 g PGM je Autoabgaskatalysator. Diese Größenordnung wurde von (Umicore 2015) bestätigt. Da Entwicklungen zu tendenziell geringerer PGM-Beladung durch gegenläufige Entwicklungen wie größeren Hubraum und schärfere Abgaswerte egalisiert werden, kann für die Szenarien von konstanten durchschnittlichen Beladungen auch in Zukunft ausgegangen werden. Das durchschnittliche Mengenverhältnis von Platin, Palladium und Rhodium für das Segment Autoabgaskatalysatoren konnte durch Daten aus (JM Interim 2013) gut ermittelt werden. In der folgenden Tabelle finden sich die Daten der Materialbedarfe je spezifischer Einheit (PKW-Autoabgaskatalysator). Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass es sich für die PGM um Bruttobedarfsdaten handelt, ein wachsender Anteil wird durch Recycling von PGM abgedeckt. Die Daten hierzu sind gut dokumentiert (JM Interim 2013). Recycling von Cer aus Autoabgaskatalysatoren findet allerdings noch nicht statt (Bleiwas 2013).

Tabelle 2-161: Spezifischer Rohstoffbedarf für UT Nr. 43 „Fahrzeug-Abgas-Katalysator“

Material	2013 [Angabe in g]	2025 [Angabe in g]	2050 [Angabe in g]
Cer	65	65	65
Palladium	2,6	2,6	2,6
Platin	1,1	1,1	1,1
Rhodium	0,3	0,3	0,3

2.4.7.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Sowohl die nationale als auch die globale Marktentwicklung von Autoabgaskatalysatoren hängt maßgeblich von zwei Megatrends im Automobilsektor ab. Diese beiden Megatrends sind die Entwicklung der neu zugelassenen PKW absolut und die Entwicklung des Anteils von PKW, welche einen Autoabgaskatalysator zur Schadstoffminimierung benötigen. Folgende Antriebstypen benötigen im PKW-Bereich einen Autoabgaskatalysator: klassischer Verbrennungsmotor (Benzin bzw. Diesel), PKW mit Erdgasmotor, PKW mit Flüssiggasantrieb, Hybridfahrzeuge (HEV), Plug-in-Hybride sowie Range-Extender (PHEV, REX). Umgekehrt können nur die Antriebstypen vollelektrische PKW (BEV) sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) auf Autoabgaskatalysatoren verzichten. Vor dem Hintergrund weltweit steigender PKW-Absatzzahlen und dem Sachverhalt, dass bislang der Einstieg in die Elektromobilität nur recht verhalten erfolgt, ist auf globaler Ebene mit einer weiteren Dynamik beim Bedarf von Autoabgaskatalysatoren zu rechnen. In Deutschland ist hingegen je nach Tempo der Marktdurchdringung von vollelektrischen PKW sowie Brennstoffzellen-PKW tendenziell mit einer rückläufigen Dynamik bzgl. Autoabgaskatalysatoren zu rechnen, da die PKW-Neuzulassungen in Deutschland über die Jahre eher konstant bleiben dürften.

Im nächsten Abschnitt werden auf Basis externer PKW-Szenarien die nationalen und globalen Materialbedarfe für Autoabgaskatalysatoren quantifiziert.

2.4.7.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

In der nachfolgenden Tabelle sind die Szenarioannahmen hinsichtlich der unterschiedlichen Entwicklungen der PKW-Zulassungen in Deutschland nach dem BAU-Szenario und dem Green-Economy-Szenario aufgeführt. Für das Startjahr 2013 konnte auf die Statistik des Kraftfahrzeugbundesamtes²⁷ zurückgegriffen werden. Für die Entwicklungen im Jahr 2025 bzw. 2050 wurde auf die aktuelle Quelle Schlesinger et al. 2014 gesetzt. Es zeigt sich nach dem BAU-Szenario, dass trotz deutlicher Veränderungen des Mixes der Antriebstypen hin zu Elektromobilität noch sehr viele Fahrzeuge (bis auf BEV und Fuel Cell) mittelfristig (2025) aber auch langfristig (2050) mit Autoabgaskatalysatoren ausgestattet sein werden. Dies gilt auch für das hinsichtlich Marktdurchdringung der Elektromobilität ambitioniertere Green-Economy-Szenario, allerdings im geringeren Ausmaß.

Tabelle 2-162: Nationale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

NATIONAL					
		BAU-Szenario		Green Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Gesamte nationale Neuzulassungen	2.952.431	3.325.000	3.325.000	3.325.000	3.325.000
davon Hybrid	25.053	200.000	665.000	540.813	514.711
Plug-In + REX	1.385	100.000	333.000	386.295	1.171.011
BEV + Fuel Cell	6.051	166.000	698.000	231.777	1.357.659
Verbrenner + Gas	2.919.989	2.860.000	1.629.000	2.166.114	281.618
Verbrenner + Gas + Hybrid + PlugIn-Hybrid + REX	2.938.592	2.960.000	1.962.000	3.015.964	1.897.153

Für die globalen Szenarien wurden die Zahlen der PKW-Zulassungen nach den Szenarien in (IEA 2013) gebildet. Beide Szenarien (BAU und Green Economy) gehen danach von einem weiteren deutlichen Anstieg der absoluten globalen PKW-Zulassungen aus. Im globalen BAU-Szenario ist demnach bis 2050 im Vergleich zu 2013 mit einem erheblichen Anstieg der jährlichen Neuzulassungen von PKW, die mit einem Abgaskatalysator ausgestattet sein müssen, zu rechnen. Im Green-Economy-Szenario wächst die Zahl dieser PKW bis 2025 ebenfalls noch (allerdings weniger stark als im BAU-Szenario). Bis 2050 ist hier jedoch ein leichter Rückgang gegenüber 2025 festzustellen, da die Marktdurchdringung der Elektromobilität dann den Anstieg des Gesamtmarktes im Ergebnis mehr als kompensiert.

27 http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/n_umwelt_z.html?nn=652326

Tabelle 2-163: Globale Marktentwicklung im BAU- und Green-Economy-Szenario

GLOBAL					
		BAU-Szenario		Green Economy	
	2013	2025	2050	2025	2050
Globale Neuzulassungen	87.595.998	130.000.000	200.000.000	130.000.000	200.000.000
davon Hybrid	2.000.260	12.082.616	61.119.671	21.144.578	30.960.075
Plug-In + REX	68.409	1.510.327	20.852.594	15.103.270	70.436.777
BEV + Fuel Cell	110.214	3.020.654	11.093.991	9.061.962	81.663.713
Verbrenner + Gas	85.417.114	113.386.403	106.933.744	84.690.189	16.939.435
Verbrenner + Gas + Hybrid + PlugIn-Hybrid + REX	87.485.784	125.469.019	184.694.402	117.917.384	114.114.458

In den folgenden Tabellen wird der berechnete absolute Materialbedarf national wie auch global in den beiden Szenarien angegeben.

Tabelle 2-164: Absoluter Materialbedarf national (in t): UT Nr. 43: „Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Cer	191	192	128	196	123
Palladium	7,64	7,69	5,10	7,84	4,93
Platin	3,23	3,26	2,16	3,32	2,09
Rhodium	0,882	0,888	0,589	0,905	0,569

Tabelle 2-165: Absoluter Materialbedarf global (in t): UT Nr. 43: „Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren“

Material	Basis-Szenario			Green-Economy-Szenario	
	2013	2025	2050	2025	2050
Cer	5.687	8.155	12.005	7.665	7.417
Palladium	227	326	480	307	297
Platin	96,2	138	203	130	126
Rhodium	26,2	37,6	55,4	35,4	34,2

2.4.7.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Es besteht bei dieser Umwelttechnologie kein weiterer besonderer Untersuchungsbedarf.

2.4.7.7 Quellen

Antrekowitsch et al. 2012 Antrekowitsch, J.; Rumpold, R.; Recycling of Platinum Group Metals from Automotive Catalysts by an acidic Leaching Process, Universität Leoben, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Platinum 2012.

Bleiwas 2013 Bleiwas, D.I.; Potential for Recovery of Cerium Contained in Automotive Catalytic Converters, U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1037, 10 p., available only at <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1037>.

- Hagelüken 2005 Hagelüken, C. (Umicore AG & Co. KG); Buchert, M.; Stahl, H.; unter Mitwirkung von Chakraborty, S.; Noll, T.; Schmied, M.; Schmitt, B.; Stoffströme der Platingruppenmetalle: Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. ISBN 3-935797-20-6, Clausthal-Zellerfeld: GDMB Medienverlag, 2005.
- IEA 2013 International Energy Agency: Global transport outlook to 2050. Targets and scenarios for a low-carbon transport sector; John Dulac (https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdmobility/DULAC_23052013.pdf)
- JM Interim 2013 Platinum Interim Review 2013, published in November 2013 by Johnson Matthey.
- Schlesinger et al. 2014 Schlesinger et al.: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognosen. Endbericht, Juni 2014, Basel/Köln/Osnabrück; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG, GWS (Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH), EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln)
- Umicore 2015 Gieshoff, J. (Umicore GmbH & Co.KG); persönliche Mitteilung vom 15.09.2015.

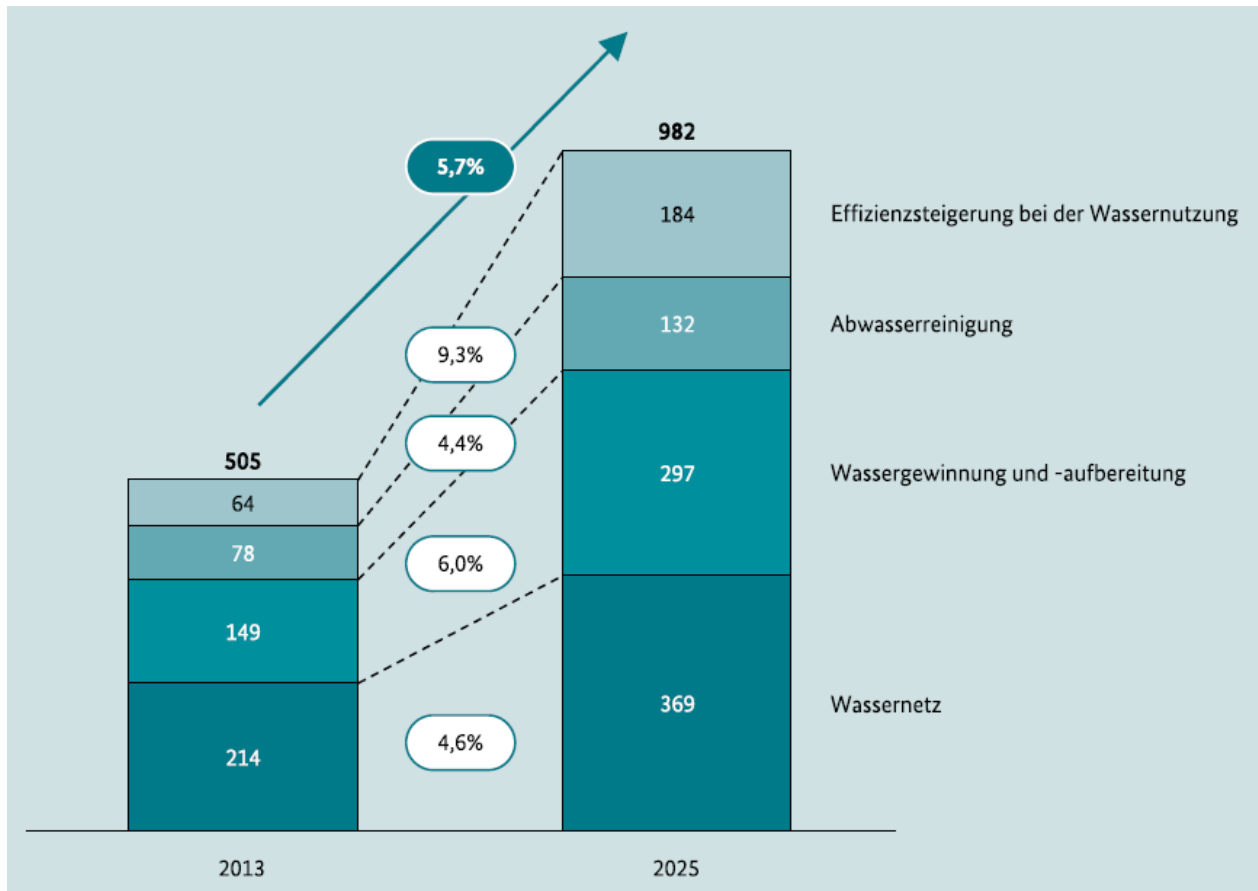
2.5 Umwelttechnologien im Leitmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft

Der Leitmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft umfasst die Marktsegmente

- Wassernetz
- Wassergewinnung und -aufbereitung
- Abwasserreinigung und
- Effizienzsteigerung bei der Wassernutzung.

Das Marktvolumen dieser Marktsegmente betrug 2013 global 505 Mrd. Euro. Mit einer jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate von 5,7 %, wie sie Roland Berger prognostiziert, dürfte das globale Marktvolumen im Jahr 2025 auf 982 Mrd. Euro steigen. Am schnellsten wird gemäß Green-Tech Atlas (BMUB 2014) das Marktsegment Effizienzsteigerung bei der Wassernutzung mit 9,3 % steigen. Es wird geprägt von drei Technologielinien: Wassereffizienztechnologien im häuslichen Bereich, im gewerblichen und industriellen Bereich sowie in der Landwirtschaft. Aufgrund des dynamischen Wachstums steigt der Anteil dieses Marktsegmentes am Marktvolumen des Gesamtmarktes von 13 % (2013) auf 19 % (2025). Ein wesentlicher Treiber ist der zunehmende Bedarf an Wassereffizienztechnologien in der Landwirtschaft in Entwicklungsländern. Das größte Marktsegment ist das Wassernetz. Es wächst mit 4,6 % jährlich und damit von 214 Mrd. Euro (2013) auf 369 Mrd. Euro (2025). Das Wassernetz gehört damit zu investitionsintensiven Marktsegmenten. Das Marktsegment Wassergewinnung und -aufbereitung hat einen Marktanteil von 29 %. Es wächst leicht dynamischer als der Leitmarkt insgesamt. (BMUB 2014)

Abbildung 2-31: Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Nachhaltige Wasserwirtschaft 2013 bis 2025 in Mrd. Euro und jahresdurchschnittliches Wachstum in %



Quelle: BMUB (2014)

In Deutschland beträgt das Marktvolumen 53 Mrd. Euro für das Jahr 2013. Roland Berger prognostiziert ein jahresdurchschnittliches Wachstum von 5,9 %, was dazu führt, dass das Marktvolumen im Jahr 2025 bei 105 Mrd. Euro liegen dürfte. Die nationale Wachstumsdynamik liegt damit sogar noch über der des globalen Leitmarktes. Der Anteil deutscher Firmen am Weltmarkt für Nachhaltige Wasserwirtschaft beträgt 11 %. Einzelne Technologielinien weichen erheblich von diesem Durchschnittswert ab. So liegt der Weltmarktanteil deutscher Firmen bei Wassereffizienztechnologien im gewerblichen und industriellen Bereich bei 19 %, bei der Wassergewinnung liegt er bei 8 % und bezüglich der Schlammbehandlung bei 4 %. Besonders wettbewerbsfähig sind deutsche Firmen im Segment Wassereffizienztechnologien im gewerblichen und industriellen Bereich bei Produkten und Verfahren zur Temperatursteuerung, Luftzufuhr und Durchlaufmessgeräten positioniert (BMUB 2014). Es wird prognostiziert, dass der Weltmarktanteil deutscher Firmen in diesem Segment steigen wird. Die anderen Marktanteile erweisen sich als konstant. Ausnahme sind Wassereffizienztechnologien in der Landwirtschaft. Hier wird ein Rückgang des Marktanteils deutscher Firmen am Weltmarkt erwartet.

Abbildung 2-32: Weltmarktanteile deutscher Firmen in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Nachhaltige Wasserwirtschaft 2013 bis 2015

Weltmarktanteile ausgewählter Technologielinien 2013		Trend 2025
Wassereffizienztechnologien Industrie und Gewerbe	19%	
Wasseraufbereitung	13%	
Wassereffizienztechnologien Landwirtschaft	12%	
Abwasserbehandlung	11%	
Durchschnitt Leitmarkt	11%	
Wassergewinnung	8%	
Schlammbehandlung	4%	

 Zugewinn Marktanteil
  Verlust Marktanteil

Quelle: BMUB (2014)

Im Folgenden wird auf vier Technologielinien fokussiert: Dezentrale Wasseraufbereitung, Intelligente Wasserzähler, Membrantechnik und Phosphorrückgewinnung.

2.5.1 UT Nr. 48: „Dezentrale Wasseraufbereitung“

2.5.1.1 Technologiebeschreibung

Eine dezentrale Wasseraufbereitung zielt auf die Verkleinerung und Schließung von Kreisläufen und die effizientere Behandlung von Wasserströmen. Ein wichtiger Baustein sind Kleinkläranlagen. Kleinkläranlagen eignen sich bevorzugt zur dezentralen Abwasserreinigung bei quasikontinuierlicher Beschickung.

2.5.1.2 Spezifische Einheit

Kleinkläranlagen sind Abwasserbehandlungsanlagen für die Reinigung von häuslichem Abwasser, die für weniger als 8 m³ Abwasserzufluss je Tag bemessen sind. Dies entspricht einem Anschlusswert von etwa 50 Einwohnerwerten (EW). Spezifische Einheit ist m³/d.

2.5.1.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Kleinkläranlagen gibt es in einer Vielzahl verfahrenstechnischer Varianten.

SBR-Anlagen (Sequencing Batch Reactor) arbeiten im Aufstaubetrieb, d. h. im Gegensatz zu den Belebungsanlagen erfolgt die Abwasserreinigung (Belüftung, Nachklärung) nicht räumlich getrennt, sondern zeitgesteuert im selben Reaktor. Anstelle der Nachklärung zur Abtrennung des belebten Schlamm-

mes aus Belebungsanlagen und SBR-Anlagen kann auch die Mikro- bzw. Ultrafiltration eingesetzt werden.

Bei Festbettanlagen werden im biologischen Reaktor getauchte Kunststoffkörper eingesetzt. Das Festbettmaterial wird durch technische Aggregate belüftet. Das anschließende Nachklärbecken trennt das gereinigte Wasser vom zusätzlich entstandenen Belebtschlamm.

Tropfkörperanlagen bestehen in der Regel aus einem Becken mit trocken aufgestelltem Trägermaterial und einem Nachklärbecken. Das Tropfkörperbett wird über Pumpen mit Abwasser beschickt. Das Tropfkörpermaterial wird mit dem Abwasser berieselt. Durch die Luft zwischen dem Material ist die Versorgung der Mikroorganismen mit Sauerstoff gewährleistet. Im anschließenden Nachklärbecken wird der Schlammabrieb vom gereinigten Wasser getrennt.

Rotationstauchkörperanlagen arbeiten mit einer Kombination aus Belebungs- und Festbettverfahren, wobei das Festbettmaterial zeitweise in das Belebungsbecken eingetaucht ist, z. B. als Scheiben oder Walzen. Die Belüftung erfolgt für die Mikroorganismen auf dem Festbett durch die Umgebungsluft und für die Belebtschlammorganismen durch den Sauerstoffeintrag über die Rotationsbewegung in das Wasser. Zur Abtrennung des Schlammes ist ein Nachklärbecken nachgeschaltet.

Pflanzenkläranlagen bestehen aus einem sandig-kiesigen Bodenkörper. Als Bewuchs werden Sumpfpflanzen, wie z. B. Schilf oder Röhricht eingesetzt. Die Pflanzenwurzeln dienen der Auflockerung des Bodengefüges und der Sauerstoffversorgung der im Boden vorhandenen Mikroorganismen, welche die Abwasserreinigung durchführen. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale für Pflanzenkläranlagen sind die Korngrößen des eingesetzten Bodenmaterials, die Art der Bodendurchströmung (horizontal oder vertikal) und die Art der Abwasserbeschickung (kontinuierlich, intermittierend).

Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs sind korrosionsfeste Werkstoffe, Membranen, Belüftungseinheiten sowie Steuereinheiten einschließlich Sensorik bei vollautomatischen Kleinkläranlagen von spezifischer Bedeutung.

Tabelle 2-166: Materialzusammensetzung von Kleinkläranagen

Komponenten	Material
Korrosionsfeste Werkstoffe für Behälter etc.	PE, Beton
Membranbelegung mittels Mikrofiltration oder Ultrafiltration	Polysulfon, Reg. Cellulose, Polyacrylnitril, Titanoxid, Zirkonoxid, Polyvinylidenfluorid
Belüftung (Membranrohrbelüfter, Tellerbelüfter oder Injektorbelüfter)	Belüfter und Ansauggehäuse sowie Propeller aus Kunststoff (GFK),
Pumpen	Kunststoffe (Motorgehäuse), gekapselte Welle, Schrauben aus Edelstahl, gummiummantelte Netzleitung
Sensorik (z. B. Ultraschallsensoren für Durchflussmessung)	Mediumberührende Materialien: Polyurethan, Edelstahl, Polyetheretherketon (PEEK), Titan, Kabel mit Fluorethylenpropylen (FEP, Teflon)-Überzug; Polyvinylidenfluorid (PVDF), PA, CuZn vernickelt, Ethylen Propylen Dien Monomer EPDM ...
Elektrolyse mit Diamantelektroden zur Desinfektion ²⁸ , bordotierte, leitfähige polykristalline Diamantelektroden auf unterschiedlichen Grundkörpern	Diamant, Bor

Quelle: (eigene Recherche)

Aus Rohstoffsicht sind Titandioxid, Zirkonoxid bei Membranfilter sowie Zink in Sensoren und Bor als Dotierungsmaterial bei Diamantelektroden relevant. Über die spezifischen Materialbedarfe liegen keine Angaben vor.

2.5.1.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Die Entwicklung des Marktes für Kleinkläranlagen stellt sich wie folgt dar:

Deutschland

In Deutschland gibt es ca. 80 Hersteller von Kleinkläranlagen (bis 50 EW), 57 davon haben bis Juli 2009 eine eigene Kleinkläranlage beim Deutschen Institut für Bautechnik zertifizieren lassen. Etwa 25 Hersteller teilen sich 80 % bis 90 % des Marktes. Die Unternehmensgröße liegt zwischen 10 Mitarbeitern (in Einzelfällen auch niedriger) bis zu maximal 100 Mitarbeiter. Viele Hersteller sind Tochterunternehmen von Beton- oder Kunststoffbehälterherstellern (EAWAG 2010). Das BDZ, Bildungs- und Demonstrationszentrum für dezentrale Abwasserbehandlung, zählt 38 Mitgliedsunternehmen. Der Exportanteil beträgt je nach Unternehmensausrichtung bis zu 90 % mit wachsender Tendenz. Der Branchenumsatz der Hersteller von Kleinkläranlagen im BDZ liegt bei über 100 Mio. € jährlich (2010/2011). 2008 wurden 15.000 Anlagen vertrieben, 2010 waren es rund 30.000. 2011 stagnierte der Markt. Die größten Hersteller von Kleinkläranlagen produzieren heute 7.000 Anlagen im Jahr. Nach Typen dominieren Belebungsanlagen (ohne Membranbelegung). Ihr Anteil macht über die Hälfte des Marktes (2011) aus, gefolgt von Membranbelebungsanlagen mit einem Marktanteil über 10 %.

Ältere Marktprognosen (aus dem Jahr 2008, Dorgeloh) bezifferten den Bedarf bis 2015 auf 1,4 Mio. Kleinkläranlagen in Deutschland. Seit 2015 schreibt die EU Wasserrahmenrichtlinie strengere Vorgaben an Hauseigentümer vor, die nicht an eine Kanalisation angeschlossen sind. Demzufolge muss bis

28 Diese Spezialelektroden werden in wasserführende Systeme eingebaut und dort unter Strom gesetzt. So werden die Wassermoleküle elektrolytisch gespalten, aus den Sauerstoffatomen wird Ozon gewonnen.

zum 31.12.2015 eine vollbiologische Kleinkläranlage nachgewiesen werden können. Für Deutschland bedeutet dies, dass von den fast zwei Mio. Kleinkläranlagen jede zweite modernisiert werden müsste, viele weitere Hausbesitzer müssen erstmalig eine solche Kleinkläranlage in Betrieb nehmen. Die EU-Richtlinie sieht vor, dass ab 2015 alle Kleinkläranlagen mit einer biologischen Reinigungsstufe nachgerüstet werden müssen, um das Abwasser fast vollständig von Keimen und Stickstoff zu säubern. Laut Abwasserzweckverbänden wird die Umrüstung bzw. der Einbau bis dato nur schleppend umgesetzt.

Tabelle 2-167: Kleinkläranlagen - Markteinschätzungen für Deutschland

Studien	Marktentwicklung
Dorgeloh, 2008	1,4 Mio. Kleinkläranlagen bis 2015

Global

Frühere Marktabschätzungen gehen von einem Bedarf von 10 Mio. Kleinkläranlagen bis zum Jahr 2015 in Europa aus. Das theoretische Marktpotential für Messtechnik wird auf rund 0,5 bis 5 Mrd. Euro geschätzt. Diesen Trend bestätigt Endress + Hauser. Inwieweit diese Abschätzung sich mit der tatsächlichen Marktentwicklung deckt ist nicht klar. Weitergehende, aktuelle Marktprognosen bis 2025 und darüber hinaus fehlen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass aufgrund der seit 2015 geltenden Standards in der EU der Markt für Kleinkläranlagen weiter an Bedeutung gewinnt.

An Bedeutung gewinnen dürfte ebenso der Markt für Kleinkläranlagen in einigen Entwicklungs- und Schwellenländern. Für Indien beziffern Frost & Sullivan dessen Volumen (Packaged Wastewater Treatment Plants) für das Jahr 2012 mit rund 1,6 Mrd. iR.. Die Marktforscher rechnen für den Zeitraum bis 2017 mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von knapp 13 %, angetrieben vor allem vom Bedarf der Industriebetriebe. Diese - allen voran die Nahrungsmittel- und Getränke-, Textil- und Pharmaindustrie - steht aktuell bereits für etwa die Hälfte des Umsatzes. (GTAI 2015).

Tabelle 2-168: Kleinkläranlagen - Markteinschätzungen weltweit

Studien	Marktentwicklung
Dorgeloh, 2008	10 Mio. Kleinkläranlagen in der EU bis 2015
Frost & Sullivan, 2013	Indien: jährliche Wachstumsrate 13 % bis 2017

2.5.1.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Da keine Angaben zu dem spezifischen Materialbedarf einer Kleinkläranlage vorliegen, lassen sich keine zukünftigen Materialbedarfe -weder national noch global- abschätzen und hochrechnen. Es ist davon auszugehen, dass der spezifische Materialbedarf für Titanoxid und Zirkonoxid gering ist, da nur ein geringer Anteil der Kleinkläranlagen mit keramischen Membranfiltern ausgestattet ist. Gleiches gilt für Zink, das in vernickelter Form in Sensoren zu finden ist. Die Menge an Bor wird ebenfalls als gering eingeschätzt, da Diamantelektroden aus Kostengründen kaum in Kleinkläranlagen eingesetzt werden dürften.

2.5.1.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Mit Blick auf die forschungsleitenden Ziele des Vorhabens besteht kein weiterer Untersuchungsbedarf.

2.5.1.7 Quellen

Dorgeloh 2008 Dorgeloh, E. „Flexible Wasserinfrastrukturkonzepte“. Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen - PIA e.V. und Prüfinstitut für Abwassertechnik – PIA GmbH. Beitrag auf dem ZVEI-Workshop Kanalnetzbewirtschaftung 2020+. Frankfurt am Main 23.9.2008.

- EAWAG 2010 Störmer, E., Binz, C., Zukunft der dezentralen Wassertechnologien – Mögliche Massenmärkte und neue Lösungsansätze für Onsite-Technologien in der Siedlungswasserwirtschaft. Bericht der Experteninterview-Kampagne. Eawag, Dübendorf.
http://www.eawag.ch/forschung/cirus/schwerpunkte/projektuebersicht/ost/Interview_report.pdf
- Frost & Sullivan 2013 Growth in Key End-User Industries Widens Scope of Packaged Wastewater Treatment Market in India, Finds Frost & Sullivan, <http://www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=288251089>
- GTAI 2015 <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/Maerkte/suche,t=indische-industrie-hat-steigenden-bedarf-an-loesungen-fuer-frisch-und-abwasser,did=982792.html>

2.5.2 UT Nr. 49.b: „Wassereffizienztechnologien“

2.5.2.1 Technologiebeschreibung

Technologien zur Effizienzsteigerung bei der Wassernutzung verteilen sich auf drei Bereiche: Wassereffizienztechnologien im häuslichen Bereich (z. B. Hauswassertechnik zur Dosierung durch Luftzufuhr, Spül-Stopp Tasten), Wassereffizienztechnologien im gewerblichen und industriellen Bereich (z. B. Produktionsveränderung zur Verringerung der Wassernachfrage und Erhöhung der Wiedernutzungsrate, Mess-, Steuer- und Regeltechnik, Smart Metering, Ultraschallzähler) sowie Wassereffizienztechnologien in der Landwirtschaft (u. a. Mess- und Regeltechnik im Zusammenspiel verschiedener Bewässerungstechnologien und -infrastrukturen).

2.5.2.2 Spezifische Einheit

Das Spektrum der Effizienztechnologien ist vielfältig. Betrachtet werden unter den mess-, steuer- und regelungstechnischen Systemen exemplarisch intelligente Wasserzähler (Smart Meter). Smart Meter können nicht nur Lecks im Wassernetz erkennen, sondern auch kontinuierlich den Wasserverbrauch messen. Spezifische Einheit ist 1 Smart Meter zur kontinuierlichen Messung des Wasserverbrauchs (bestehend aus Messwertaufnehmer, Messwertumformer mit Impulsgeber, Funk oder M-Bus fernablesbar).

2.5.2.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Für die Bestimmung der Materialzusammensetzung wurden verschiedene Produktdatenblätter namhafter Hersteller (Krohne, Diehl...) ausgewertet. Es handelt sich um universelle Produkte, die für einen breiten Anwendungsbereich eingesetzt werden, u. a. Durchflussüberwachung, Wasserumwälzung und -aufbereitung, Misch- und Dosiersysteme, Filtrationssysteme, Pumpensteuerung. In Durchflussmessgeräten finden sich folgende Materialien:

Tabelle 2-169: Materialien für intelligente Wasserzähler

Komponenten	Materialien
Messwertaufnehmer	Flansche: Stahl A105, Edelstahl 304, Edelstahl 317, Edelstahl 316 Ti Auskleidung: PTFE, PFA Elektroden: Hastelloy C4 (C, Si, Mn, Co, S, Cr, Fe, P, Ti, Ni), Hastelloy B229, Platin, Titan, Tantal, Edelstahl 1.4401 (AISI 316L), Edelstahl 1.4571 (AISI 316 Ti), Edelstahl 316 Ti Magnete, Glykol-Frostschutzlösung Erdungsringe: Edelstahl 316 Ti, Hastelloy C4, Hastelloy B2, Titan, Tantal Gehäuse: Aluminium-Druckguss, Polyurethan-beschichtet Medienberührte Teile sind vernickelt
Messumformer	Gehäuse: Aluminium-Druckguss, Polyurethan-Beschichtung, Aluminium mit Polyesterbeschichtung Polycarbonat (IP68) Anschlussdose Elektronik, LCD-Display, Kabel
Funkmodul	GSM-Modul mit SIM-Karte
Sonstiges	Cu

Quelle: Krohne 2015, Diehl 2015., Mirakonta 2015

Rohstoffrelevant sind in Durchflussmessgeräten: Mn, Co, Cr, P, Ti, Ni, Pt, Ti und Ta sowie Cu. In intelligenten Wasserzählern wird bei Elektroden, Erdungsringen etc. vorzugsweise Edelstahl eingesetzt, in Anwendungen mit aggressiven Chemikalien bestehen die Komponenten, die Kontakt zur Flüssigkeit haben, aus robusteren Materialien. Bei intelligenten Wasserzählern ist daher der Materialbedarf an Mn, Co, Cr, P, Ti, Ni, Pt, Ti und Ta gering.

Tabelle 2-170: Spezifischer Materialbedarf von intelligenten Wasserzählern

Material	2013	2025	2050
Co	gering	gering	gering
Cr	gering	gering	gering
P	gering	gering	gering
Ti	gering	gering	gering
Ni	gering	gering	gering
Pt	gering	gering	gering
Ta	gering	gering	gering

Quelle: Krohne

²⁹ Hastelloy-B-Legierungen zählen zur Gruppe der hochkorrosionsbeständigen Nickel-Molybdän-Legierungen. Hastelloy B enthält 26 bis 30 % Molybdän.

2.5.2.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Wasserversorger sind verstärkt an einem effizienten Wassermanagement interessiert und fragen zunehmend intelligente Wasserzähler (smart water meters) nach. Die Technologie ermöglicht es, Rohrlecks früh zu erkennen. Marktforschungsinstitute (Pike Research, Bloomberg) gehen ab 2015 von einer hohen Marktdynamik aus. Viele große Unternehmen wie Suez, Veolia, Schneider Electric, und Orange haben starkes Interesse für diesen Bereich bekundet. Gegenwärtig werden die Wasserverluste im Verteilungsnetz der Industrieländer auf 20 % geschätzt. Schneider Electric arbeitet in den USA an diesem Problem und kann Lösungen anbieten, bei denen 30 % der Energiekosten bei der Wasseraufbereitung eingespart werden.

Deutschland

In Deutschland gehören u. a. Krohne, Diehl und Kamstrup zu führenden Unternehmen im Bereich intelligenter Wasserzähler. 2014 verbuchte der „Smart Metering Spezialist“ Kamstrup mit einem Umsatzwachstum von 9 % auf 185 Mio. € ein „Rekordjahr in einem nur moderat wachsenden Marktumfeld“. Nach Unternehmensangaben erkennen „immer mehr Wasserversorger die Vorteile der intelligenten Wassermessung und haben 2014 ein zunehmendes Interesse...erkennen lassen“. (Kamstrup 2015)

Tabelle 2-171: Intelligente Wasserzähler - Markteinschätzungen für Deutschland

Studien	Marktentwicklung
Kamstrup	Umsatzwachstum 2014, insbesondere mit Smart Meter: 9 %

Global

Das amerikanische Marktforschungsinstitut Pike Research geht davon aus, dass bis 2018 weltweit 800 Mio. intelligente Wasser-Zähler (Smart Meter) installiert werden und IBM rechnet bis 2015 mit einem Wachstum des Marktes für intelligente Wasserzähler auf 20 Mrd. Dollar. Ursprünglich war das Marktforschungsinstitut von 31,8 Mio. intelligenter Wasserzähler bereits bis 2016 ausgegangen. Diese Prognose stammte aus dem Jahr 2010. Nach neuen Berechnungen von Pike Research wird der Markt für smarte Wasserzähler bis 2017 von 10,3 Mio. Wasserzählern aktuell auf 29,9 Mio. intelligente Wasserzähler steigen. „Dabei rechnet Pike Research vor allem in Entwicklungsländern im asiatisch-pazifischen Raum, dem Südwesten der USA und dem mittleren Osten mit steigendem Bedarf an intelligenten Wasserzählern. Denn dort herrscht teilweise bereits heute Wasserknappheit – intelligente Wasserzähler könnten zu einer leichten Entspannung der Situation beitragen“. Nach Prognosen von Bloomberg New Energy Finance werden allein in den USA Wasserversorger zwischen 2013 und 2020 rund 2,0 Mrd. US\$ in intelligente Wasserzähler investieren. Laut gleicher Quelle „würde dies fast dem Betrag entsprechen, den Versorger in den vorausgegangenen 15 Jahren insgesamt für die Technologie ausgegeben haben“ (2,4 Mrd. US\$). Bloomberg New Energy Finance erwartet ab 2015 eine anziehende Marktdynamik. Zahlreiche Entwicklungen sprechen für einen mittelfristig steigenden Bedarf. Ein Grund sei der zu diesem Zeitpunkt einsetzende Austauschbedarf bei der ersten Generation von intelligenten Wasserzählern, so Bloomberg. Städte und Kommunen sind zudem bestrebt, das Wassermanagement effizienter zu gestalten. Der Ersatz zumeist veralteter, konventioneller durch intelligente Wasserzähler gewinnt dabei an Bedeutung (GTAI 2013).

Tabelle 2-172: Intelligente Wasserzähler - Markteinschätzungen weltweit

Studien	Marktentwicklung
Pike Research (nach Wissenschafts-portal Französische Botschaft 2011)	Bis 2018 weltweit 800 Mio. intelligente Wasser-Zähler
IBM, o.J.	Bis 2015 Wachstum des Marktes für intelligentes Wasser auf 20 Mrd. Dollar
Pike Research 2014	Bis 2017 Anstieg von 10,3 Mio. Wasserzählern aktuell auf 29,9 Mio. intelligente Wasserzähler
Bloomberg New Energy Finance	US-Wasserversorger investieren zwischen 2013 und 2020 rund 2,0 Mrd. US\$ in intelligente Wasserzähler

2.5.2.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Materialbedarf besteht für Edelstähle und Kupfer, ohne (aufgrund fehlender Daten) genaue Angaben machen zu können. Für Mn, Co, Cr, P, Ti, Ni, Pt, Ti und Ta ist der zukünftige Materialbedarf für intelligente Wasserzähler gering.

2.5.2.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Untersuchungsbedarf besteht bei der Quantifizierung der Materialzusammensetzung von intelligenten Wasserzählern. Ohne diese lassen sich nur qualitative Einschätzungen vornehmen. Von größerer Rohstoffrelevanz dürften industrielle Durchflussmessgeräte sein.

2.5.2.7 Quellen

Bloomberg New Energy Finance, o. J.: <http://www.bloomberg.com/news/articles/2013-05-13/water-utilities-to-spend-2-billion-on-smart-meters-through-2020>

Diehl, 2015 Produktdatenblätter, <http://www.diehl.com/de/diehl-metering/produkte.html>

GTAI, 2013 <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/Maerkte/suche,t=intelligente-wasserzaehler-in-den-usa-gefragt,did=921842.html>

Wissenschaftsportal Französische Botschaft 2011 <http://www.wissenschaft-frankreich.de/de/energie/intelligentes-wasser-ein-erster-schritt-in-richtung-smart-citys/>

Kamstrup, 2015 <http://www.elektroniknet.de/messen-testen/sonstiges/artikel/118589/>

Krohne, 2015 Krohne Messtechnik <https://exportpages.de/de/produkt/batteriebetriebener-magnetisch-induktiver-wasserzaehler/143651/>

Mirakonta, 2015 zit. Nach: <http://www.elektroniknet.de/distribution/design-in/artikel/119758/>

Pike Research 2014; zit. nach: <http://www.cleantinking.de/pike-research-prognostiziert-299-mio-smart-water-meter-bis-2017/>

2.5.3 UT Nr. 50 + Nr. 51: „Membrantechnik“

2.5.3.1 Technologiebeschreibung

Die Membrantechnik ist ein physikalisches Verfahren zur Trennung von Stoffgemischen. Die eingesetzten Membranen funktionieren vergleichbar mit einem Filter, dabei werden die abgetrennten Stoffe weder thermisch noch chemisch oder biologisch verändert. Die treibende Kraft für den Trennprozess ist die Druckdifferenz zwischen „Feed- und Permeatseite“. Man unterscheidet verschiedene Membranverfahren, die sich durch ihre Trenngrenze und die aufzuwendende Triebkraft unterscheiden. Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose. Membranverfahren zeigen hohe Trenn-

leistungen und können für ein breites Spektrum von Anwendungen eingesetzt werden, wie z. B. in der Abwasserbehandlung, der Trinkwasseraufbereitung und der Wasserentsalzung. Bei komplexen Trennanforderungen können auch Kombinationen zum Einsatz kommen.

2.5.3.2 Spezifische Einheit

Das Einsatzgebiet der Membrantechnik reicht von kleinen Modulen bis zu Anlagen in der zentralen Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. Spezifische Einheit ist $\text{g}/(\text{m}^3/\text{d})$. Die Leistung der Membrananlagen hängt von der Auslegung der Gesamtanlage ab, das heißt von der Trenn- oder Konzentrationsaufgabe, dem gewünschten Durchfluss pro Membranfläche und Stunde $[\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})]$ sowie der nötigen Ausbeute oder dem maximalen Verlust.

2.5.3.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Für den Einsatz von Membranen in technischen Anlagen haben sich unterschiedliche Modulkonfigurationen etabliert. Je nach Aufbau unterscheidet man Module mit rohrförmigen Membranen (Rohrmodul, Kapillarmodul, Hohlfasermodule) und Module mit flachen Membranen (Plattenmodul, Wickelmodul, Kissenmodul, Rotationsmodul). Die Module sind so konzipiert, dass sie in einem kleinen Volumen möglichst viel Membranfläche unterbringen. Die Membrantrennstufe beinhaltet ein oder mehrere Module sowie jene Einrichtungen, die nötig sind, um eine Membrantrennung durchzuführen wie beispielsweise eine Pumpe, mit deren Hilfe die Flüssigkeit vom Tank in das Modul gepumpt wird. Membrantrennanlagen bestehen aus der Membrantrennstufe und den notwendigen Behältern, die das zu trennende Stoffgemisch aufnehmen können. (BFE 2005, S. 100)

Eine Übersicht der gängigsten Membranmaterialien für die verschiedenen Membranverfahren gibt folgende Tabelle.

Tabelle 2-173: Membranmaterialien für verschiedene Membranverfahren

Verfahren	Aktive Schicht
Mikrofiltration	Polypropylen (PP) Polyvinylidenfluorid (POVDF) Polysulfon (PSU) Aluminiumoxid Edelstahl, Titandioxid Zirkonoxid
Ultrafiltration	Polysulfon (PSU) Reg. Cellulose Polyacrylnitril Titanoxid, Zirkonoxid Polyvinylidenfluorid
Nanofiltration	Polyamid Zirkonoxid, PES Celluloseacetat
Umkehrosmose	Polyamid Celluloseacetat

Quelle: ISA 2003, TAMI Deutschland, IKTS 2010

Aus Rohstoffsicht relevant sind Titandioxid und Zirkonoxid, die sich bei keramischen Membranen sowohl zur Herstellung der Träger, als auch zur Herstellung der eigentlichen Membranschicht eignen.³⁰ Organische Membranen sind aus Rohstoffsicht unkritisch.

Tami Deutschland gibt an, dass die von ihnen hergestellten grobporösen Trägerrohre aus Titanoxid bestehen. Sie werden mit der aktiven keramischen Membran beschichtet.³¹ Die Membran besteht in Abhängigkeit von der Trenngrenze aus Titan- oder Zirkonoxid. Wegen der herausragenden chemischen Haltbarkeit von Zirkon ($\text{ZrSiO}_{4\text{sub}4}$) sind Filtrationsmembranen geeigneterweise aus diesem Material, damit man insbesondere bei extremen pH-Wert-Bedingungen eine Filtration durchführen kann.³² Es ist möglich, mit Hilfe von Verfahren vom Sol-Gel-Typ ultradünne Zirkonbeschichtungen herzustellen, vorausgesetzt, dass das Siliziumalkoxid vorhydrolysiert ist und das Zirkoniumalkoxid oder eine andere geeignete Verbindung chemisch modifiziert ist, um die Hydrolyse- und Kondensationskinetiken zu erniedrigen. Dies setzt voraus, dass diese Mittel zusammen mit einem Dotierungsmittel (einem Additiv), das die Zirkonkristallisierung erleichtert, verwendet werden.³³ Fraunhofer IKTS beschreibt den Aufbau keramischer Nanofiltrationsmembranen (NF-Membranen) wie folgt: „Sie werden mit Hilfe der polymeren Sol-Gel-Technik als dünne Schichten auf poröse Keramiksubstrate aufgebracht. Die Schichtdicke liegt dabei nur im Bereich von 50 nm, so dass ein qualitativ hochwertiger poröser Keramikträger und definierte Zwischenschichten erforderlich sind, um die Porengröße und Oberflächenrauigkeit schrittweise auf die Erfordernisse der NF-Membran einzustellen. Die letzten beiden Zwischenschichten bestehen aus TiO_2 mit einer Porengröße von 5 nm und ZrO_2 mit einer Porengröße von 3 nm, die beide auch als Ultrafiltrationsmembranen (UF-Membranen) eingesetzt werden. Die NF-Membran besteht aus amorphem TiO_2 mit einer Porengröße von 0,9 nm.“³⁴ TiO_2 und ZrO_2 werden vorzugsweise als sehr dünne Schichten für Ultrafiltrations- und Nanofiltrationsanwendungen auf Al_2O_3 -Träger aufgebracht. Die Schichtdicken sind im Interesse eines hohen Permeatflusses gering und die Materialverbräuche niedrig. Weitere Materialien, die in der Literatur genannt, aber nicht spezifiziert werden, sind MgO , BeO , MgAl_2O_4 , Al_2O_3 , ZrSi_4 , SiO_2 , SiC , Si_3Ni_4 . (Duscher 2013). Erwähnt wird außerdem der Einsatz von Yttrium zur Stabilisierung (tetragonales) Zirkonoxid bei der Herstellung keramischer Nanofiltrationsmembranen auf Basis von $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ (Duscher 2013).

Tabelle 2-174: Materialbedarf für Membrantechnik – verschiedene Indikatoren

	Membran- dicke [μm]	Dichte [g/cm^3]	Porosität [%]	Material [g/m^2]	Fluss [m^3/m^2]	Fluss [$\text{m}^3/(\text{m}^2\text{d})$]	Material- bedarf [$\text{g}/(\text{m}^3/\text{d})$]
TiO_2 , 5nm (UF)	0,5	4	50	1	0,5	12	0,083
ZrO_2 , 5nm (UF)	0,5	6	50	1,5	0,5	12	0,125
TiO_2 , 0,9nm (NF)	0,05	4	30	0,06	0,2	4,8	0,013

Quelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dr. Ingolf Voigt

³⁰ <http://www.fs-journal.de/Schwerpunktthemen/2013/deutsch/S4.1.pdf>

³¹ <http://www.tami-deutschland.de/de/produkte/keramische-rohrmembranen>

³² <http://www.patent-de.com/19960919/DE69208313T2.html>

³³ http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/27943_-_Abschlussbericht.pdf

³⁴ http://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/de/doc2/Publikationen/Jahresberichte/Fraunhofer_IKTS_Jahresbericht_2010.pdf

Die Angaben für die Schichtdicke und Porosität sind gerundet. Der Fehler liegt bei +/- 20 %. Die Dichte ist ebenfalls gerundet. Es liegt hier bei UF-Membranen überwiegend Anatas und tetragonales ZrO_2 , bei NF-Membranen amorphes TiO_2 vor. Die Flusswerte sind Erfahrungswerte aus einer Vielzahl von Anwendungen.

Tabelle 2-175: Spezifischer Materialbedarf für keramische Filtrationsmembranen

Material	2013	2025	2050
Titan	0,050 [g/(m ³ /d)]	0,050 [g/(m ³ /d)]	0,050 [g/(m ³ /d)]
Zirkon	0,094 [g/(m ³ /d)]	0,094 [g/(m ³ /d)]	0,094 [g/(m ³ /d)]

2.5.3.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Die Membrantechnik hat sich etabliert und wird zunehmend großtechnisch eingesetzt und bildet das „Kernstück“ vieler moderner Behandlungssysteme. Sie besitzt heute im Bereich der industriellen Abwasserreinigung, der Trinkwasseraufbereitung und der Abwasserbehandlung eine Schlüsselrolle. Es sind weltweit rund 20 bedeutende Anbieter von Membranen und Anlagen aktiv, darunter aus Deutschland die Firmen Inge AG, Membrana, Sartorius, Siemens und Microdyn Nadir. Die Marktentwicklung hängt neben wirtschaftlich-technischen Faktoren entscheidend von politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen ab.

Deutschland

Das Einsatzgebiet der Ultra- und Mikrofiltration in der Trinkwasseraufbereitung reicht in Deutschland von kleinen Modulen in der Eigenwasserversorgung bis zu Anlagen in der zentralen Trinkwasseraufbereitung. Die Zahl der Membrananlagen im Trinkwasserbereich nimmt seit Inbetriebnahme der ersten UF-Anlage im Jahr 1998 stetig zu. 2005 wurden 61 Anlagen gezählt, 2006 wurden 22 Anlagen errichtet, 2007 kamen weitere 22 Anlagen hinzu (IFAT 2008), so dass die gesamte Aufarbeitungskapazität bei 15.000 m³/h lag. Aktuell nennt die DVGW eine Kapazität von 6.000 m³/h.³⁵

In der industriellen Abwasserreinigung dienen Membranverfahren vor allem dem Abwasserrecycling und dem Wiedereinsatz als Brauchwasser. Membranverfahren sind bedeutsam für die Lebensmittelindustrie, die Elektronikindustrie, die Papierindustrie und Textilindustrie. In der metallverarbeitenden Industrie wird Membrantechnik für die Emulsionstrennung eingesetzt. Einsatzschwerpunkte für Membranverfahren in der chemischen und pharmazeutischen Industrie sind u. a. Aufkonzentrierung von ein- und zweiwertigen Salzen, kleinen Molekülen, Polymeren, Proteinen, Viren, bis hin zu Partikeln und Zellen, Hybridverfahren Destillation/Dampfpermeation, Ausbeutesteigerung von Gleichgewichtsreaktionen im Membranreaktor, Abtrennung homogener und heterogener Katalysatoren und Nanopartikel, Konzentration und Aufreinigung von Proteinen, scherarme Herstellung von Emulsionen (z. B. biologische Einsatzstoffe). Entsprechend vielfältig sind die Schnittstellen zu anderen Gebieten, wie z. B. Reaktionstechnik, Biotechnologie und Prozessintensivierung. Gerade hier besteht noch ein erhebliches Entwicklungspotential.

Im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung werden täglich mehr als 80.000 m³ Abwasser mit Membrantechnik gereinigt. Der Einsatz von Membranen beschränkte sich bis dato meist auf Projekte, die öffentlich gefördert werden. National existieren (2006) 19 kommunale Membranbelebungsanlagen mit einer mittleren hydraulischen Kapazität von mindestens 20 m³/d. Die technischen Entwicklungen haben in den vergangenen Jahren bedeutende betriebliche und kostenmäßige Vorteile bewirkt, so dass

³⁵ http://www.dvgw-veranstaltungen.de/medien/bbw/ausschreibung/dvgwprogramm_428988.pdf

die vorliegenden Betriebserfahrungen die Randbedingungen für den Einsatz der Membrantechnik weiter verbessern.

Weitergehende Angaben, die zwischen organischen und den hier interessierenden keramischen Membranen in der Wasserversorgung, -aufbereitung und -entsorgung sind rar. Nach Müller (DVGW 2008) gab es im Jahr 2008 in Deutschland keine MF/UF-Anlagen mit keramischen Membranen in der öffentlichen Wasserversorgung.

Was die zukünftige Entwicklung anbetrifft, gehen Frost & Sullivan in einer Studie aus dem Jahr 2005 davon aus, dass der Markt generell für membranbasierte kommunale Trink- und industrielle Prozesswasserbehandlung bis 2020 von 100 Mio. € auf 194 Mio. € wächst. (Frost & Sullivan 2005, 2006a, 2006b). Aktuelle Marktabschätzungen liegen nicht vor, jedoch wird generell übereinstimmend von einem dynamischen Wachstum ausgegangen.

Tabelle 2-176: Membrantechnik - Markteinschätzungen für Deutschland

Studien	Marktentwicklung
Frost & Sullivan 2005/2006	100 Mio.€ in 2005 bis 2020 auf 194 Mio. €

Global

2006 lag weltweit nach IFAT (2008) und Pinnekamp (2008) die Anzahl der Membrananlagen für die Trinkwasseraufbereitung bei rund 800 mit einem Durchsatz von rund 9 Mio. m³/d. Die größten Trinkwasseranlagen werden in Singapur, Moskau und Minneapolis betrieben, sie sind für einen Durchsatz von über 11.000 m³/h ausgelegt. Für 2009 beziffert Ripperger (2009) die Anzahl der MF/UF-Anlagen zur Trinkwassererzeugung auf ca. 1.000. Die Produktionskapazität wird bereits auf ca. 12 Mio. m³/d geschätzt. Weltweit wird mit einem Wachstum des Marktes von 10 % bis 15 % gerechnet.

Der Markt für die industrielle Membranfiltration wächst in Europa mit jährlich 6,4 % (nach Frost & Sullivan 2005). Werden diese Entwicklungen bis zum Jahr 2020 extrapoliert, gelangt man für die industrielle Membranfiltration zu einem Marktvolumen von 1,7 Mrd. Euro. Hinsichtlich der keramikbasierten industriellen Membranfiltration, in welcher vorwiegend Materialien wie Zirkonium- und Titanoxid enthalten sind, wird von einem jährlichem Wachstum von 11,7 % ausgegangen (Markets and Markets, 2015). Im Jahr 2020 soll das globale Marktvolumen rund 5,9 Mrd. US\$ umfassen.

In der Abwasserreinigung wurden 2006 weltweit rund 900 Membranbelebungsanlagen eingesetzt (Pinnekamp 2008). Für 2009 gibt Ripperger (2009) die Anzahl der Membran-Bio-Reaktoren mit 1.400 weltweit an. Insbesondere Asien und Nordamerika nehmen eine Vorreiterstellung ein. Die Gründe für die zunehmende Verbreitung der Membrantechnik in der Abwasserbehandlung liegen insbesondere im geringen Platzbedarf, in der kompakten modularen Bauweise und in der Erzeugung eines feststofffreien Ablaufs (Pinnekamp 2008). Für Membran-Bio-Reaktoren wird ein wachsender Markt prognostiziert. Das jährliche Wachstum soll in den nächsten Jahren über 10 % (bis 17 %) betragen.

Tabelle 2-177: Membranbelebungsanlagen weltweit

Region	Anzahl	Kapazität m ³ /d je Anlage
Europa	169	2.506
Nordamerika	296	1.664
Südamerika	8	509
Afrika	15	1.955

Region	Anzahl	Kapazität m ³ /d je Anlage
Asien	286	936
Australien	23	1.950
Gesamt	797	1.583

Quelle: Pinnekamp 2008

Zur Frage, wie sich der Markt für Membrantechnik zukünftig entwickeln wird, liegen mehrere Studien vor.

Tabelle 2-178: Membrantechnik - Markteinschätzungen weltweit

Studien	Marktentwicklung
Frost & Sullivan, 2005	Industrielle Membranfiltration wächst in Europa jährlich 6,4 %; Marktvolumen 2020: 1,7 Mrd. €
SAM 2007	Membransysteme für Abwasserreinigung: Marktvolumen (2007) 4,2 Mrd. US\$, jährliches Wachstum 19 % Trinkwasseraufbereitung mit Membransystemen: Marktvolumen (2007) 1,9 Mrd. US\$, jährliches Wachstum 20 % Entsalzungsanlagen mit Membransystemen: Marktvolumen (2007) 2,4 Mrd. US\$, jährliches Wachstum 8 %
Ripperger, 2009	MF/UF-Anlagen zur Trinkwassererzeugung: Jährliches Wachstum 10 % bis 15 % Membran-Bioreaktoren in der kommunalen Abwasserreinigung: Jährliches Wachstum 10 %
Membrane consultancy, 2010 ³⁶	Membran Wassermarkt 2010: 1 Mrd. US\$ Marktwachstum jährlich: Umkehrosmose 10 %; Membranfiltration 16 %, Membran-Bioreaktoren 17 %
BBC Research, 2013 ³⁷	Weltmarkt für Membranfiltration 2013: 1,65 Mrd. US\$, 2018: 2,64 Mrd. US\$; jährliche Wachstumsrate 10 %
Markets and Markets, 2015	Größter Anwendungsbereich der keramischen Membrantechnik umfasst mit 55 % die industrielle Wasseraufbereitung; globales Marktvolumen im Jahr 2020 beträgt 5,1 Mrd. US\$ (durchschnittlicher jährlicher Anstieg um 11,7 %)

Aufgrund unterschiedlicher Erhebungsmethoden und der Schwierigkeit der genauen Abgrenzung variieren die Daten. Auf jeden Fall verzeichnet man in der Membrantechnik ein sehr viel schnelleres Wachstum als bei konventionellen Systemen. Obwohl mit großen Unsicherheiten behaftet, deuten die Ergebnisse der verschiedenen Marktstudien auch in den nächsten Jahren auf ein dynamisches Wachstum hin, das in der Größenordnung von 10 % liegen könnte.

³⁶ Membrane consultancy 2010: The Membrane Water Technology Market, Graeme Pearce, 2010, http://www.bluetechforum.com/wp-content/uploads/2011/03/08-Graeme_Pearce_BlueTech-Jun10.pdf

³⁷ [http://www.bccresearch.com/pressroom/mst/global-membrane-filtration-market-reach-\\$2.6-billion-2018](http://www.bccresearch.com/pressroom/mst/global-membrane-filtration-market-reach-$2.6-billion-2018)

Aus diesen Überlegungen ergeben sich die folgenden überschlägigen Abschätzungen des Zubaus. Auf Grund der unsicheren Datenlage soll hier auf eine Unterscheidung in BAU- und Green-Economy-Szenario verzichtet werden.³⁸

Tabelle 2-179: Weltweit installierte Kapazitäten keramischer Membrantechnologie in m³/d pro Jahr

Jährliche Neuinstallationen in [m ³ /d]	2013	2025	2050
BAU/Green-Economy	180.000	350.000	350.000

2.5.3.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Da lediglich globale Daten hinsichtlich zukünftiger Marktentwicklungen vorhanden sind, kann der Materialbedarf ausschließlich auf globaler Ebene berechnet werden. Mit der oben hergeleiteten Abschätzung des möglichen weltweiten Zubaus ergibt sich der folgende Materialbedarf:

Tabelle 2-180: Materialbedarf für Membrantechnik weltweit

Material	2013 [in t]	2025 [in t]	2050 [in t]
Titan	0,009	0,02	0,02
Zirkon	0,017	0,03	0,03

Auf Anlagenebene sind weitere Rohstoffe relevant. So können hinsichtlich des Rohstoffbedarfs korrosionsfeste Werkstoffe von spezifischer Bedeutung sein. Dies ist bei Meerwasserentsalzungsanlagen der Fall, wo nicht rostende Edelstähle mit Chrom-, Nickel-, Molybdän und Mangan-Anteilen eingesetzt werden. Alternativ werden Werkstoffe aus palladiumlegierten Titanwerkstoffen verwendet. Außerdem werden in Meerwasserentsalzungsanlagen zahlreiche Chemikalien zum Betrieb eingesetzt, darunter Zink-Orthophosphat, das als Korrosionsschutzmittel eingesetzt wird. Die Rohstoffrelevanz korrosionsfester Werkstoffe für Meerwasserentsalzungsanlagen zeigt die Studie von ISI/IZT für das Bundeswirtschaftsministerium zum Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien (2008). So wird gemäß der Bedarfsvorschau bei Titan im Jahr 2030 rund ein Viertel der Titan-Weltproduktion (2006) erreicht. Der Molybdän-Bedarf könnte rund 5 % der Weltproduktion erreichen. Der Palladiumbedarf in Höhe von 58,8 t erreicht über ein Viertel der Jahresproduktion in Höhe von 224 t. Die Studie kommt zu dem Schluss: „Da bei Titan-Metall und Palladium merkliche Nachfrageimpulse auf die Rohstoffmärkte wahrscheinlich sind, stellt sich auch die Substitutionsfrage“ (ISI/IZT 2008).

2.5.3.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Im Sinne des Projektes besteht kein weiterer Untersuchungsbedarf. Bei bestimmten Anlagen (z. B. Meerwasserentsalzungsanlagen) könnten korrosionsfeste Werkstoffe von rohstofflicher Bedeutung sein, was hier aber nicht untersucht wurde.

³⁸ Bei den ermittelten Zahlen handelt es sich um eine Überschlagsrechnung zur dimensional Abschätzung. Sie basiert auf der installierten Gesamtkapazität der Membrananlagen aus dem Jahr 2006 (Pinnekamp 2008) und legt die Annahme zu Grunde, dass der Anteil der Neuinstallationen im Verhältnis zu kumulierten Gesamtkapazität im Jahr 2006 bei 10 % liegen könnte. Darüber hinaus wird vorausgesetzt, dass der Markt jährlich bis zum Jahr 2020 um 10 % wächst (Markets and Markets, 2015). Für spätere Zeiträume wird der Wert aus dem Jahr 2020 fortgeschrieben, da nicht von einem derartigen Wachstumsanstieg über lange Zeiträume auszugehen ist. Der von Mansion (2013) geschätzte Marktanteil keramikbasierter Membrantechnologie von 20 % wird dabei für den gesamten Berechnungszeitraum veranschlagt.

2.5.3.7 Quellen

- BBC Research, 2013 Research 2013: The Global Membrane Filtration Market,
[http://www.bccresearch.com/pressroom/mst/global-membrane-filtration-market-reach-\\$2.6-billion-2018BBC](http://www.bccresearch.com/pressroom/mst/global-membrane-filtration-market-reach-$2.6-billion-2018BBC)
- BFE, 2005 Bundesamt für Energie BFE, Technologie-Monitoring, Bern
- Duscher, 2013 Duscher, S. 2013: Keramische Membranen für die Filtration von Flüssigkeiten: Eine Bestandaufnahme, in: F&S Filtrieren und Separieren, Jg. 27, 2013, Nr. 4, S. 200-204 sowie Nr. 5, S. 292-295
- DVGW, 2008 DVGW 2008: Einsatzmöglichkeiten keramischer Membrane bei der Wasseraufbereitung.
http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/aufbereitung/forum2008_mueller.pdf
- Frost & Sullivan, 2005 Southern European membrane separation systems markets.
 Report no. B615-15, London: Frost & Sullivan
- Frost & Sullivan, 2006a Northern Europe membrane separation systems markets.
 Report no. B921-15, London: Frost & Sullivan
- Frost & Sullivan, 2006b Central and eastern European membrane separation systems markets. Report no. B944-15, London: Frost & Sullivan
- IFAT 2008 Stand der Membrantechnik in der Trinkwasseraufbereitung in Deutschland. In: energie - wasser-praxis/2008. <http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/aufbereitung/0804lipp.pdf>
- IKTS, 2010 IKTS Fraunhofer,
http://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/de/doc2/Publikationen/Jahresberichte/Fraunhofer_IKTS_Jahresbericht_2010.pdf
- ISA, 2003 <http://www.patent-de.com/19960919/DE69208313T2.html>
- ISI/IZT, 2008 Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien, im Auftrag des BMWi, 2008
- Markets & Markets, 2015 <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/ceramic-membranes.asp>
- Membrane Consultancy, 2010 The Membrane Water Technology Market, Graeme Pearce, 2010,
http://www.bluetechforum.com/wp-content/uploads/2011/03/08-Graeme_Pearce_BlueTech-Jun10.pdf
- Pinnekamp, 2008 Begleitprojekt zu FuE-Vorhaben im Bereich der Membrantechnik in Nordrhein-Westfalen (FEMem). Aachen. http://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/Abschlussbericht_Membran.pdf
- Rippberger 2009 Anwendungen der Mikro- und Ultrafiltration zur Wasseraufbereitung. In: F & S Filtrieren und Separieren, 23 (2009) Nr. 5., S.246-252
- SAM, 2007 Sustainable Asset Management AG. Zukunftsmarkt Wasser.
https://www.umweltfondsvergleich.de/assets/components/pdf/Wasserstudie_SAM_2008.pdf
- TAMI Deutschland, 2015 www.tami-deutschland.de/de/produkte/keramische-rohrmembranen

2.5.4 UT Nr. 52: „Phosphorrückgewinnung“

2.5.4.1 Technologiebeschreibung

Phosphor ist in der Landwirtschaft essentiell, steht aber in natürlichen abbauwürdigen Vorkommen nur begrenzt zur Verfügung. Sedimente sind zunehmend mit Cadmium und Uran belastet. Die Rückgewinnung von Phosphor aus sekundären Quellen kann einen Beitrag zur Umweltentlastung und Ressourcenschonung leisten. Zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammmaschen sind in den letzten Jahren verschiedene Verfahren entwickelt worden. Heute existiert mit 46 Verfahren (IWAR 2015) eine regelrechte Verfahrenslandschaft. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ausgangsstoffe, der Prozessführung (Kristallisation, Säureaufschluss, hydrothermaler Aufschluss etc.), Rückgewinnungseffizienz oder Pflanzenverfügbarkeit der rückgewonnenen Produkte. (UBA Texte 25/07, Fraunhofer Umsicht 2012).

Tabelle 2-181: Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung

Abwasser & Prozesswässer	Klärschlamm	Klärschlammasche
Kristallisation / Fällung - Phostrip - DHV-Crystalactor® - Ostara PEARL® - Unikata Phosnix® - Nishihara - Kurita Festbettreaktor - Ebara - MAP Kristallisation Treviso - CSIR Wirbelschichtreaktor - REPHOS® - P-RoC - PRISA-Verfahren - Sydney Waterboard Reaktor Ionenaustausch - REM NUT® - PHOSIEDI Sonder- und Kombiverfahren - RECYPHOS - Magnetseparator	Kristallisation - AirPrex MAP-Verfahren - PECO-Verfahren (biol.) - FIX Phos Säureaufschluss - Stuttgarter Verfahren - Seaborne-Verfahren - Kemira KEMICOND® Hydrothormaler Aufschluss - PHOXNAN LOPROX - Kemira KREPRO® - Aqua Reci - Cambi-Prozess Thermischer Aufschluss - Mephrec - ATZ-Eisenbadreaktor	Nasschemischer Aufschluss - RÜPA (PASCH) - SEPHOS - SESAL (Weiterentwicklung von SEPHOS) - BioCon - Eberhard-Verfahren - RecoPhos Thermischer Aufschluss - SUSAN - Mephrec - ATZ-Eisenbadreaktor Elektrokinese - EPHOS Bioleaching - Inocre

Quelle: (Fraunhofer Umsicht 2012)

Nach Sartorius lässt sich der Stand der Technik wie folgt zusammenfassen:

- Am „einfachsten“ hinsichtlich der Prozessführung ist die Fällung oder Adsorption von Phosphat aus dem Kläranlagenablauf, da hier fast alle Begleitstoffe bereits entfernt sind und im Wesentlichen nur eine Anreicherung durchgeführt werden muss. Nachteil ist, dass das Phosphat in sehr verdünnter Form vorliegt und die Ausbeute gering ist, was sich auf die Wirtschaftlichkeit der Verfahren (z. B. P-ROC, RECYPHOS, PHOSIEDI) negativ auswirkt.
- Im Schlammwasser liegt Phosphat in konzentrierterer Form vor. Es muss im Vergleich zur Rückgewinnung aus dem Ablauf (1) aber ein gewisser Zusatzaufwand betrieben werden, um das Schlammwasser vom übrigen Schlamm abzutrennen. Schwermetalle und organische Schadstoffe verbleiben im Schlamm und müssen nicht abgetrennt werden. Die Verfahren (z. B. PEARL, PRISA) sind daher relativ kostengünstig und haben eine mittlere P-Ausbeute.
- Ähnlich wie bei der Rückgewinnung aus dem Schlammwasser (2) ist die Ausbeute bei der Fällung im Schlamm, vorzugsweise während oder nach der Faulung. Allerdings müssen die ausgefällten Phosphatpellets im Zuge dieser Verfahren (z. B. AIRPREX, FIX-PHOS) anschließend vom Schlamm getrennt werden, was den Aufwand erhöht.
- Am größten ist der Aufwand, wenn Phosphat vor der Abtrennung zuerst chemisch und physikalisch aus dem Schlamm gelöst werden muss (z. B. PHOXNAN, SEABORNE). In diesem Fall lösen sich typischerweise auch die unerwünschten Begleitstoffe, so dass viel Aufwand betrieben werden muss, diese vom Phosphat zu trennen. Neben der Verfahrenstechnik erweisen sich hier die erforderlichen Betriebschemikalien als Kostentreiber.
- Aufgrund der durch die Verbrennung entfernten organischen Substanzen ist die Rücklösung und Reinigung des in der Klärschlammasche enthaltenen Phosphats (z. B. im PASCH-Verfahren) etwas einfacher und erfordert weniger Chemikalien, dennoch muss auch hier einiger Aufwand betrieben werden.
- Schließlich wird versucht, die Asche unmittelbar als P-Quelle zu verwenden, zuvor jedoch mit chemisch-metallurgischen Verfahren die unerwünschten Schwermetalle zu entfernen (Bsp.

ASH DEC, MEPHREC). In diesem Fall kommt als wirtschaftlicher Bonus hinzu, dass die abgereicherte Klärschlammmasche nicht auf einer Deponie entsorgt werden muss. (Sartorius 2011)

2.5.4.2 Spezifische Einheit

Die spezifische Einheit ist die rezyklierte Menge Phosphor in t.

2.5.4.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs für die Phosphor-Rückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammmasche sind chemische Mittel zur Fällung, Kristallisation, Adsorption etc. von spezifischer Bedeutung.

Tabelle 2-182: Chemische Mittel bei der Phosphor-Rückgewinnung

Verfahren	Chemische Mittel
Nachfällung/Flockungsfiltration	Natriumaluminat, Magnesium-Verbindungen
Kristallisationsverfahren	Calciumhydroxid, Magnesium
RIM NUT Ionenaustauscher	Natürliche Zeolithe, Natriumchlorid, Magnesium, Kupfer (Anti-Fouling)
Adsorptionsverfahren	Manganoxid, Eisenoxidhydrat, Flugasche, Aktivtonerde, Schlacken, Bimsstein (Adsorbens); Natronlauge, Kohlensäure (Desorption, Neutralisation); Kalk (Fällung aus der Natronlauge)
Magnetseparator	Magnetit (Fe_2O_3)
PRISA-Verfahren (Überschussschlamm)	Magnesium
P-Rückgewinnung aus Fallschlamm	Eisen-, Aluminiumsalze, Schwefelsäure, Natronlauge, tri-Natriumcitrat (als Komplexbilder), Natriumsulfid
Verfahren Berliner Wasserbetriebe	Magnesium (Magnesiumchlorid)
Seaborne-Verfahren	Calcium, Magnesium, Mangan, Eisen
Phostrip-Verfahren	Kalkmilch
Aqua Recí Prozess	Natronlauge, Kalk
Thermische Hydrolyse	Schwefelsäure, Eisen (als Fällmittel), Oxidationsmittel (z. B. H_2O_2)
BioCon-Verfahren (Klärschlammmaschen)	Schwefelsäure, Eisen- bzw. Aluminiumfällmittel
SEPHOS-Verfahren (Klärschlammmaschen)	Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure, Natronlauge, Calcium
SUSAN	Kaliumchlorid (KCL), Magnesiumchlorid (MgCl_2), Chlorgas
Thermochemische Behandlung	Säure, Chloride

Quelle: UBA 2007, Fraunhofer Umsicht 2012

Für den spezifischen Rohstoffbedarf bedeutsam ist Magnesium. Um P und N aus einer Flüssigphase (Prozess- oder Abwasser) zurückzugewinnen, bietet sich die Kristallisation von P, N und Magnesium (Mg) als Struvit (Magnesium-Ammonium-Phosphat: $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) an. Struvit ist in der Landwirtschaft direkt und hochwertig als langsam nährstofffreisetzendes Düngemittel einsetzbar. Bei der

herkömmlichen Fällung von Struvit muss Magnesium als limitierender Reaktant in Form einer Lösung von MgCl_2 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ oder MgO zudosiert werden. (Fraunhofer IKB 2015)

Neben Fällungs- und Kristallisationsmittel sind korrosionsfeste Werkstoffe von spezifischer Bedeutung für Phosphorrückgewinnungsanlagen. So wird beispielsweise der Faulschlamm in der Seaborne-Anlage mittels Schwefelsäure angesäuert. Die Ansäuerung findet in luftdicht verschlossenen Edelstahlbehältern statt. Um das gasförmige, während der chemischen Reaktionen entstehende Kohlendioxid und ggf. Ammoniak auffangen zu können, verfügen alle Behälter über Abzugseinrichtungen. Die Schwefelsäuredosierung wird über ein Online-pH-Messgerät reguliert. Nicht rostende Edelstähle haben einen Chromgehalt von mindestens 10,5 %. Das Chrom bildet eine dünne Passivschicht, die sich selbst nach Verletzung wieder schließt. Mit einer Erhöhung des Chromanteils und der Zugabe von Nickel und Molybdän wird die Korrosionsfestigkeit weiter erhöht. Für eine Abschätzung des Bedarfs an korrosionsfesten Materialien fehlen die Informationen.

Für den spezifischen Rohstoffbedarf bedeutsam sind Magnesium und Mangan, die als Fällungsmittel eingesetzt werden, außerdem Kupfer (als Antifouling-Mittel) und Chrom als Legierung.

Der Rohstoffbedarf ist abhängig von dem Verfahren und der Auslegung der Anlage. Im Fall der Struvitfällung ist der Magnesium-Verbrauch (nach Sartorius 2015) zur gefällten P-Menge stöchiometrisch 1:1, d. h. pro kg P werden 0,784 kg Magnesium verbraucht. „Soll mehr P recycelt werden, muss ein „harter“ Aufschluss des Klärschlammes erfolgen oder die Klärschlammasche (nach Entfernung der Schadstoffe) direkt genutzt werden. Dann sind bis zu 80 % P-Recycling möglich. In diesen Fällen wird aber das P nicht ausgefällt, so dass, wenn überhaupt, viel weniger Mg (als Chlorid zur Entfernung der Schwermetalle) gebraucht wird“. (Sartorius 2015). Der spezifische Bedarf an Magnesium liegt bei bestimmten thermischen Rückgewinnungsverfahren bei 156 kg MgCl_2 /Mg Asche. (Fraunhofer Umsicht 2014)

Tabelle 2-183: Spezifischer Materialbedarf von Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung

Material	2013	2025	2050
Mg	0,784 kg /kg P* 156 kg MgCl_2 /Mg Asche**	0,784 kg /kg P* 156 kg MgCl_2 /Mg Asche**	0,784 kg /kg P* 156 kg MgCl_2 /Mg Asche**
Mn	gering		
Cu	gering	gering	gering

*Struvit Fällung, **thermisches Rückgewinnungsverfahren

Quelle: Sartorius 2015, Fraunhofer Umsicht 2014

2.5.4.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Die Phosphorrückgewinnung ist Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte und ein Entwicklungsschwerpunkt verschiedener Wasserbetriebe. Die Hauptaufgaben liegen in der verfahrenstechnischen Optimierung der Prozesse. Großtechnische Umsetzungen von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Klärschlamm werden in den nächsten Jahren erwartet. Sämtliche Rückgewinnungsverfahren sind derzeit noch nicht rentabel, da die gewonnenen Phosphat-Produkte im Vergleich zur Phosphorgewinnung aus Rohphosphat noch nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. Dies gilt besonders für effiziente Rückgewinnungsverfahren (mit Rücklöseraten von 90 %). Es ist zu erwarten, dass sich dies ändern wird, wenn der weltweite Düngerverbrauch und damit auch die Rohphosphatpreise in den nächsten Jahrzehnten deutlich ansteigen.

Deutschland

In Deutschland wird mit einer Markteinführung der Phosphat-Rückgewinnung bis 2030 gerechnet. Dabei wird die Entwicklung von politischer Seite aus getrieben. So ist in dem Koalitionsvertrag der Parteien der aktuellen Bundesregierung vorgesehen, dass die landwirtschaftliche Verbringung von Klärschlamm zu Düngezwecken in der Landwirtschaft zukünftig verboten und eine Rückgewinnung von Phosphor forciert werden soll. Eine Phosphorrecyclingverordnung, „die u. a. ein Mitverbrennungsverbot von Klärschlamm vorsieht, deren Phosphatgehalt einen festgelegten Wert übersteigt, ist auf langfristige Sicht in Vorbereitung“. (Fraunhofer Umsicht 2014) „In Übereinstimmung mit der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) plant das BMUB die Einführung eines Nährstoffgewinnungsverbotes ab einem Phosphorgehalt von mindestens 12 g je Kilogramm Trockenmasse bzw. einem Phosphatgehalt von 30 g pro kg Klärschlamm –Trockenmasse“. (Fraunhofer Umsicht 2014)

Nach Pinnekamp (2007, UBA 2007) sind mit 24 Anlagen 13,2 % (von 182 erfassten Anlagen von 268 Anlagen der Größenklasse 5 größer 100.000 E insgesamt) in Deutschland für die Integration von entsprechenden Verfahrenstechniken zur Phosphorrückgewinnung geeignet. Dieser niedrige Anteil kann durch eine Umstellung der eingesetzten Verfahren zur Phosphorelimination auf 69,8 % (127 Kläranlagen) erhöht werden. Da die Technologien zur Phosphorrückgewinnung heute noch nicht feststehen, sind keine robusten Prognosen für den Rohstoffbedarf möglich. Das Umweltministerium Baden-Württemberg bewertet in seinem Strategiepapier den derzeitigen Stand der Technik wie folgt: „Die am erfolgversprechendsten erscheinenden technischen Ansätze, um den Phosphor aus Klärschlamm zurückzugewinnen, sind zurzeit Fällung oder Adsorption aus Schlammwasser oder Faulschlamm.“ „So weit Phosphor nicht bereits in der Kläranlage oder mit Hilfe anderer Verfahren zurückgewonnen wird, bietet nach derzeitigem Stand die P-Rückgewinnung aus der Verbrennungsasche von Monoverbrennungsanlagen das höchstmögliche Rückgewinnungspotential. Es existieren Verfahren, die aus der Asche bis zu 90 % (bezogen auf den Kläranlagenzulauf 80 %) des Phosphors gewinnen können. Vorteil der Rückgewinnung aus der Klärschlammasche ist, dass hohe Phosphorkonzentrationen in einem gut lager- und transportfähigen Stoffstrom an zentralen Standorten vorliegen. Verfahren für Klärschlammaschen bedürfen im Hinblick auf die Nährstoffverfügbarkeit im Boden (Düngewirkung) noch der Optimierung.“ (UM BaWü 2012). Es erscheint plausibel anzunehmen, dass zunächst weniger effiziente, aber kostengünstigere nasschemische Verfahren zum Einsatz kommen, langfristig sind effiziente Rückgewinnungsverfahren mit Rücklöseraten von 90 % zu erwarten, die auf wenigen hochkomplexen zentralen Anlagen basieren werden. Folgt man den Überlegungen von Sartorius, wonach 48 % des Klärschlammes für eine P-Rückgewinnung aus dem Schlammwasser zur Verfügung stehen, lässt sich berechnen, dass 252 Kläranlagen mit der Größenklasse 5 einer Gesamtbehandlungskapazität von 13,2 Mio. EW entsprechen. Was die thermische Verwertung anbetrifft, wird (nach Sartorius 2011) davon ausgegangen, dass 23 % des gesamten Klärschlammes, der in Monoverbrennungsanlagen verbrannt wird, für eine Phosphorrückgewinnung geeignet ist. Mittelfristig könnte dieser Anteil auf 37 % steigen. Um bei den 23 % bis 37 % des einer Mono-Verbrennung unterzogenen Klärschlammaufkommens eine Phosphorrückgewinnung vorzunehmen, müssten sieben bis elf Anlagen mit einer Jahreskapazität von je 30.000 Asche gebaut werden.

Nach Angaben von Sartorius (2015) ergibt sich folgende Berechnung: Der Magnesium-Bedarf bei der Struvitfällung ergibt sich aus der Menge/dem Anteil Phosphat, welcher aus dem Klärschlamm bzw. der flüssigen Phase gefällt werden soll/kann. Dieser Anteil beträgt selbst unter günstigen Bedingungen (keine Fe-Fällung, sondern Bio-P-Eliminierung) nur etwa 30 %. Das Gesamtaufkommen an P im Abwasser beträgt rd. 60.000 t/Jahr. Wenn davon 30 % recycelt würden, dann betrüge der maximale Magnesium-Bedarf ca. 14.000 t/a. Geht man davon aus, dass rund die Hälfte in diesem Verwertungspfad recycelt wird, läge der Phosphorbedarf bei 7.000 t/a.

Tabelle 2-184: Phosphorrückgewinnung - Markteinschätzungen für Deutschland

Studien	Marktentwicklung
Fraunhofer Umsicht, 2014	Kurzfristig realisierbar: Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm mit vorheriger biologischer Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk Kurz-, mittelfristig realisierbar: Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm ohne biologische Phosphorelimination und Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Zementwerk Mittel-, langfristig: nasschemische Verfahren, schmelzmetallurgische Verfahren, thermische Rückgewinnungsverfahren
Fraunhofer ISI, 2010; Sartorius 2011	P-Rückgewinnung aus Schlammwasser (Fix-PHOS-Verfahren) in Deutschland 2020-2030: 43 Anlagen der Größenklasse 5 mit einer Gesamtbehandlungskapazität von 13,2 Mio. EW P-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche 2020/2030: 7 bzw. 11 (PASCH-)Anlagen zur P-Rückgewinnung von 23 bzw. 37 % des in Deutschland einer Mono-Verbrennung unterzogenen Klärschlamm-aufkommens

Aufbauend auf diesen Betrachtungen kann die Größenordnung des möglicherweise rezyklierten Phosphors in Deutschland abgeschätzt werden. Auf Grund der unsicheren Datenlage wird keine Unterscheidung zwischen BAU- und Green Economy Szenario vorgenommen.³⁹

Tabelle 2-185: Rezyklierte Menge Phosphor in t in Deutschland

Jährlich rezykliertes Phosphor in t	2013	2025	2050
BAU/Green Economy	0	9.000	18.000

Im Bereich der Forschung und Entwicklung gibt es derzeit eine Vielzahl potentieller Ansätze und Verfahren zur Phosphorrückgewinnung. Dementsprechend ist in Zukunft ein breites Spektrum an angewandter Verfahren und eingesetzter Technologien zu erwarten, das sowohl additive als auch substituierende Komponenten beinhaltet. Sartorius (2011) geht langfristig davon aus, dass die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche gegenüber dem Recyclingverfahren aus Klärschlamm eine größere Rolle spielt. Exemplarisch für andere Verfahren soll hier auf eine Studie von (ISA/ISE/ILR/IME 2011) verwiesen werden, welche für das Jahr 2030 sieben bis elf Anlagen zur Verbrennung von Klärschlammmasche mittels PASCH-Verfahren je 30.000 t Jahrkapazität in Deutschland für möglich hält. Im Zuge des PASCH-Verfahrens würden andere Rohstoffe und Materialmengen als bei der Struvit-Fällung benötigt werden, was den durchaus exemplarischen Charakter dieser Übersichtsrechnung unterstreicht.

³⁹ Im Rahmen dieser Berechnung wird die Phosphorrückgewinnung exemplarisch anhand der Struvit-Fällung, bei der Magnesium eingesetzt wird, durchgeführt, ohne die Vielzahl anderer Verfahrensweisen und Technologien zu berücksichtigen.

Global

Weltweit ist gemäß einer Expertenbefragung des Sartorius (2011) unter 417 Experten aus 40 Ländern damit zu rechnen, dass Phosphorrückgewinnung spätestens im Jahr 2030 in den Industrieländern Einzug halten wird und dass sie dann wirtschaftlich tragfähig sein wird. Bis 2050 ist ein flächendeckendes Phosphor-Recycling in den Industriestaaten möglich. Schlammverbrennung wird sich in vielen Industrieländern etablieren. Im Zuge dessen wird auch die Phosphatrückgewinnung aus Asche (obwohl ein verfahrenstechnisch aufwendiges Verfahren) an Bedeutung zunehmen. (Sartorius, 2011). Phosphor-Recyclingverfahren aus Klärschlamm spielen nach den Vorstellungen der Experten jedoch ebenfalls eine entscheidende Rolle, gleichwohl im Vergleich zwischen Aufbereitung aus Faulschlamm oder aus Asche scheint die Asche bevorzugt zu werden. Bei der Umsetzung der flächendeckenden Einführung des Phosphorrecyclings gilt die Umsetzung einfacher Verfahren an vielen (auch kleineren Standorten) als wahrscheinlicher als die Umsetzung komplexer Verfahren in zentralen Anlagen. (Fraunhofer ISO 2010)

Tabelle 2-186: Phosphorrückgewinnung - Markteinschätzungen weltweit

Studien	Marktentwicklung
Sartorius, 2011	Bis 2050 flächendeckendes Phosphor-Recycling in den Industriestaaten P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche dominiert gegenüber Recyclingverfahren aus Klärschlamm

Analog zur nationalen Betrachtung soll die möglicherweise rezyklierte Phosphormenge abgeschätzt werden, ohne Szenarien zu unterscheiden.⁴⁰

Tabelle 2-187: Rezyklierte Menge Phosphor weltweit in t

Jährlich rezykliertes Phosphor in t	2013	2025	2050
BAU/Green Economy	0	115.455	785.223

2.5.4.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Auf der Basis der definierten spezifischen Einheit sowie dem Fokus auf die Struvit-Fällung resultiert daraus folgender Materialbedarf für Deutschland.

Tabelle 2-188: Materialbedarf für die Phosphorrückgewinnung für Deutschland in t

Material	2013	2025	2050
Magnesium	0	7.056	14.112

⁴⁰ Im Rahmen dieser Berechnung wird die Phosphorrückgewinnung exemplarisch anhand der Struvit-Fällung durchgeführt, ohne die Vielzahl anderer Verfahrensweisen und Technologien zu berücksichtigen. Laut Koch et al. (2009) lässt sich auf globaler Ebene das gesamte Phosphoraufkommen im Abwasser auf 4,3 Mio. t/Jahr beziffern. ISI (2010) prognostiziert für die Industriestaaten einen Einzug der Phosphorrückgewinnung bis 2030 und bis 2050 eine flächendeckende Anwendung. Der Annahme zugrunde legend, dass sich die Demographie zum Abwasseraufkommen äquivalent verhält, wird das Phosphoraufkommen im Abwasser der Industriestaaten über den Bevölkerungsanteil der OECD-Staaten (OECD 2011) definiert. Für das Jahr 2050 werden die entsprechenden demographischen Anteile der BRICS-Staaten addiert (OECD 2011), da bis zu diesem Zeitpunkt von einer Entwicklung dieser Staaten zu Industrienation ausgegangen wird. Demographische Veränderungen innerhalb dieser Staaten sind nicht impliziert. Wie auf nationaler Ebene wird auch hier bis 2025 von 50 % und bis 2050 von 100 % der potentiellen Phosphorrückgewinnung ausgegangen.

Ggf. könnten die Werte infolge des demografischen Wandels geringer ausfallen, sollte die Bevölkerungszahl bis 2050 signifikant zurückgehen.

Weltweit entwickelt sich der Materialbedarf wie folgt:

Laut Koch et al. (2009) wird das akkumulierte Phosphatvorkommen im globalen Abwasserbereich auf etwa 4,3 Mio. t/Jahr geschätzt. Da für Industriestaaten ein Einzug des Phosphor-Recyclings bis zum Jahre 2030 prognostiziert wird (Sartorius, 2011), lässt sich der Materialbedarf für das Jahr 2025 mittels der demographischen Werte der OECD-Staaten ermitteln. Für den Materialbedarf 2050 werden zusätzlich die Bevölkerungsanteile der heutigen Schwellenländer hinzugerechnet. Diese Entwicklung kann durch den potentiellen Einzug des Verbrennungsverfahrens in die Phosphat-Rückgewinnung sowie einer Vielzahl technologischer und demographischer Veränderungen stark beeinflusst werden.

Tabelle 2-189: Materialbedarf für die Phosphorrückgewinnung weltweit in t

Material	2013	2025	2050
Magnesium	0	90.517	615.615

2.5.4.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Untersuchungsbedarf besteht bei der Frage, wie die Effizienz der Phosphat-Rückgewinnung zunehmen könnte, welche Technologien zur Phosphorrückgewinnung sich durchsetzen werden und wie zukünftig der Verfahrensmix weltweit aussehen könnte.

2.5.4.7 Quellen

IWAR, 2015	Abwasser als Ressource. Vortrag: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft. http://www.prueck-bw.de/pulsepro/data/files/3.%20Cornel_klein.pdf
ISA/ISE/ILR/IME, 2011	Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe)
Fraunhofer IGB, 2015	Fraunhofer IGB 2015. Elektrochemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor. http://www.igb.fraunhofer.de/de/kompetenzen/physikalische-prozesstechnik/naehrstoffmanagement/rueckgewinnung-von-phosphor.html
Fraunhofer Umsicht, 2012	Phosphorstrategie für Bayern – Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen. http://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/studien/Phosphorstudie_Umsicht.pdf
Fraunhofer Umsicht 2014	Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Wirtschaft/2014_Studie_Analyse_kritischer_Rohstoffe_fuer_die_Landesstrategie_BW.pdf
Koch et al., 2009	International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams. https://books.google.de/books?id=3gM5ixYKYFIC&pg=PA146&lpg=PA146&dq=phosphorus+wastewater+worldwide&source=bl&ots=16LjNk_UQs&sig=_XHqdFNND_CYwrB0Uvfo9omtCrA&hl=de&sa=X&ved=0CEMQ6AEwBG0VChMIrOnOjrDTyAIVTIYsCh0OgwO9#v=onepage&q=phosphorus%20wastewa&f=false
Sartorius 2011	Sartorius, Ch.: Technologievorausschau und Zukunftschancen durch die Entwicklung von Phosphorrecyclingtechnologien in Deutschland, GEWÄSSERSCHUTZ – WASSER - ABWASSER, Aachen 2011
Sartorius 2015	Persönliche Auskunft von C. Sartorius des Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 17.08.2015
UBA, 2007	Radgen, P., Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung

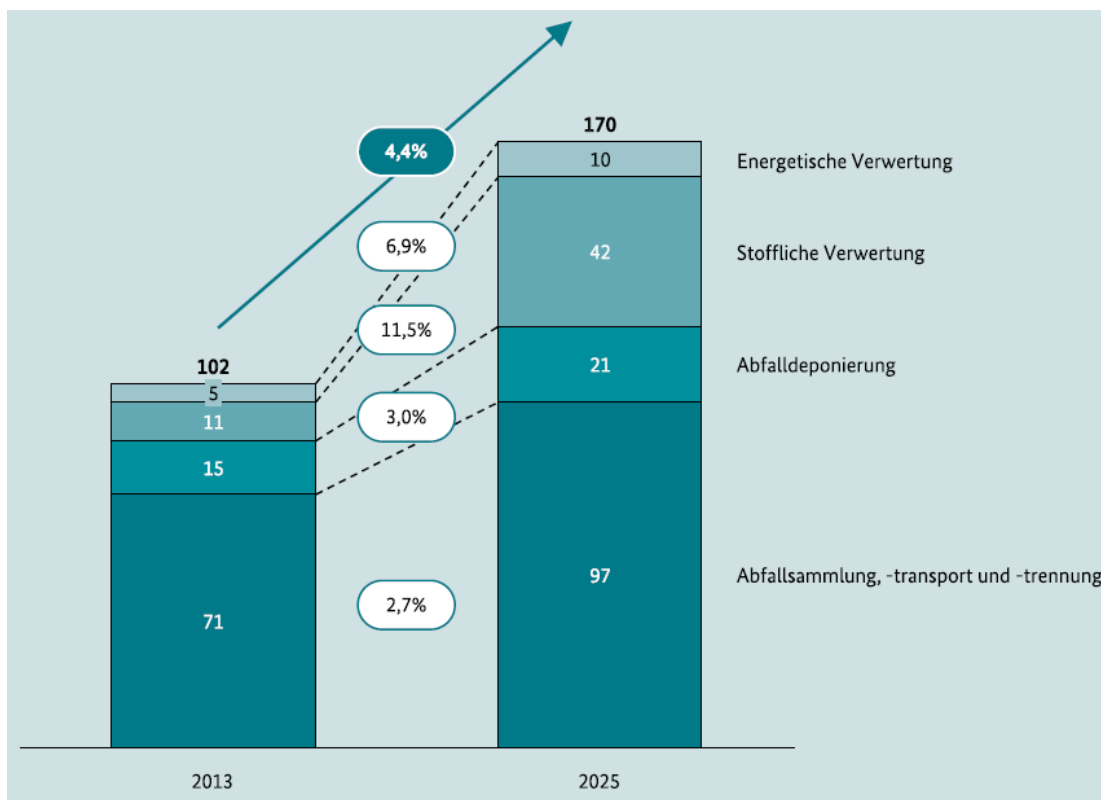
UM BaWü, 2012

Phosphor-Rückgewinnungsstrategie Baden-Württemberg. Stuttgart. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Phosphor-Rueckgewinnungsstrategie_BW.pdf

2.6 Umwelttechnologien im Leitmarkt Kreislaufwirtschaft

Der globale Leitmarkt Kreislaufwirtschaft wird zwischen 2013-2025 nach Prognosen von (BMUB 2014) mit einer moderaten jahresdurchschnittlichen Rate von 4,4 % wachsen. In absoluten Zahlen wird ein Wachstum von 102 Mrd. Euro (2013) auf 170 Mrd. Euro (2025) erwartet. Trotz der niedrigsten jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate von 2,7 % bleibt das Marktsegment Abfallsammlung, -transport und -trennung auch 2025 das wichtigste Marktsegment innerhalb des Leitmarktes Kreislaufwirtschaft (siehe folgende Abbildung). Das am schnellsten wachsende Marktsegment mit jahresdurchschnittlich 11,5 % zwischen 2013 bis 2015 ist jedoch die stoffliche Verwertung. Sie erreicht 2025 ein globales Marktvolumen von 42 Mrd. Euro (BMUB 2014).

Abbildung 2-33: Entwicklung des Volumens des globalen Leitmarktes Kreislaufwirtschaft 2013-2025 differenziert nach Marktsegmenten (in Mrd. Euro und durchschnittliche jährliche Veränderung 2013-2025 in %)



Quelle: BMUB 2014

Der durchschnittliche Weltmarktanteil deutscher Unternehmen am Leitmarkt Kreislaufwirtschaft lag 2013 bei 17 %. Die Technologielinien Energetische Verwertung und Werkstoffliche Verwertung weisen hier überdurchschnittliche Anteile von 34 % bzw. 27 % auf (siehe folgende Abbildung). Für den gesamten Leitmarkt Kreislaufwirtschaft wird nach (BMUB 2014) mit wachsenden Weltmarktanteilen deutscher Unternehmen bis 2025 gerechnet.

Abbildung 2-34: Weltmarktanteile deutscher Anbieter in ausgewählten Technologielinien des Leitmarktes Kreislaufwirtschaft 2013 und Trend bis 2025

Weltmarktanteile ausgewählter Technologielinien 2013		Trend 2025
Energetische Verwertung	34%	
Werkstoffliche Verwertung	27%	
Abfalltrennung	23%	
Abfallsammlung und -transport	17%	
Durchschnitt Leitmarkt	17%	
Rohstoffliche Verwertung	5%	
Deponiebau, -sanierung	3%	

 Zugewinn Marktanteil
  Verlust Marktanteil

Quelle: BMUB 2014

2.6.1 UT Nr. 33: „Automatische Stofftrennverfahren“

2.6.1.1 Technologiebeschreibung

Sensoren sind ein essenzieller Bestandteil moderner Wertstoffsortieranlagen für Abfälle. Die automatisierte Erkennung und Charakterisierung diverser Wertstoffe im heterogen zusammengesetzten Abfallstrom ist die Voraussetzung für eine kostengünstige Trennung zum Zwecke des Recyclings dieser Materialien. Der prinzipielle Ablauf sensorgestützter Wertstoffsortierung in automatisierten Anlagen ist wie folgt: Das Sortiergut wird durch Trennung an der Quelle oder mechanische Verfahrenstechnik in einzelne Fraktionen mit einheitlicher Größenverteilung vorsortiert. Diese Teilfraktionen gelangen nach Vereinzelung auf Förderbänder und durchlaufen eine Sensorzone, in denen die jeweiligen Wertstoffe anhand ihrer Form oder physikalischen Eigenschaften erkannt werden. Computer oder andere elektronische Steuersysteme erfassen die Position der einzelnen Objekte und berechnen den Zeitpunkt deren Eintreffens in der Separationszone. Dort werden sie mittels technischer Einrichtungen (z. B. Pressluft, pneumatische Stempel, u. a.) aus dem durchlaufenden Abfallstrom ausgelesen.

Diese sensorgestützten Sortiervverfahren unterscheiden sich von herkömmlichen Verfahrenstechniken der Stofftrennung dadurch, dass einzelne Objekte spezifisch klassifiziert werden und mittels computergesteuerter Aktuatoren individuell vom restlichen Abfall getrennt werden. Hingegen erfolgt die Trennung bei klassischen Verfahren (z. B. Schwimm-Sink-Trennung, Wirbelstromtrennung) nur auf Grundlage physikalischer Eigenschaften. Der Vorteil von Sensorsystemen liegt in der größeren Bandbreite physikalischer Eigenschaften, die sich für die Trennung nutzen lassen, aber bei klassischen Verfahren nicht technisch umsetzbar sind (z. B. optische Eigenschaften, Label Erkennung).

Folgende Sensortechniken werden je nach Materialeigenschaften im Sortierprozess eingesetzt (Ueping, 2013):

- Nahinfrarot- (NIR) und VIS Spektroskopie
- Elektromagnetische Sensoren
- Farbzeilenkamera-Systeme
- Röntgentransmissionssensor
- Röntgenfluoreszenzanalyse
- Laser
- RFID.

Diese Sensortechnologien werden von kommerziellen Anbietern entwickelt, produziert und meist auch in Sortieranlagen installiert. Welche der Sensortechnologien in welcher Stückzahl zum Einsatz kommen hängt von der Art und Menge des Sortierguts ab. Im Bereich kommunaler Abfallverwertung werden zumeist verschiedenfarbige Kunststoffverpackungen, Papier, Karton und Metalle getrennt. Dabei werden vorrangig optische Sensoren installiert und die erfassten Signale durch Computer in Echtzeit ausgewertet (z. B. Spektralanalyse, Mustererkennung). Auch kompostierbare Abfälle werden mit automatischen Sensoren sortiert, um Kontaminanten abzuscheiden. RFID-basierte Abfallsortierung hat sich bisher nicht durchgesetzt, weil es das Vorhandensein funktionsfähiger RFID tags (Smart Labels) auf den Wertstofffraktionen erfordert. Diese haben sich im Bereich Verpackungen bisher nicht durchgesetzt. Die Gründe dafür sind vor allen die zu hohen Kosten für RFID Tags sowie mangelnde Akzeptanz bei den Konsumenten.

2.6.1.2 Spezifische Einheit

Im Rahmen dieser Analyse wird der Materialeinsatz für eine sensorgesteuerte, mechanisierte Wertstoffsartieranlage betrachtet. Die Größe der Anlage entspricht dem Bedarf einer mittleren Großstadt (500.000 EGW) in Deutschland. Berücksichtigt werden nur die Sensoren und elektronischen Steuergeräte zu einer Erkennung von Wert- und Schadstoffen als einzelne Objekte im Abfallstrom. Hingegen funktionieren die klassischen Verfahrenstechniken (z. B. Wirbelstromabscheidung, Trommelsieb, Rüttelplatte, Windsichter etc.) ohne sensorgestützte Erkennung von Einzelobjekten. Diese Technologien⁴¹ sind nicht Gegenstand dieser Analyse. Ebenfalls nicht im Betrachtungsfeld sind die mechanisierten Komponenten zur Vereinzelung und Abtrennung der vom Sensor erfassten Wertstoffe. Pro Sortieranlage werden in der Regel mehrere Trennprozesse durchgeführt, so dass mehrere Sensorstationen in Reihe oder parallel betrieben werden. Da eine generalisierende Aussage über die Anzahl der Sensorstationen in einer Wertstoffsartieranlage nicht sinnvoll sind, wird im Rahmen dieser Analyse je eine Station per oben genannter Technologie angenommen.

Die spezifische Einheit trägt der Tatsache Rechnung, dass es sich bei den betrachteten technischen Systemen um äußerst langlebige industrielle Anlagen handelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Betriebsdauer der Sensorsysteme (Instandhaltung und Upgrades eingerechnet) bei mindestens 10 Jahren liegt. Für die Berechnung des jährlichen Rohstoffbedarfs muss daher lediglich ein Anteil von 10 % des Materialgehalts angerechnet werden.

Sensorsysteme sind in der Regel aus elektronischen Standardkomponenten und of-the-shelf Computern aufgebaut. Diese Komponenten ähneln in ihrer stofflichen Zusammensetzung der allgemeinen Industrieelektronik bzw. IT-Systemen. Lediglich bei den Emittlern / Rezeptoren (Laser, Röntgen) sowie optischen Komponenten (Linsen, Spiegel etc.) kommen Spezialkomponenten mit erweitertem Materialinventar zum Einsatz. Die Anlagentechnik ist üblicherweise robust konstruiert und dement-

⁴¹ Natürlich kommen auch bei diesen Anlagen Sensoren zum Einsatz, diese dienen aber zur Überwachung des Anlagenzustands und nicht zur Wertstoffidentifikation.

sprechend langlebig. Deshalb gilt die Einschätzung, dass der Materialbedarf für Sensorsysteme im Vergleich zu den Mengen an wiederverwertbarem Recyclingmaterial äußerst gering ist. Beispielsweise erreichen sensorgestützte, optische Sortiervverfahren einen Durchsatz von bis zu 10 t/h. Bei einer angenommenen Standzeit der Anlage von 10 Jahren kann die Anlage im 2-Schichtbetrieb (16 Stunden Betrieb pro Tag) mehr als 500.000 t Abfall sortieren. Diese entspricht der fünfmillionenfachen Masse des Sensorsystems. Vor dem Hintergrund der auf die Masse bezogenen Unerheblichkeit des Sensorsystems geben die folgenden Abschnitte nur einen qualitativen Überblick über die in typischen Sensoren enthaltenen Stoffe.

Elektronische Komponenten und Computer

Jede der Sensortechnologien ist mit industrieelektronischen Komponenten zur Stromversorgung, Signalverarbeitung und Auswertung ausgestattet. Es wird geschätzt, dass die installierte Menge an elektronischen Komponenten und IKT pauschal ca. 100 kg je Sensorstation entspricht. Darin sind alle Signalkabel, Stromleitungen, Schaltschränke mit Schützen etc. enthalten. Außerdem wird mindestens ein PC mit Bildschirm zur Signalauswertung benötigt und ein weiterer zur Ansteuerung der Separiertechnik (hier nicht betrachtet). Bei modernen Anlagen läuft die Analysesoftware auf Servern, welche die Sensorsignale mehrerer Sortierstationen verarbeiten.

Sensoren

Die aktiven Sensorkomponenten haben eine sehr spezifische Materialzusammensetzung, die von der jeweils verwendeten Technologie abhängt. Generell lässt sich feststellen, dass das prozentuale Verhältnis der eigentlichen Sensorelemente zum Rest der Signalverarbeitungshardware sehr gering ist ($> 1\%$ der Masse). Vor diesem Hintergrund (nicht bestimmbarer Referenzsysteme, technologische Heterogenität, geringen Masseanteile) werden die Sensorbauteile in dieser Studie vernachlässigt.

RFID

Die stoffliche Zusammensetzung der RFID Tags wird im Kapitel 2.2.1 erläutert. Die Hardwarekomposition der zur Erfassung der RFID Kennzeichnung erforderlichen Lesegeräte lässt sich im Rahmen dieser Studie aus folgenden Gründen nicht sinnvoll spezifizieren: Die Größe und Bauweise der Lesegeräte hängt von der jeweils verwendeten Kopplungsfrequenz ab. Diese wiederum wird je nach Einsatzzweck und Design des gesamten RFID Systems gewählt und bestimmt über die verwendete Aufbau und Dimensionierung der Antenne sowie der Signalverarbeitung. Mangels Referenzsystem lassen sich hier keine generischen Angaben machen. Stark verallgemeinernd lässt sich jedoch feststellen, dass die Hardware der RFID Lesegeräte jener der allgemeinen IKT Hardware ähnelt. Da diese Systeme langlebige Installationen sind kann der jährliche Materialfluss eines Einzelsystems ebenfalls mit 10 % der Masse veranschlagt werden.

2.6.1.3 Materialbedarf je spezifischer Einheit 2013, 2025 und 2050

Der Materialbedarf der heterogenen Techniksysteeme lässt sich nicht sinnvoll berechnen.

2.6.1.4 Nationale und globale Marktentwicklung

Für diese UT sind keine sinnvollen Angaben möglich.

2.6.1.5 Zukünftige nationale und globale Materialbedarfe nach BAU- und Green-Economy-Szenario

Für diese UT sind keine sinnvollen Angaben möglich.

2.6.1.6 Weiterer Untersuchungsbedarf

Eine generische Zusammenstellung der Materialbedarfe für dieses Technologiefeld ist nicht sinnvoll, weil es sich um keine einheitliche Hardware handelt. Vielmehr bestehen industrielle Anlagen aus einer Vielzahl technischer Baugruppen, deren Auswahl sich nach spezifischen technischen, logistischen, li-

zenzrechtlichen sowie ökonomischen Gegebenheiten richtet. Eine solche Analyse ließe sich nur anhand eines Referenzsystems durchführen. Jedoch wäre jede willkürliche Wahl eines solchen Referenzsystems vor dem Hintergrund der hier betrachteten Systemgrenze nicht repräsentativ für das Technologiefeld. Hingegen ließe sich auf Mikroebene das Materialinventar eines Sensorsystems beschreiben, Dieses ist jedoch aufgrund der geringen Masseanteile auf Makroebene sowie unter Berücksichtigung der Langlebigkeit solcher Anlagen nicht relevant.

Weitergehende Untersuchungen des Materialbedarfs in diesem Technologiefeld sind nur in Hinblick auf eingegrenzte Systemkomponenten sinnvoll. Die Gesamtmasse der Sensoren dürfte jedoch im Vergleich zu den Materialmengen anderer Systemkomponenten recht gering sein. Es wird daher vorgeschlagen, das Technologiefeld „automatische Stofftrennverfahren“ im Rahmen dieser Screening Studie nicht weiter zu verfolgen.

2.6.1.7 Quellen

- Fleischhacker, S. (2011) Stoffliche Verwertung von Abfällen- Einsatz der Nahinfrarot-Sortiertechnik im Bereich von Gewerbeabfällen. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben
- Schug, H., Eickenbusch, H., Marscheider-Weidemann, F., Zweck, A., (2007) Zukunftsmarkt Stofferkennung und -trennung Fallstudie im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern. Herausgeber: Umweltbundesamt.
- Uepping, R. (2013) Sensorgestützte Sortiertechnik.

3 Nationale und internationale Szenario-Ergebnisse ausgewählter Rohstoffe

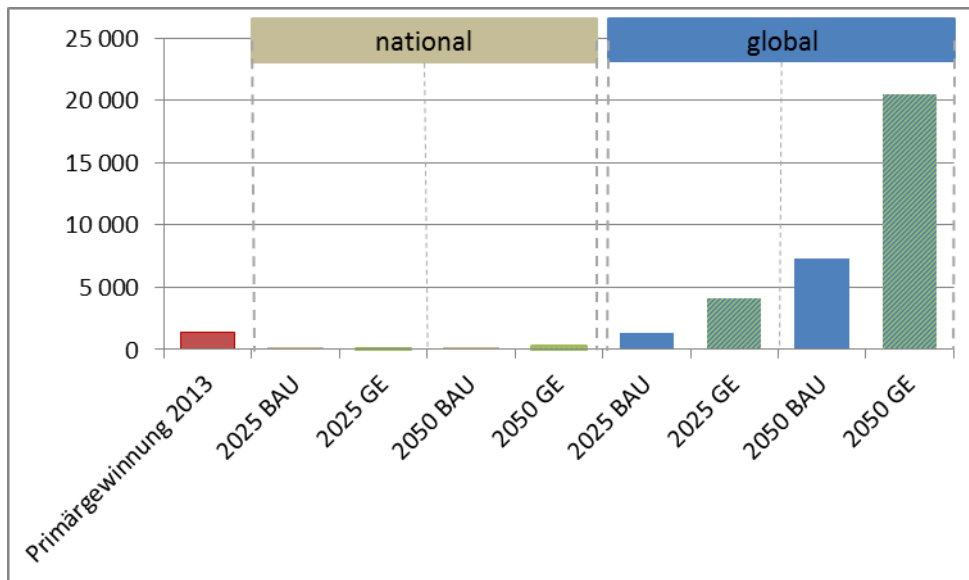
In diesem Abschnitt sind für zehn Metalle, die nach den Szenarien besondere Materialrelevanz aufweisen, die Ergebnisse materialspezifisch aufgeführt. Zur Orientierung ist jeweils der Vergleich mit der Primärproduktion 2013 dem absoluten Materialbedarf nach den nationalen und globalen Szenarien gegenübergestellt. Die Ergebnisse für alle untersuchten Materialien finden sich zusätzlich in Tabellenform im Anhang.

Anschließend folgen jeweils für das Stützjahr 2025 in Form von Kuchengrafiken die Anteile der sechs Leitmärkte am Materialbedarf nach dem globalen Business-As-Usual (BAU)-Szenario sowie dem globalen Green Economy-(GE)-Szenario. Die Beiträge der jeweils wichtigsten Umwelttechnologien bei den wesentlichen Leitmärkten werden herausgestellt. Auf die entsprechende Darstellung für das Jahr 2050 wurde verzichtet, da die Szenarien hier eher nachrichtlichen Charakter haben; die mittelfristige Perspektive (bis 2025) für die Zielstellung von SubSKrit jedoch besonders relevant ist.

3.1 Dysprosium

In der nachfolgenden Grafik sind die Szenarioergebnisse für das Seltenerdmetall Dysprosium der Primärgewinnung 2013 gegenübergestellt. Dysprosium wird fast ausschließlich als Zusatz für Neodym-Eisen-Bor-Magnete, welche höheren Temperaturen ausgesetzt sind, eingesetzt. Der Zusatz von Dysprosium ist für die funktionelle Langlebigkeit dieser Permanentmagnete unter Temperaturbeanspruchung sehr wichtig. Aus der Abbildung ist klar ersichtlich, dass für die untersuchten Umwelttechnologien bereits für das Jahr 2025 nach dem globalen BAU-Szenario (fast 1.300 t) und erst recht nach dem Green-Economy-Szenario (mehr als 4.000 t) die Größenordnung der Primärgewinnung 2013 (knapp 1.400 t) fast erreicht bzw. deutlich übertroffen wird.

Abbildung 3-1: Absolute Materialbedarfe Dysprosium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Aus den nachfolgenden beiden Kuchengrafiken ist ersichtlich, dass die Dynamik des globalen Dysprosiumberarfs für 2025 entscheidend durch den Leitmarkt Nachhaltige Mobilität induziert wird (90 % im BAU bzw. 96 % im GE-Szenario).

Abbildung 3-2: Globaler Dysprosiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

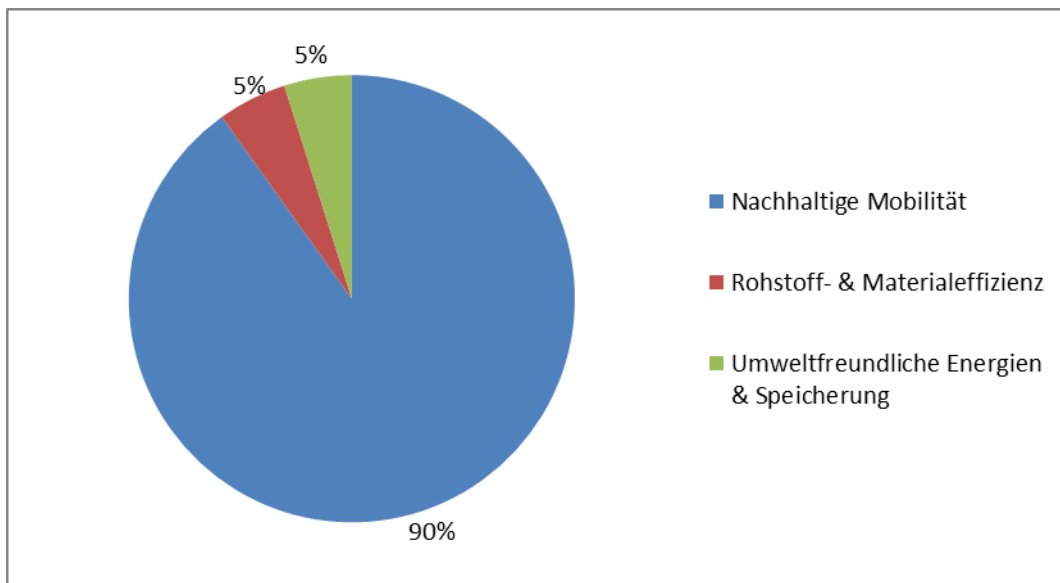
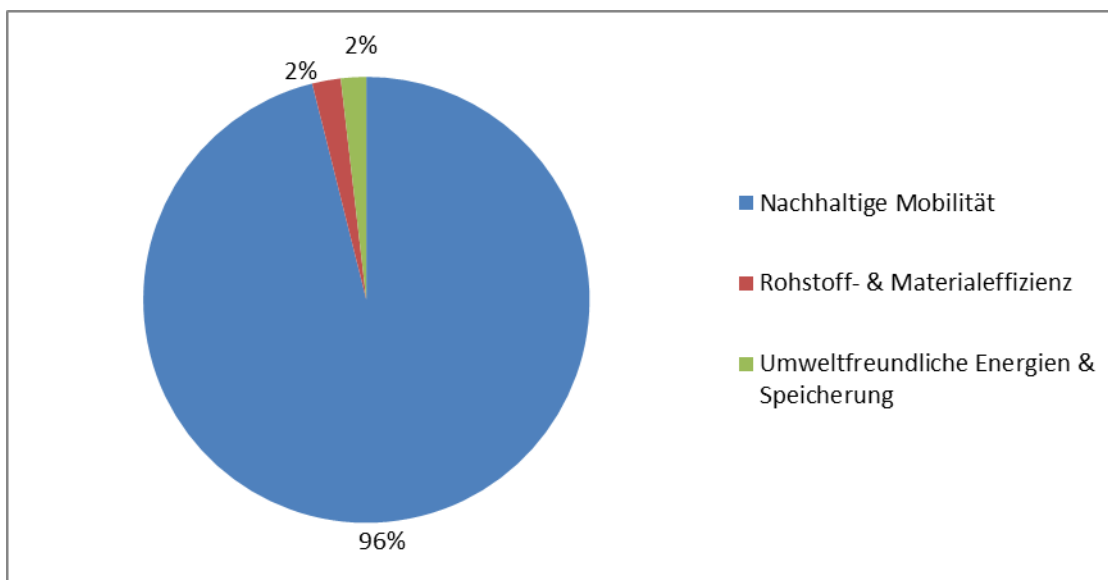


Abbildung 3-3: Globaler Dysprosiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



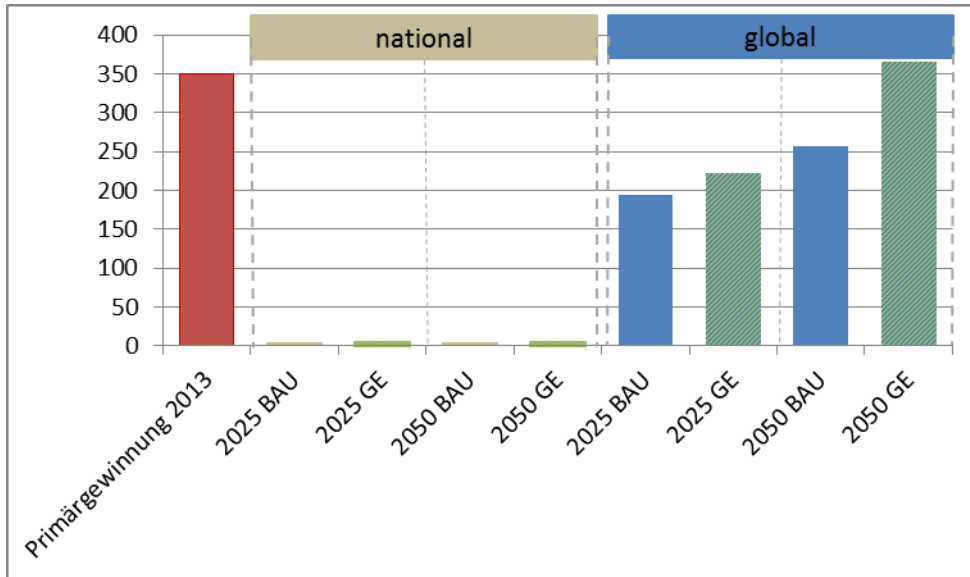
Im globalen BAU-Szenario entfallen 2025 innerhalb des Leitmarktes Nachhaltige Mobilität 52 % des Dysprosiumbedarfs auf Elektromotoren für Hybrid-PKW (UT Nr. 37), 47 % auf Elektromotoren für Plug-in-Hybrid-PKW, vollelektrische PKW und Brennstoffzellenfahrzeuge (UT Nr. 38) und 1 % auf Pedelecs (UT Nr. 35). Im globalen GE-Szenario sind die Verhältnisse für 2025 27 % (Hybrid-PKW), 73 % (vollelektrische PKW etc.) und 1 % für Pedelecs. Die unterstellte (unterschiedliche) Dynamik der Entwicklung der Elektromobilität ist demnach der entscheidende Treiber für den Dysprosiumbedarf, ungeachtet der bereits für 2025 unterstellten Reduktion des prozentualen Dysprosiusgehalts an den entsprechenden NeodymEisenBor-Magneten.

3.2 Gallium

Für das Technologiemetall Gallium zeigen die Ergebnisse der globalen Szenarien im Vergleich zur globalen Primärgewinnung 2013 (350 t) einen signifikanten Bedarf für die untersuchten Umwelttechnologien. Im Falle des BAU-Szenarios 195 t und im Falle des Green-Economy-Szenarios 122 t jeweils für das Jahr 2025. Hierbei ist zu beachten, dass die untersuchten 40 Umwelttechnologien nicht alle Bereiche des aktuellen und zukünftigen globalen Galliumbedarfs abdecken (Halbleiterindustrie etc. ist hier

bedeutsam). Allerdings machten die 40 UTs im Ausgangsjahr 2013 nur 2,2 % des globalen Galliumbedarfs aus. Dies zeigt, dass der globale Galliumbedarf durch die untersuchten UTs zukünftig einen dynamischen Beitrag erhält.

Abbildung 3-4: Absolute Materialbedarfe Gallium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Bei der Untersuchung der Beiträge der einzelnen Leitmärkte hinsichtlich Gallium ist eindeutig der Leitmarkt Energieeffizienz (94 % Anteil im BAU-Szenario; 82 % im Green-Economy-Szenario im Jahr 2025) klar dominierend (siehe folgende Kuchengrafiken).

Abbildung 3-5: Globaler Galliumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

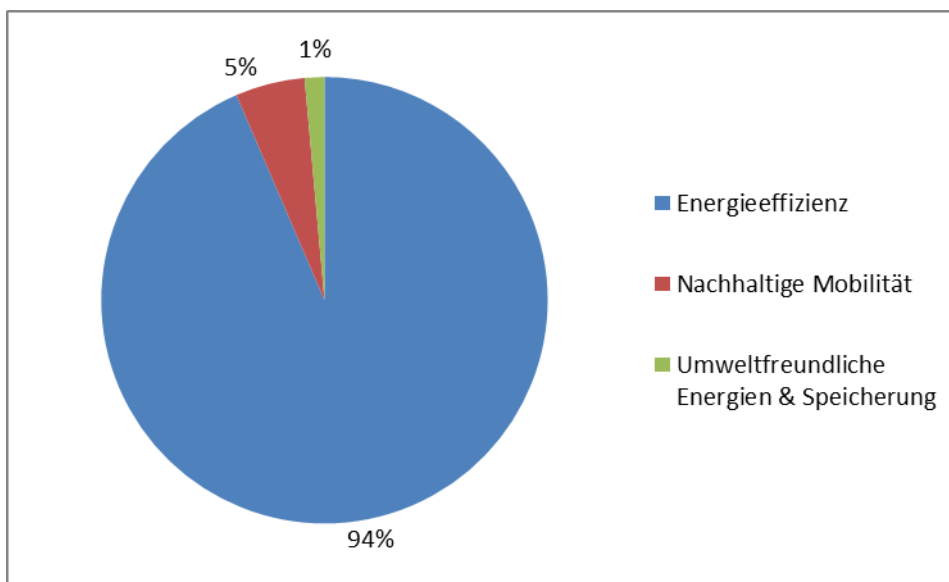
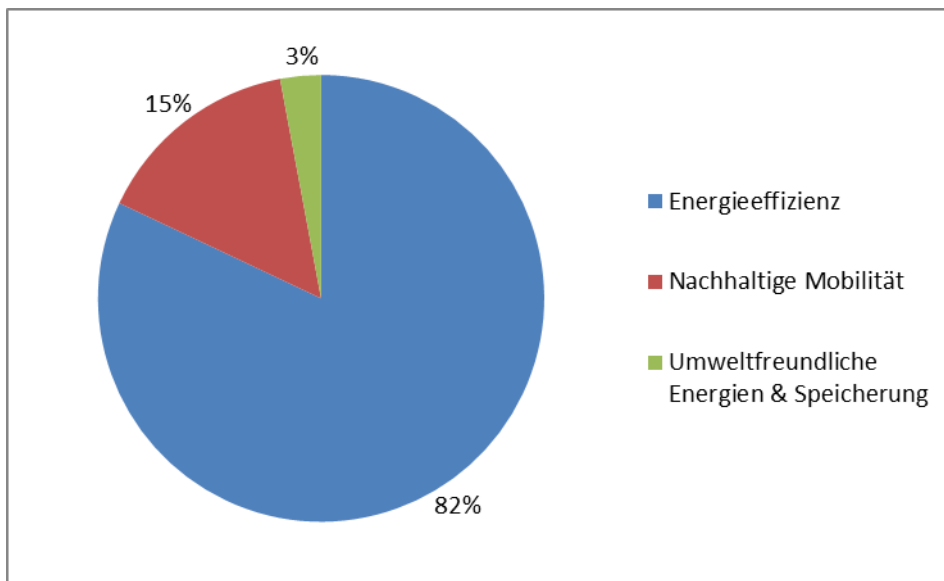


Abbildung 3-6: Globaler Galliumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario

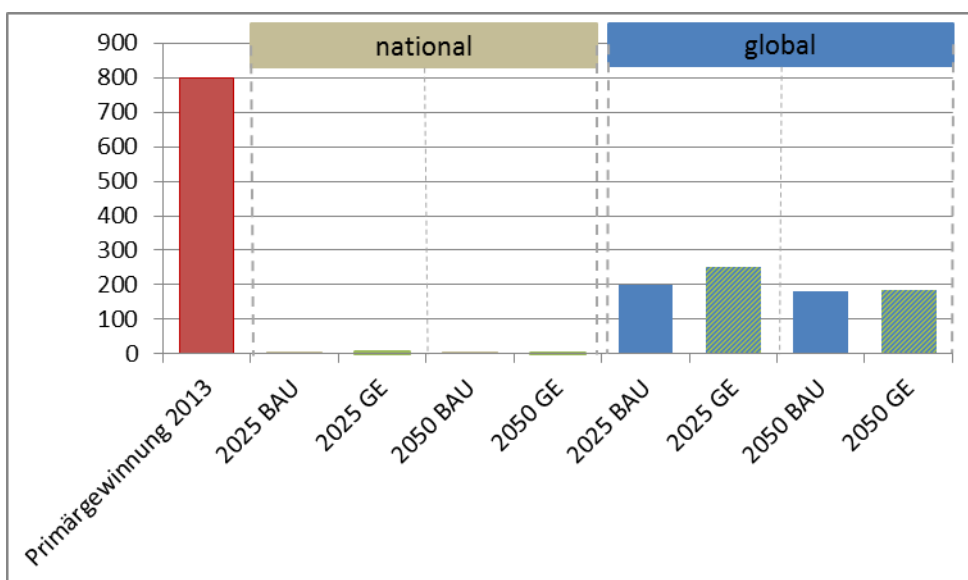


Der Beitrag zum Galliumbedarf im Leitmarkt Energieeffizienz wird in beiden Szenarien zu 100 % durch die Umwelttechnologie wLED (UT Nr.27) hervorgerufen. Die bereits eingesetzte LED-Revolution im Beleuchtungssektor ist demnach ein starker Treiber für den globalen Galliumbedarf.

3.3 Indium

Im Falle des Technologiemetalls Indium tragen für die globalen Szenarien die 40 untersuchten Umwelttechnologien zwar signifikant zum zukünftigen Bedarf bei (siehe folgende Abbildung); jedoch in deutlich weniger ausgeprägtem Ausmaß als im Falle der zuvor beschriebenen Metalle Gallium oder gar Dysprosium.

Abbildung 3-7: Absolute Materialbedarfe Indium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Der Leitmarkt Energieeffizienz ist für das Jahr 2025 mit 81 % (BAU-Szenario) bzw. 64 % (Green-Economy-Szenario) dominierend für den Indiumbedarf der 40 untersuchten Umwelttechnologien. Der Leitmarkt Umweltfreundliche Energien & Speicherung deckt die übrigen Anteile ab. Die anderen vier Leitmärkte spielen für den Indiumbedarf keine Rolle.

Abbildung 3-8: Globaler Indiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

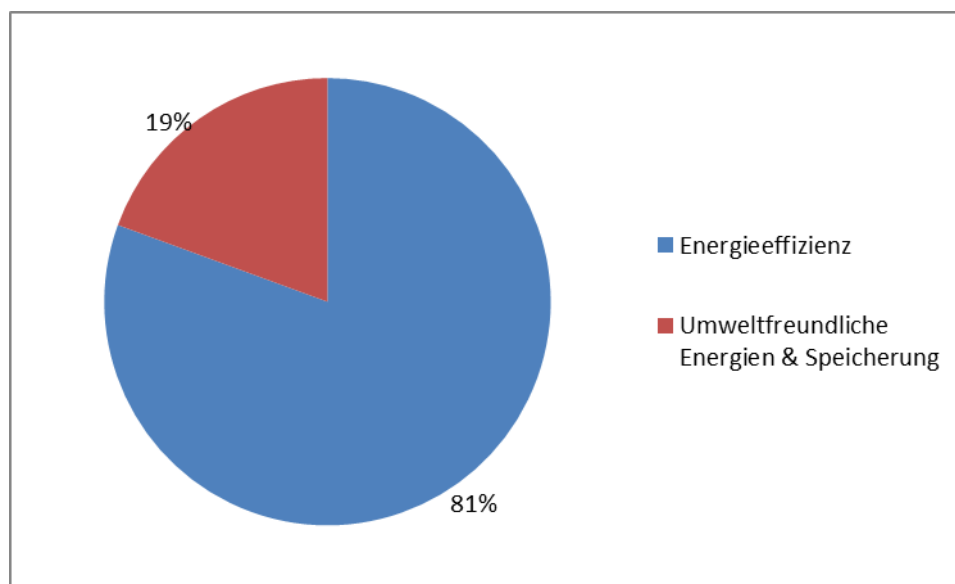
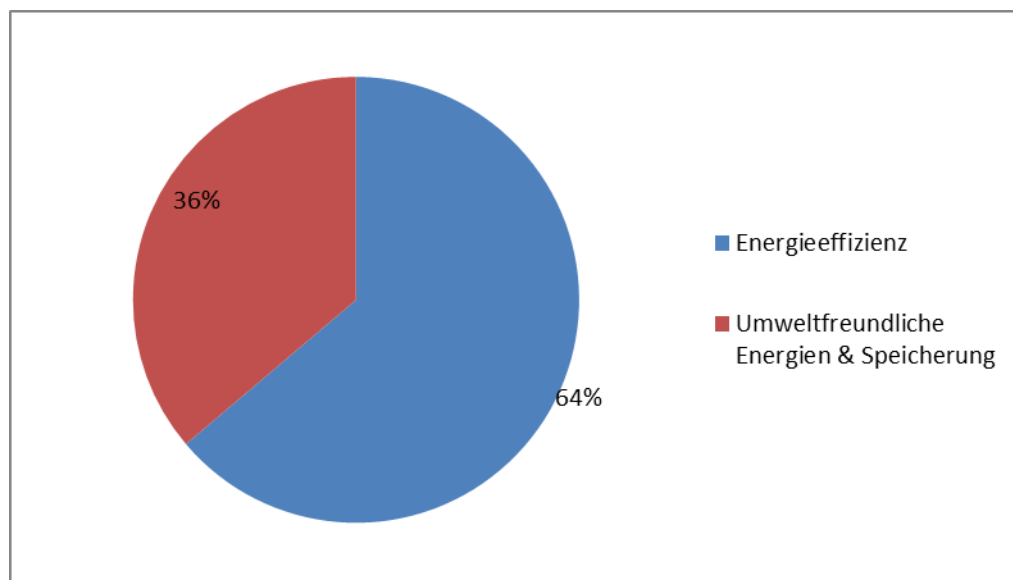


Abbildung 3-9: Globaler Indiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



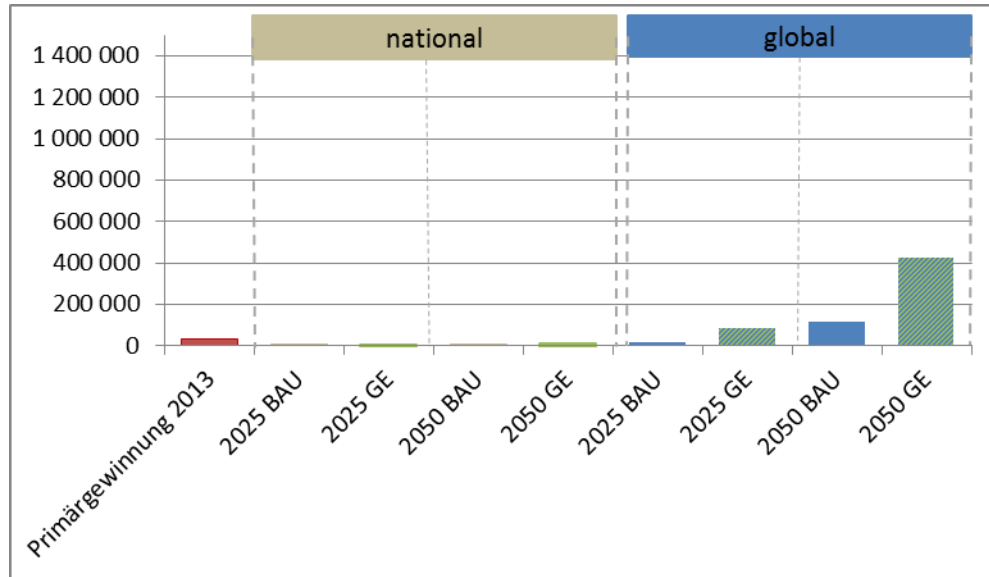
Im Falle des Leitmarktes Energieeffizienz wird der Indiumbedarf in beiden Szenarien durch die Umwelttechnologie wLED (UT Nr. 27) hervorgerufen (siehe auch Auswertung für Gallium). Im Falle des zweitwichtigsten Leitmarktes Umweltfreundliche Energien und Speicherung trägt die UT Dünnschicht-Solarzellen (UT Nr. 87) zu 100 % zum zukünftigen Indiumbedarf bei. Im Green-Economy-Szenario wächst die UT Dünnschicht-Solarzellen bis 2025 stärker als im BAU-Szenario; daher ist hier der Anteil des Leitmarktes Umweltfreundliche Energien und Speicherung größer (36 % statt 19 %; siehe die beiden obigen Abbildungen).

3.4 Lithium

Im Falle von Lithium zeigen die globalen Szenarien der 40 Umwelttechnologien für 2025 im Vergleich zur gesamten Primärgewinnung 2013 (34.000 t, gerechnet als reines Lithium) eine erhebliche Signifikanz. Dies gilt bereits für das BAU-Szenario für 2025 (17.235 t) und erst recht nach den Annahmen für das Green-Economy-Szenario (fast 84.000 t). Hierbei ist unbedingt zu beachten, dass die untersuchten Umwelttechnologien weder alle Batterieanwendungen für Lithium noch andere Verwendungen für Lithium (industrielle Schmiermittel, lithium-organische Chemikalien usw.) umfassen. Im Ausgangsjahr

2013 hingegen betrug der Anteil der 40 Umwelttechnologien im Vergleich zur gesamten globalen Primärgewinnung lediglich 1,8 %. Dies unterstreicht die zu erwartende dramatische Dynamik im Falle von Lithium.

Abbildung 3-10: Absolute Materialbedarfe Lithium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Unter den sechs Leitmärkten ist der globale Lithiumbedarf eindeutig auf den Leitmarkt Umweltfreundliche Energie und Speicherung zurückzuführen (siehe nachfolgende Abbildungen). Hier ist allerdings hervorzuheben, dass die UT Lithium-Ionenbatterien (UT Nr. 98) für PHEV/BEV (Plugin-Hybrid-PKW sowie vollelektrische PKW) per Definition dem Leitmarkt Umweltfreundliche Energie und Speicherung zugeordnet sind. Diese UT macht für diesen Leitmarkt im Jahr 2025 62 % (BAU-Szenario) bzw. 89 % des Lithiumbedarfs aus. Der übrige Anteil entfällt jeweils auf die UT stationäre Lithium-Ionen Batteriespeicher (UT Nr. 100).

Abbildung 3-11: Globaler Lithiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

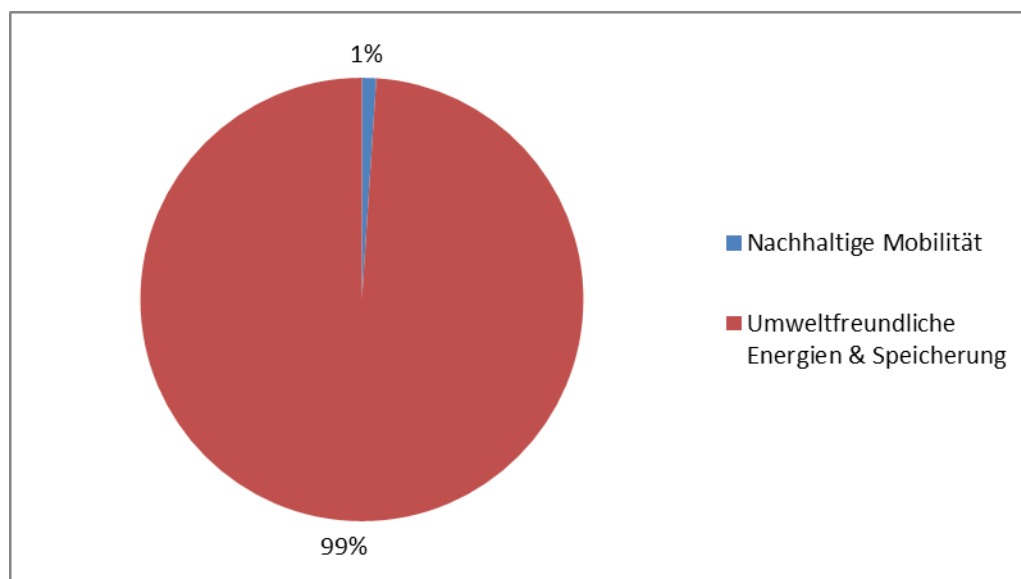
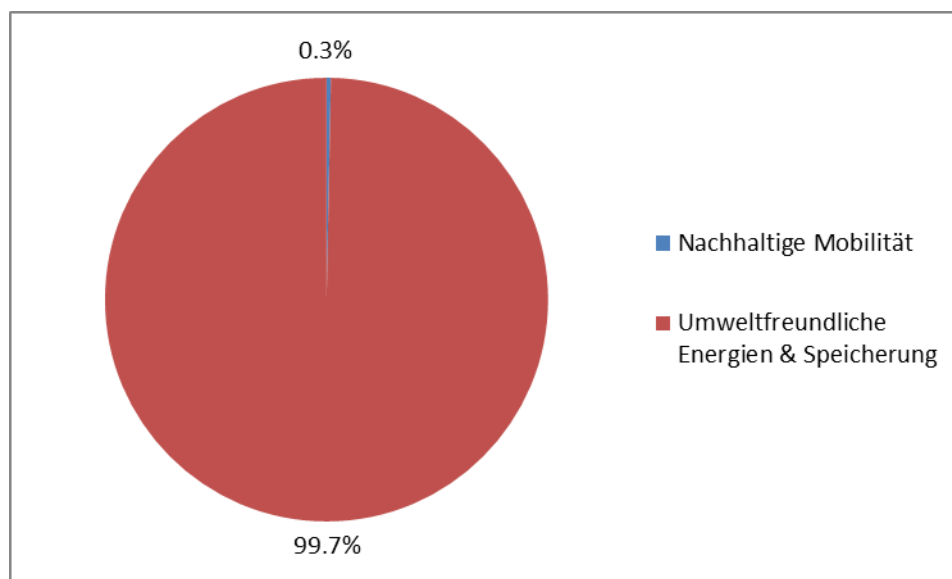


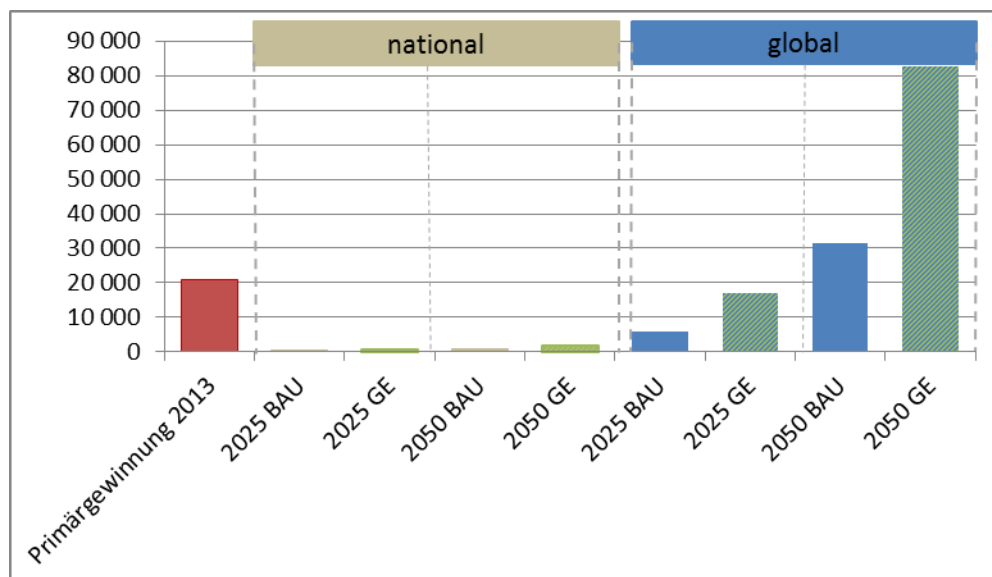
Abbildung 3-12: Globaler Lithiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



3.5 Neodym

Die globalen Szenarien für die 40 Umwelttechnologien weisen im Falle von Neodym für das Jahr 2025 im Vergleich zur gesamten Primärgewinnung 2013 (21.000 t) eine hohe Relevanz nach. Im BAU-Szenario beträgt der Neodymbedarf im Jahr 2025 gut 6.000 t und im Green-Economy-Szenario gut 17.000 t. Für die langfristige Entwicklung (2050) wären die Neodymbedarfe ohne einschneidende Änderungen (Substitution) noch ungleich signifikanter (siehe folgende Abbildung). Der Neodymbedarf wird generell sehr stark von der Nachfrage von leistungsstarken NeodymEisenBor-Magneten bestimmt.

Abbildung 3-13: Absolute Materialbedarfe Neodym [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Der dominierende Leitmarkt hinsichtlich des globalen Neodymbedarfs (2025) ist sowohl im BAU-Szenario (79 %) als auch im Green-Economy-Szenario (91 %) die Nachhaltige Mobilität. Innerhalb des Leitmarktes Nachhaltige Mobilität tragen im BAU-Szenario die UTs Nr. 37 Hybridmotoren (48 %), UT Nr. 38 Elektroantriebsmotoren (43 %) und UT Nr. 35 Pedelecs (9 %) zum Neodymbedarf bei. Im Green-Economy-Szenario sind die entsprechenden Anteile 26 % für Hybridmotoren, 70 % für Elektroantriebsmotoren und 4 % für Pedelecs. Hier spiegelt sich die stärkere Dynamik hinsichtlich der

Marktdurchdringung von Plug-in-Hybrid-PKW, vollelektrische PKW und Brennstoffzellenfahrzeugen im Green-Economy-Szenario wieder.

Der zweitwichtigste Leitmarkt hinsichtlich des globalen Neodymbedarfs 2025 ist sowohl im BAU-Szenario mit 15 % Anteil als auch im Green-Economy-Szenario mit 6 % Anteil der Leitmarkt Umweltfreundliche Technologien und Speicherung. Hierfür ist ausschließlich die Umwelttechnologie Permanentmagnet-Generatoren (UT Nr. 106) verantwortlich. Diese werden für getriebelose Windkraftanlagen benötigt und basieren ebenfalls auf NeodymEisenBor-Magneten.

Abbildung 3-14: Globaler Neodymbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

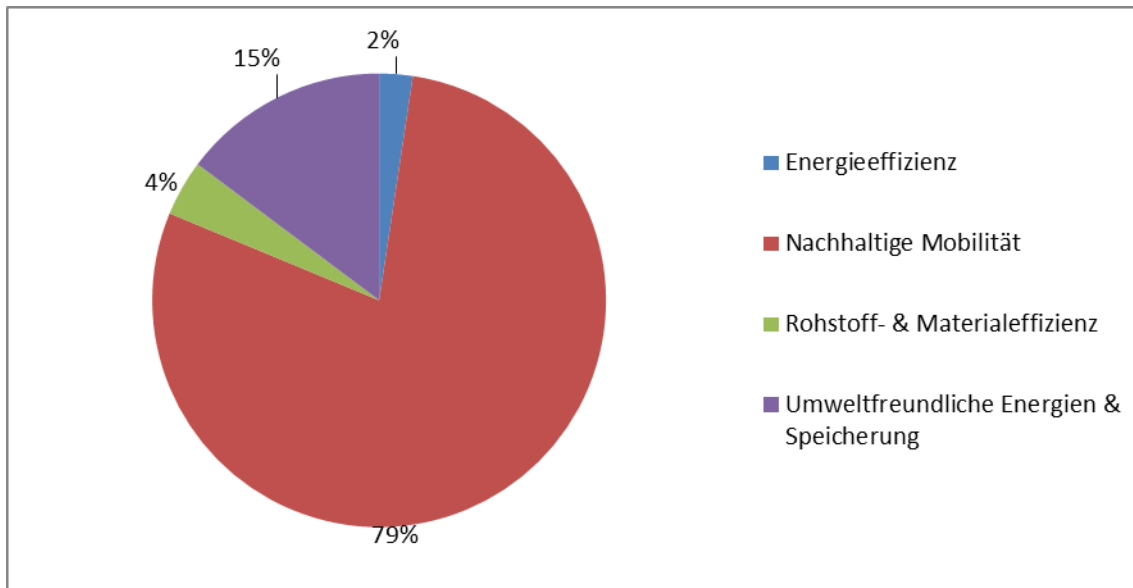
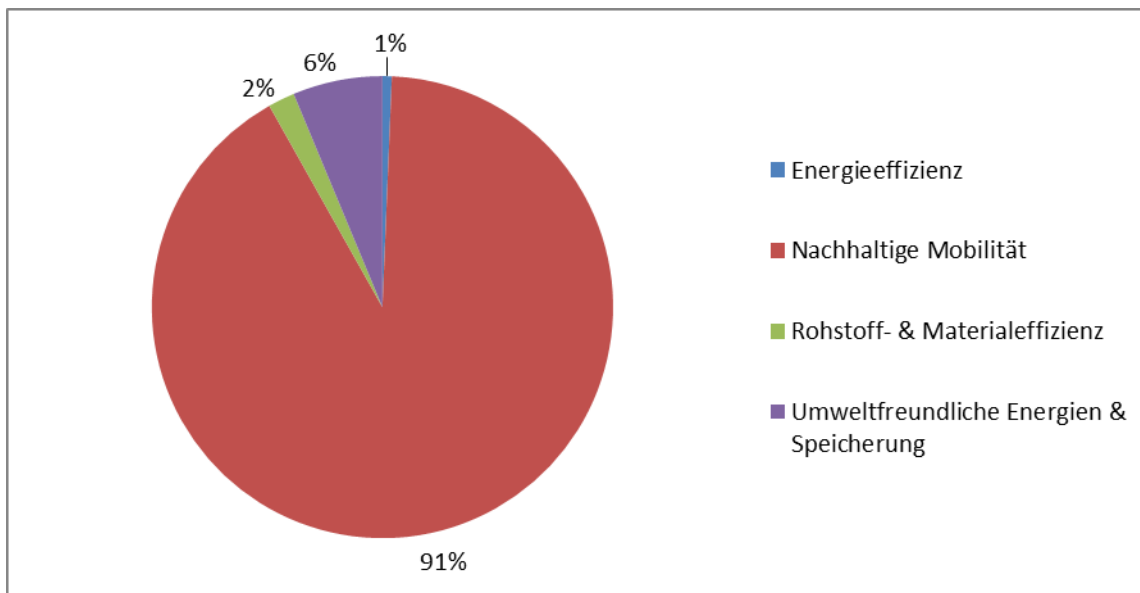


Abbildung 3-15: Globaler Neodymbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario

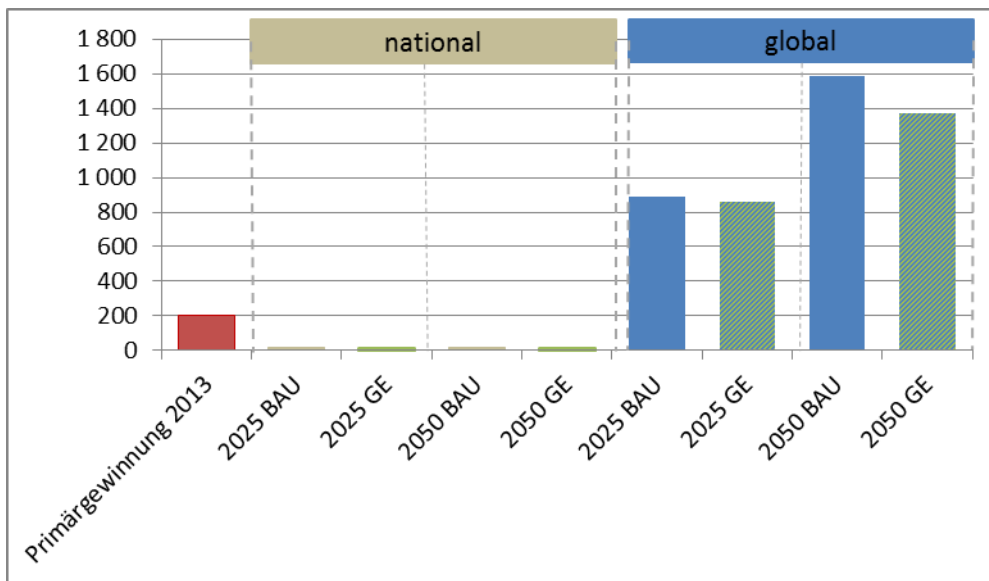


3.6 Palladium

Für Palladium ergeben die globalen Szenarien hinsichtlich der 40 untersuchten UTs für das Jahr 2025 folgendes Bild: sowohl im BAU-Szenario als auch im Green-Economy-Szenario wird das Niveau der Primärgewinnung von Palladium um gut das Vierfache übertroffen (siehe folgende Abbildung). Es sei

an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen, dass jedoch gerade bei Edelmetallen wie Palladium auch ein großer Teil des Bedarfs durch Sekundärmaterial aus dem Recycling gedeckt wird.

Abbildung 3-16: Absolute Materialbedarfe Palladium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Hinsichtlich der Relevanz der Leitmärkte ist Rohstoff- und Materialeffizienz (57 % bzw. 60 % Anteil) der Wichtigste. Es folgt Nachhaltige Mobilität (37 % bzw. 36 %). Vergleichsweise geringe Anteile (6 % bzw. 4 %) weist der Leitmarkt Energieeffizienz auf.

Abbildung 3-17: Globaler Palladiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

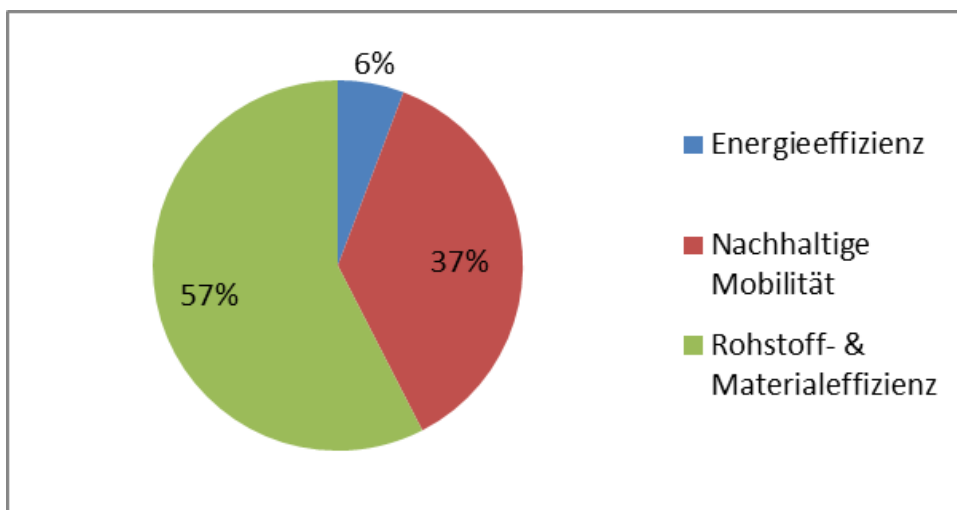
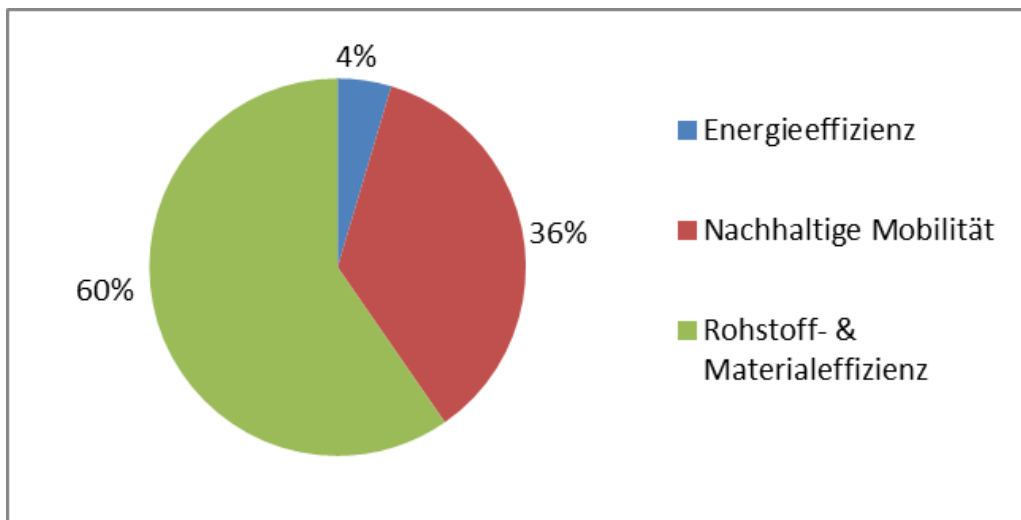


Abbildung 3-18: Globaler Palladiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



Im dominanten Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz ist ausschließlich die Umwelttechnologie Industriekatalysatoren (UT Nr. 53) für den stark wachsenden Bedarf an Palladium verantwortlich. Im Falle des zweitwichtigsten Leitmarktes Nachhaltige Mobilität ist dies ausschließlich die UT Fahrzeugkatalysatoren (UT Nr. 43). Die leicht niedrigeren Palladiumbedarfe im Green-Economy-Szenario für 2025 und 2050 im Vergleich zum BAU-Szenario sind hier auf die unterstellte schnellere Marktdurchdringung vollelektrischer PKW zurückzuführen, die den Bedarf an Autoabgaskatalysatoren im Vergleich zum BAU-Szenario etwas dämpft.

3.7 Rhodium

Für die globalen Materialbedarfe des Edelmetalls Rhodium ergibt sich für das Jahr 2025 ein vergleichbares Muster wie im letzten Abschnitt für Palladium ausgeführt. Das Niveau der Primärgewinnung von 2013 (22 t) wird in beiden Szenarien um ein Mehrfaches übertroffen. Auch im Falle des Edelmetalls Rhodium muss bei der Gegenüberstellung der Zahlen (siehe folgende Abbildung) berücksichtigt werden, dass der Bedarf für Edelmetalle im besonderen Maße durch Sekundärmaterial aus dem Recycling gedeckt wird.

Abbildung 3-19: Absolute Materialbedarfe Rhodium [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013

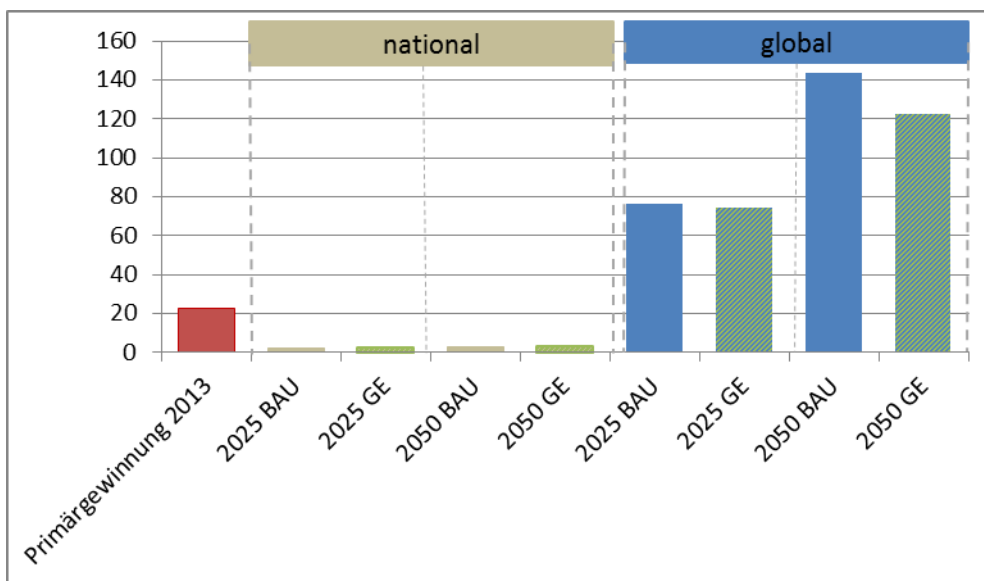
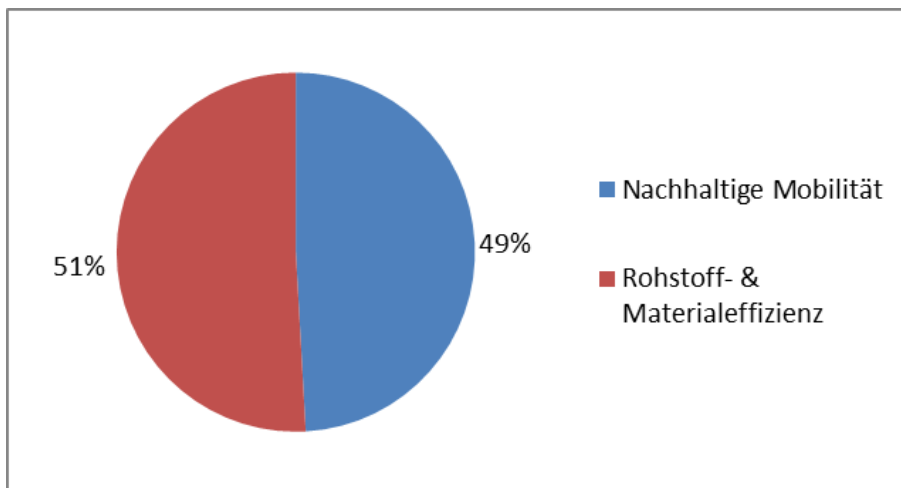
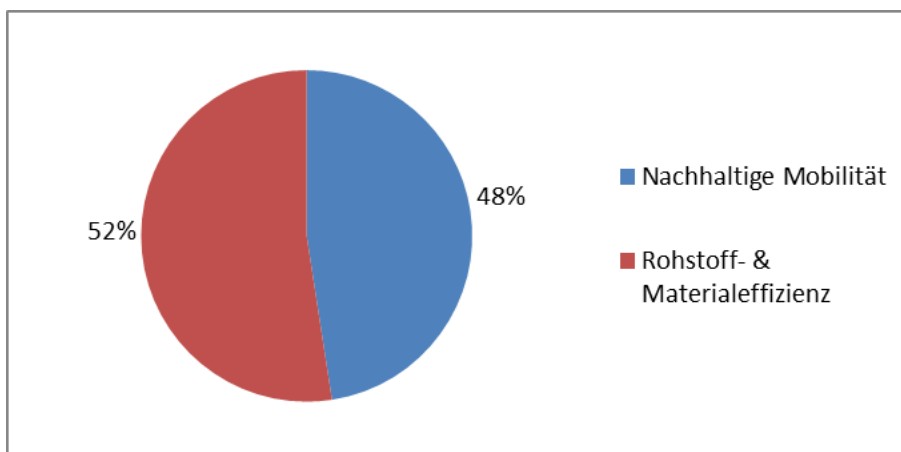


Abbildung 3-20: Globaler Rhodiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario



Der globale Rhodiumbedarf 2025 ist in beiden Szenarien zu etwa gleichen Anteilen auf die Leitmärkte Nachhaltige Mobilität sowie Rohstoff- und Materialeffizienz zurückzuführen. Wie im Falle von Palladium ist im Leitmarkt Nachhaltige Mobilität ausschließlich der Rhodiumbedarf für die UT Autoabgaskatalysatoren (UT Nr. 43) verantwortlich. Im Falle des Leitmarktes Rohstoff- und Materialeffizienz entsprechend die UT Industriekatalysatoren (UT Nr. 53).

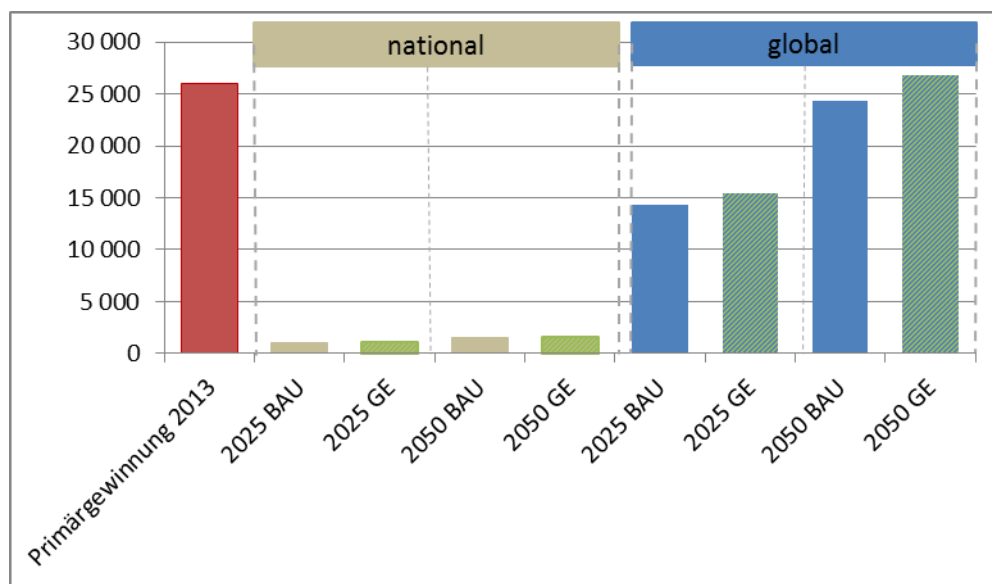
Abbildung 3-21: Globaler Rhodiumbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



3.8 Silber

Für das Edelmetall Silber weist sowohl das BAU-Szenario (gut 14.000 t) als auch das Green-Economy-Szenario (über 15.000 t) im Jahr 2025 eine beträchtliche Relevanz im Vergleich zur gesamten Primärgewinnung 2013 (26.000 t) auf (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 3-22: Absolute Materialbedarfe Silber [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Die Analyse der wesentlichen Leitmärkte weist für Silber in beiden Szenarien für 2025 nahezu gleichwertig die Leitmärkte Energieeffizienz und Rohstoff- und Materialeffizienz aus. Im Leitmarkt Energieeffizienz verteilen sich die Anteile auf die UT Nr. 27 wLED (BAU-Szenario 50 %, Green-Economy-Szenario 48 %), UT Nr. 5 RFID (BAU-Szenario 28 %, Green-Economy-Szenario 27 %), UT Nr. 13b Sauerstoffverzehrkathode (BAU-Szenario 14 %, Green-Economy-Szenario 18 %) und UT Nr. 24 Rechenzentren (BAU-Szenario 8 %, Green-Economy-Szenario 6 %). Im Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz verteilen sich die Anteile auf die UT Nr. 56 bleifreie Lote (BAU-Szenario 81 %, Green-Economy-Szenario 83 %) und UT Nr. 53 Industriekatalysatoren (BAU-Szenario 19 %, Green-Economy-Szenario 17 %). Der wesentliche Unterschied des Bedarfsmusters für Silber im Vergleich zu Edelmetallen wie Palladium und Rhodium besteht darin, dass Silber für eine deutliche höhere Anzahl innerhalb der untersuchten 40 UT benötigt wird. Das Nachfragespektrum im Falle von Silber ist breiter angelegt.

Abbildung 3-23: Globaler Silberbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

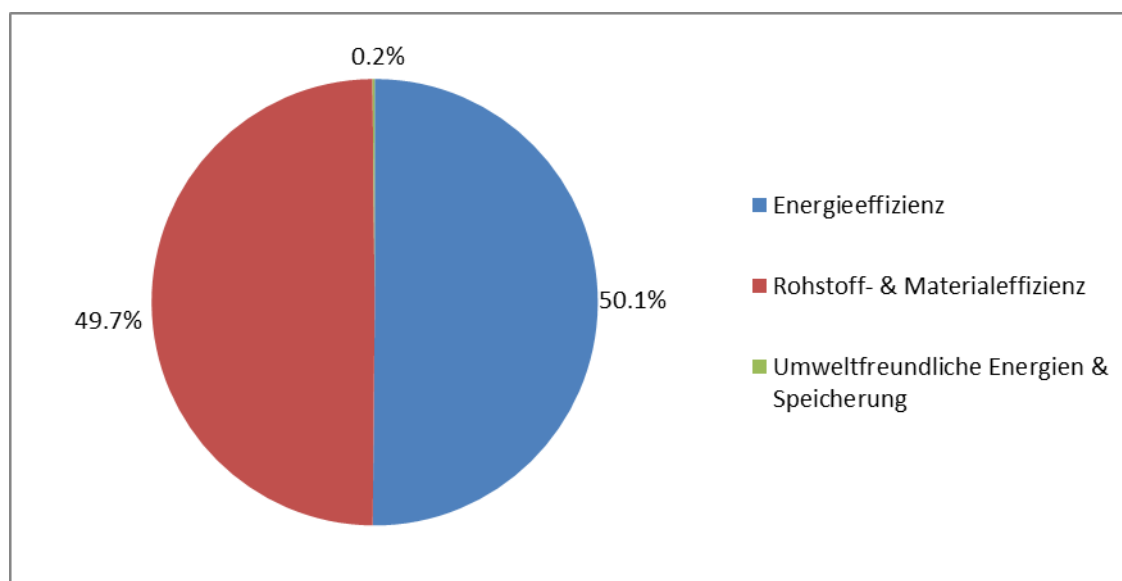
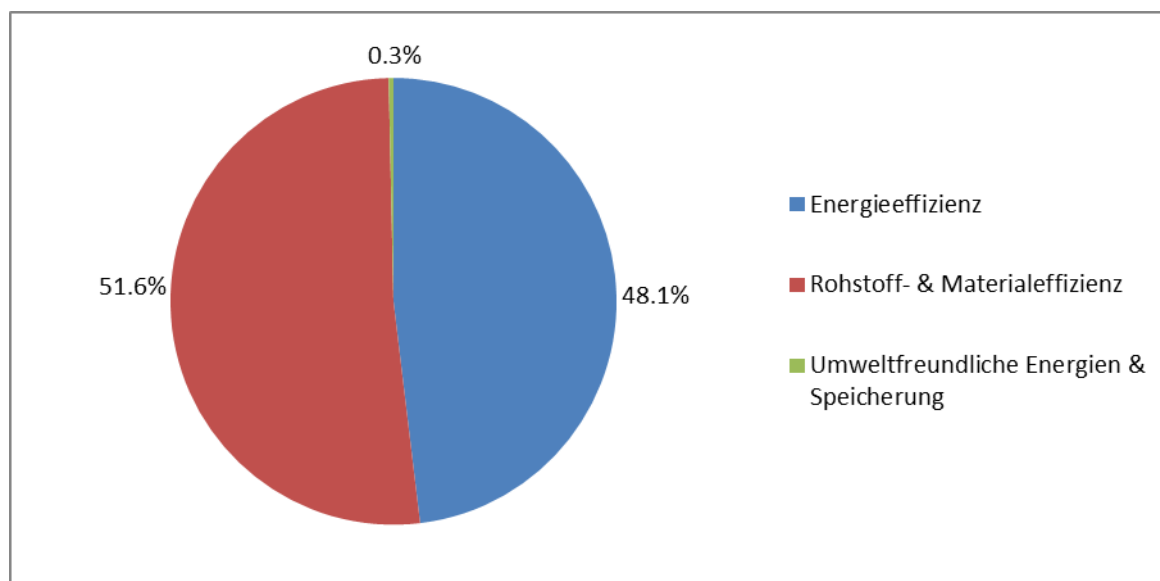


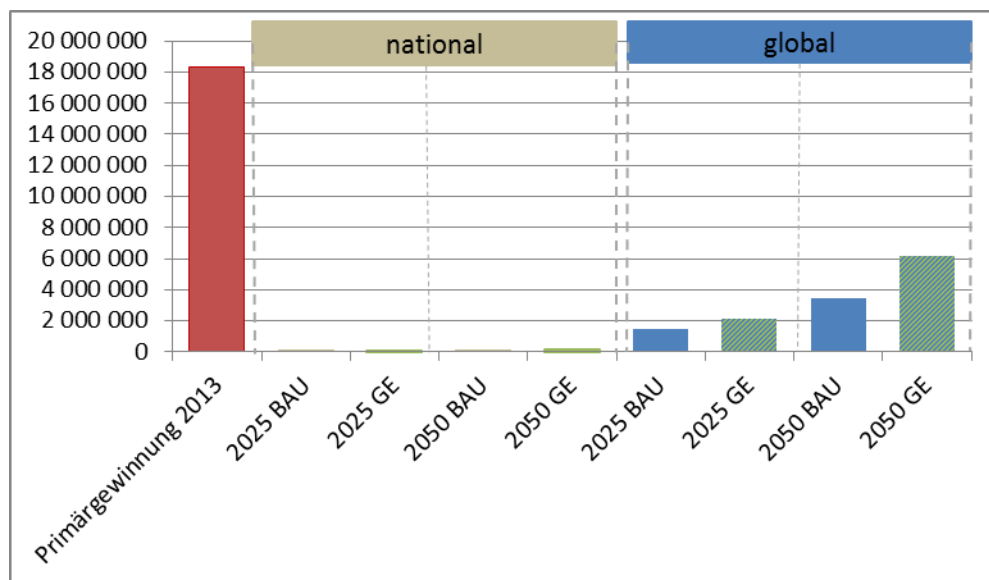
Abbildung 3-24: Globaler Silberbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



3.9 Kupfer

Die globalen Szenarien weisen für Kupfer für das Jahr 2025 eine zumindest moderate Relevanz im Vergleich zur Primärgewinnung 2013 (18,3 Mio. t) auf. Im Falle des Green-Economy-Szenarios ist der globale Kupferbedarf durch die 40 UTs mit gut 2 Mio. t größer als im BAU-Szenario mit rund 1,5 Mio. t (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 3-25: Absolute Materialbedarfe Kupfer [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Hinsichtlich der Aufteilung auf die Leitmärkte fallen für den globalen Kupferbedarf 2025 die Leitmärkte Energieeffizienz (BAU-Szenario 57 %, Green-Economy-Szenario 33 %), Umweltfreundliche Energien und Speicherung (BAU-Szenario 32 %, Green-Economy-Szenario 44 %) sowie Nachhaltige Mobilität (BAU-Szenario 10 %, Green-Economy-Szenario 22 %) ins Gewicht. Der sehr breite Einsatz von Kupfer zeigt sich nicht zuletzt darin, dass dieses Metall für mehr als 10 unterschiedliche UT in relevanter Menge eingesetzt wird.

Abbildung 3-26: Globaler Kupferbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

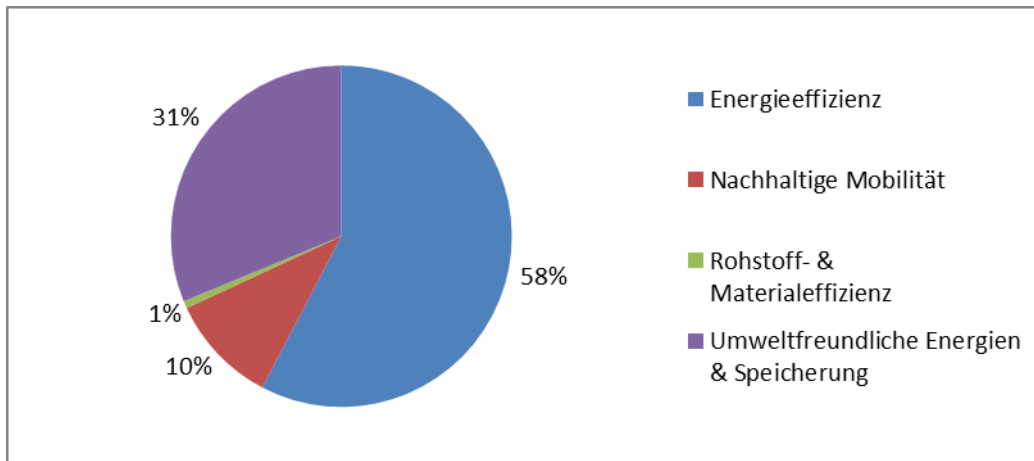
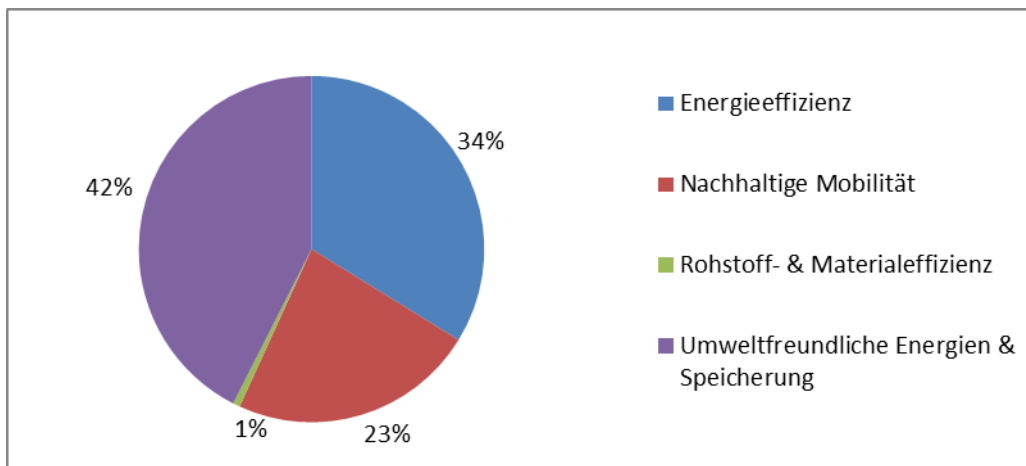


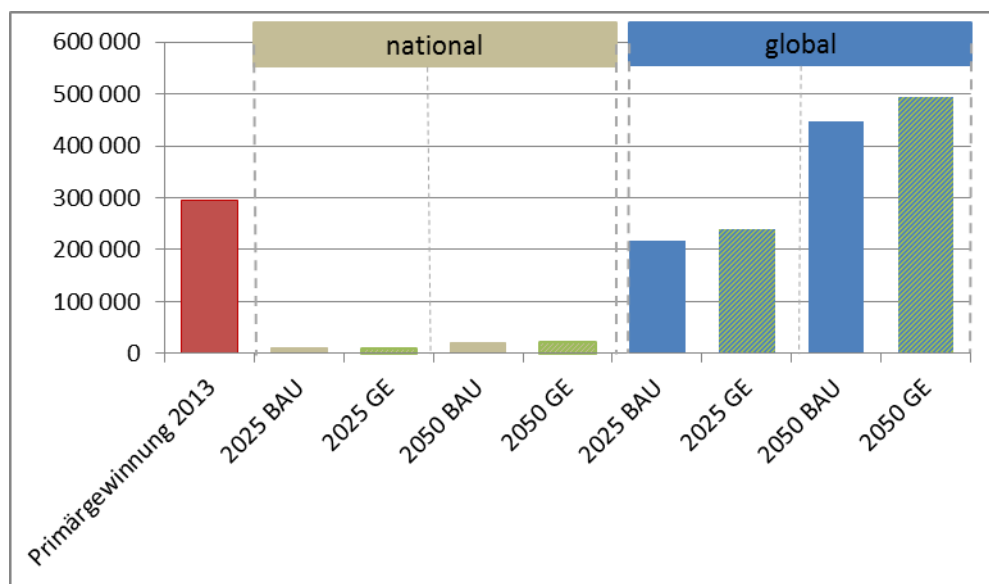
Abbildung 3-27: Globaler Kupferbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



3.10 Zinn

Für Zinn zeigen die beiden Szenarien für das Jahr 2025 im Vergleich zur Primärgewinnung 2013 (294.000 t) eine erhebliche Signifikanz auf (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 3-28: Absolute Materialbedarfe Zinn [in t] im Vergleich zur Primärgewinnung 2013



Die Verteilung des globalen Zinnbedarfs auf die untersuchten Leitmärkte beläuft sich für das Jahr 2025 auf Rohstoff- und Materialeffizienz (92 % bzw. 94 %) sowie Energieeffizienz (8 % bzw. 6 %). Im Falle des Leitmarktes Rohstoff- und Materialeffizienz entfällt der Zinnbedarf jeweils ausschließlich auf die UT Nr. 56 bleifreie Lote. Im Falle des Leitmarktes Energieeffizienz jeweils zu ca. 2/3 auf die UT Nr. 24 Rechenzentren und zu 1/3 auf die UT Nr. 27 wLED.

Abbildung 3-29: Globaler Zinnbedarf 2025 in den Leitmärkten im BAU-Szenario

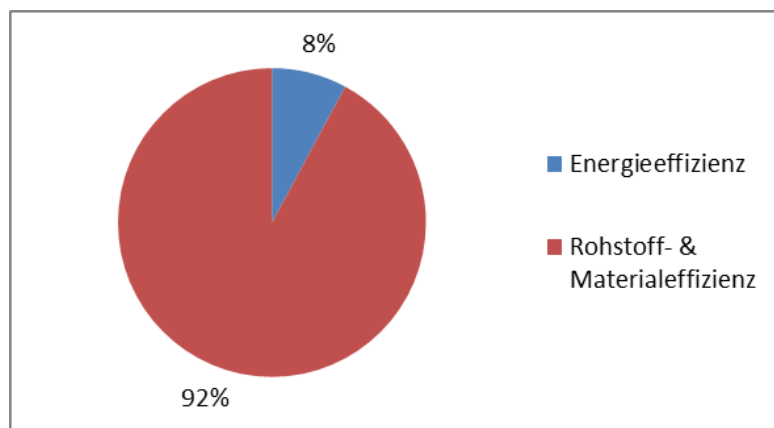
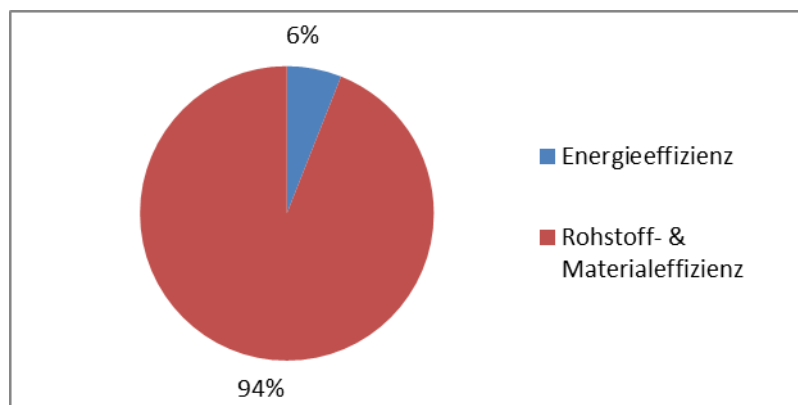


Abbildung 3-30: Globaler Zinnbedarf 2025 in den Leitmärkten im Green-Economy-Szenario



4 Schlussfolgerungen / Empfehlungen

Im Zuge der Arbeiten zu AP2 innerhalb des SubSKrit-Projekts wurde insgesamt der Bedarf von 64 Rohstoffen bzgl. der 40 ausgewählten Umwelttechnologien untersucht (Rohstoffliste siehe Tabelle im Anhang). Die Detailergebnisse je UT sind in Form von Factsheets ausführlich in Abschnitt 2 beschrieben. Von diesen 64 Rohstoffen werden in den nationalen bzw. globalen Szenarien 35 Rohstoffe für die Bedarfsbefriedigung der 40 UT nachgefragt. Bei 19 Rohstoffen wurde bzgl. der globalen Szenarien mindestens für eines der Szenarien (BAU-Szenario bzw. Green-Economy-Szenario) eine Nachfrage ermittelt, die 10 % der gesamten globalen Primärgewinnung (Jahr 2013) übersteigt. Diese 19 Rohstoffe (vgl. Tabelle im Anhang) sind (in alphabetischer Reihenfolge):

- Cer
- Dysprosium
- Gallium
- Indium
- Iridium
- Kupfer
- Lithium
- Magnesium
- Mangan
- Neodym
- Palladium
- Platin
- Praseodym
- Rhodium
- Ruthen
- Silber
- Terbium
- Titan
- Zinn

Auf zehn besonders interessante bzw. repräsentative Rohstoffe ist in Kapitel 3 vertieft eingegangen worden.

Von den untersuchten 40 Umwelttechnologien konnte für insgesamt 12 UT kein relevanter Materialbedarf bzgl. der untersuchten 64 Rohstoffe identifiziert werden: die Gründe liegen entweder in der vollständig oder zumindest nahezu vollständig fehlenden Materialrelevanz oder in der erheblichen Unsicherheit, ob diese UT im Szenariozeitraum tatsächlich Marktreife erlangen können. Bei diesen 12 UTs handelt es sich im Leitmarkt Umweltfreundliche Energien & Speicherung um die UT Nr. 110 (Reluktanzgeneratoren für Windkraftanlagen) sowie Nr. 111 (HTS-Generatoren für Windkraftanlagen), im Leitmarkt Energieeffizienz um die UT Nr. 2 Kompressoren, UT Nr. 8 Aerogele, UT Nr. 16 Celitement sowie UT Nr. 26 Weiße OLED, im Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz um die UT Nr. 67 Nanobeschichtung von Oberflächen, UT Nr. 68 Precision Farming sowie UT Nr. 70 Sensoren für die Schlackeaufbereitung, im Leitmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft um die UT Nr. 48 Dezentrale Wasseraufbereitung sowie UT Nr. 49b Wassereffizienztechnologien und schließlich im Leitmarkt Kreislaufwirtschaft um die UT Nr. 33 Automatische Stofftrennverfahren.

Es wird dem Umweltbundesamt empfohlen aufgrund fehlender Relevanz diese 12 Umwelttechnologien für die weitere Bearbeitung im Projekt auszuklammern und sich umgekehrt auf die verbleibenden 28 UT zu konzentrieren, die z. T. erhebliche Materialrelevanz nach den Szenarien aufweisen.

Von diesen 28 UT zeigen die folgenden UT besonders hohe Materialrelevanz nach den globalen Szenarioergebnissen:

- UT Nr. 37 Hybridmotoren (vor allen für Neodym, Praseodym, Dysprosium, Terbium)
- UT Nr. 38 Elektroantriebsmotoren (vor allen für Neodym, Praseodym, Dysprosium, Terbium)
- UT Nr. 27 Weiße LED (vor allem für Gallium, Indium, Silber)
- UT Nr. 87 Dünnschicht Solarzellen (vor allem für Indium)
- UT Nr. 98 Lithium-Ionen Batterien für Fahrzeuge (vor allem für Lithium)
- UT Nr. 100 Lithium-Ionen Batterien für stationäre Stromspeicher (vor allem für Lithium)
- UT Nr. 106 Permanentmagnet-Generatoren für Windkraftanlagen (vor allem für Neodym)
- UT Nr. 53 Maßgeschneiderte Edelmetallkatalysatoren (vor allem für Palladium, Platin, Rhodium, Iridium, Ruthen, Silber)
- UT Nr. 43 Fahrzeug-Abgaskatalysatoren (vor allem für Palladium, Platin, Rhodium, Cer)
- UT Nr. 5 RFID (vor allem für Silber)
- UT Nr. 56 Bleifreie Lote (vor allem für Silber, Zinn).

5 Anhang 1: Materialien im Fokus AP 2

Globale		global				
Primärgewinnung 2013 (in Tonnen)		Anteil zur Primärförderung 2013				
USGS 2015, EC 2014		BAU			Green Economy	
2013		2013	2025	2050	2025	2050
154.000	Antimon	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45.200	Arsen	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Barium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
260	Beryllium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5.490.000	Blei	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3.540.000	Bor	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
49.648	Cer	11,5%	16,4%	24,2%	15,5%	15,0%
28.800.000	Chrom	0,1%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
1.362	Dysprosium	22,3%	95%	539%	304%	1505%
	Erbium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
350	Europium	0,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
	Flussspat	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2.283	Gadolinium	0,0%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
350	Gallium	2,2%	55,6%	73,5%	63,4%	104,3%
155	Germanium	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	1,0%
2.800	Gold	2,1%	4,0%	5,3%	3,3%	3,6%
	Hafnium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Holmium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
799	Indium	22,6%	25%	23%	32%	23%
5,5	Iridium	163%	289%	560%	289%	560%
22.000	Kadmium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
110.000	Kobalt	0,1%	0,3%	0,9%	0,4%	1,5%
	Kokskohle	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
18.300.000	Kupfer	3,8%	8,2%	18,3%	11,2%	33,0%
	Lanthan	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
34.000	Lithium	1,8%	51%	346%	247%	1253%
	Lutetium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Magnesit	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
878.000	Magnesium	0,3%	10,9%	73,6%	11,7%	75,8%
16.900.000	Mangan	0,6%	2,3%	7,1%	4,8%	20,5%
258.000	Molybdän	0,1%	0,1%	0,8%	0,3%	1,3%
1.110.000	Natürlicher Graphit	0,0%	0,1%	0,7%	0,2%	1,3%
21.000	Neodym	5%	29%	150%	81%	393%
2.630.000	Nickel	0,1%	0,2%	0,6%	0,3%	0,9%
59.400	Niob	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Osmium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Globale		global				
Primärgewinnung 2013 (in Tonnen)		Anteil zur Primärförderung 2013				
USGS 2015, EC 2014		BAU			Green Economy	
2013		2013	2025	2050	2025	2050
203	Palladium	258%	438%	780%	423%	675%
225.000.000	Phosphat	0,0%	0,001%	0,002%	0,001%	0,002%
183	Platin	87%	158%	236%	153%	194%
6.300	Praseodym	3,1%	21%	121%	67%	336%
1.880	Quecksilber	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
48.900.000	Rhenium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
22,5	Rhodium	197%	341%	639%	331%	544%
21,1	Ruthenium	224%	410%	766%	409%	764%
	Samarium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Scandium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2.650	Selen	0,4%	0,6%	0,5%	1,3%	0,8%
26.000	Silber	26%	55%	93%	58%	101%
7.880.000	Silizium (Metall)	3,1%	2,4%	4,7%	5,0%	6,9%
333.000	Strontium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1.170	Tantal	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
450	Tellur	11,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
340	Terbium	9,7%	71%	413%	238%	1180%
	Thallium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Thulium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
209.000	Titan metallisch	2,1%	2,6%	3,7%	2,6%	3,7%
7.400.000	Titandioxid	0,0%	2,3%	17,3%	12,5%	78,5%
79.000	Vanadium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
8.400	Wismut / Bismut	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
81.400	Wolfram / Tungsten	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Ytterbium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
7.000	Yttrium	0,1%	2,6%	2,7%	2,6%	2,7%
13.400.000	Zink	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
294.000	Zinn	39,2%	74%	152%	82%	168%
1.510	Zirkon	0,1%	0,0%	0,0%	0,3%	0,9%