

TEXTE

03/2019

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

Arbeitsbericht 4: Screening der Substitutionsoptionen der 20 prioritären Umwelttechnologien



TEXTE 03/2019

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 93 316 0  
UBA-FB 002705/ANH,4

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

Arbeitsbericht 4: Screening der Substitutionsoptionen der 20 prioritären  
Umwelttechnologien

von

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

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

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

**Herausgeber:**

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

 /umweltbundesamt.de  
 /umweltbundesamt

**Durchführung der Studie:**

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

**Abschlussdatum:**

November 2016

**Redaktion:**

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

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

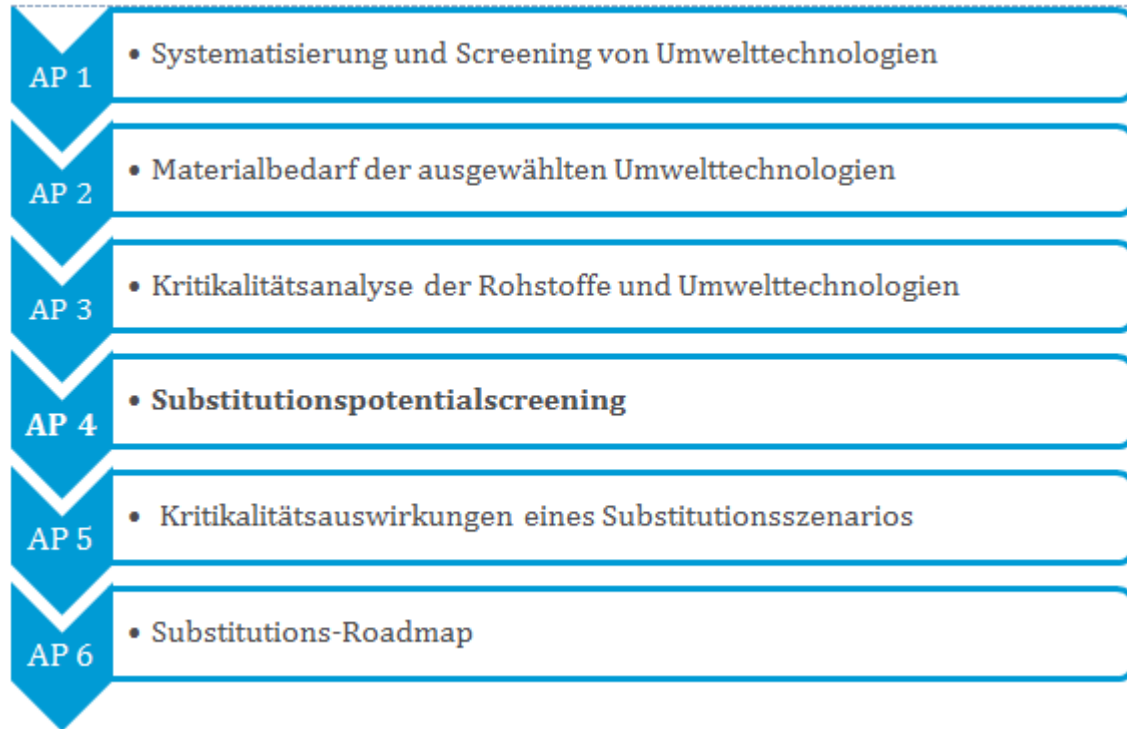
Dessau-Roßlau, Januar 2019

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

Einordnung des Arbeitsberichtes 4:

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 4 umfasst das ausführliche Screening der Substitutionsoptionen der 20 ausgewählten Umwelttechnologien. Neben der Darstellung der materiellen, technologischen und funktionalen Substitutionsalternativen werden auch mögliche Effizienzverluste, Restriktionen und ökologische Vor- bzw. Nachteile der Alternativen aufgezeigt.

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

## Übersicht der 40 Umwelttechnologien\*

UT Nr.	UT Name	Leitmarkt
2	Kompressoren	Energieeffizienz
5	RFID	Energieeffizienz
8	Aerogele	Energieeffizienz
12	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle	Energieeffizienz
13b	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode	Energieeffizienz
16	Celitement	Energieeffizienz
24	Grüne Rechenzentren	Energieeffizienz
26	OLED	Energieeffizienz
27	weiße LED	Energieeffizienz
33	Automatische Stofftrennverfahren	Kreislaufwirtschaft
35	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.

In Arbeitsbericht 2 sind die 40 Umwelttechnologien detailliert beschrieben.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	14
Tabellenverzeichnis .....	15
Abkürzungsverzeichnis .....	18
1 Ziele des 4. Arbeitspakets .....	19
2 Methodik .....	21
3 Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings der 20 relevanten Umwelttechnologien.....	22
3.1 Technologiegruppe Elektronik.....	22
3.1.1 Grüne Rechenzentren (UT Nr. 24).....	22
3.1.1.1 Steigerung der IT-Auslastung.....	23
3.1.1.2 Vermeidung von Überdimensionierung/Redundanz .....	23
3.1.1.3 Miniaturisierung der integrierten Schaltkreise .....	24
3.1.1.4 Literatur .....	25
3.1.2 Bleifreie Lote (UT Nr. 56).....	25
3.1.2.1 Materielle Substitution.....	25
3.1.2.2 Technologische Substitution .....	26
3.1.2.3 Funktionale Substitution .....	26
3.1.2.4 Mögliche Effizienzverluste.....	26
3.1.2.5 Mögliche Restriktionen .....	27
3.1.2.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	27
3.1.2.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	28
3.1.2.8 Fazit .....	29
3.1.2.9 Literatur .....	29
3.2 Technologiegruppe Katalysatoren.....	29
3.2.1 Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren (UT Nr. 43).....	29
3.2.1.1 Materielle Substitution.....	30
3.2.1.2 Technologische Substitution .....	30
3.2.1.3 Funktionale Substitution .....	31
3.2.1.4 Übersicht über die Substitutionsansätze.....	31
3.2.1.5 Mögliche Effizienzverluste.....	31
3.2.1.6 Mögliche Restriktionen .....	32
3.2.1.7 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	33
3.2.1.8 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	34
3.2.1.9 Fazit .....	35
3.2.2 Industriekatalysatoren (UT Nr. 53).....	36



3.2.2.1	Materielle Substitution.....	36
3.2.2.2	Technologische Substitution .....	36
3.2.2.3	Funktionale Substitution .....	37
3.2.2.4	Übersicht über die Substitutionsansätze.....	37
3.2.2.5	Fazit .....	37
3.3	Technologiegruppe Permanentmagnete.....	37
3.3.1	Pedelecs (UT Nr. 35 Motoren und Batterie) .....	37
3.3.1.1	Materielle Substitution.....	37
3.3.1.2	Technologische Substitution .....	38
3.3.1.3	Funktionale Substitution .....	39
3.3.1.4	Mögliche Effizienzverluste.....	39
3.3.1.5	Mögliche Restriktionen .....	40
3.3.1.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	40
3.3.1.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	41
3.3.1.8	Fazit .....	41
3.3.1.9	Literatur .....	42
3.3.2	Hybridmotoren (UT Nr. 37) .....	42
3.3.2.1	Materielle Substitution.....	43
3.3.2.2	Technologische Substitution .....	43
3.3.2.3	Funktionale Substitution .....	44
3.3.2.4	Übersicht über die Substitutionsansätze.....	44
3.3.2.5	Mögliche Effizienzverluste.....	44
3.3.2.6	Mögliche Restriktionen .....	45
3.3.2.7	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	45
3.3.2.8	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	46
3.3.2.9	Fazit .....	47
3.3.2.10	Literatur .....	47
3.3.3	Elektroantriebsmotoren BEV und PHEV (UT Nr. 38) .....	48
3.3.3.1	Materielle Substitution.....	48
3.3.3.2	Technologische Substitution .....	49
3.3.3.3	Funktionale Substitution .....	50
3.3.3.4	Übersicht über die Substitutionsansätze.....	50
3.3.3.5	Mögliche Effizienzverluste.....	51
3.3.3.6	Mögliche Restriktionen .....	52
3.3.3.7	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	52
3.3.3.8	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	53

3.3.3.9	Fazit .....	54
3.3.3.10	Literatur .....	55
3.3.4	Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen (UT Nr. 60) .....	55
3.3.4.1	Materielle Substitution.....	55
3.3.4.2	Technologische Substitution .....	56
3.3.4.3	Funktionale Substitution .....	56
3.3.4.4	Übersicht über die Substitutionsansätze.....	56
3.3.4.5	Mögliche Effizienzverluste.....	56
3.3.4.6	Mögliche Restriktionen .....	57
3.3.4.7	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	57
3.3.4.8	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	58
3.3.4.9	Fazit .....	58
3.3.4.10	Literatur .....	59
3.3.5	Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 106).....	59
3.3.5.1	Materials substitution .....	60
3.3.5.2	Technologische Substitution .....	60
3.3.5.3	Funktionale Substitution .....	61
3.3.5.4	Mögliche Effizienzverluste.....	61
3.3.5.5	Mögliche Restriktionen .....	62
3.3.5.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	63
3.3.5.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	63
3.3.5.8	Fazit und Ausblick .....	64
3.3.5.9	Literatur .....	64
3.4	Technologiegruppe Generatoren ohne Permanentmagnete .....	65
3.4.1	Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 107) .....	65
3.4.1.1	Mögliche Effizienzverluste.....	66
3.4.1.2	Mögliche Restriktionen .....	66
3.4.1.3	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	67
3.4.1.4	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	67
3.4.1.5	Fazit und Ausblick .....	67
3.4.1.6	Literatur .....	67
3.4.2	Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 108) .....	67
3.4.2.1	Materials substitution .....	67
3.4.2.2	Technologische Substitution .....	67
3.4.2.3	Funktionale Substitution .....	68
3.4.2.4	Mögliche Effizienzverluste.....	68

3.4.2.5	Mögliche Restriktionen .....	68
3.4.2.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	68
3.4.2.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	68
3.4.2.8	Fazit und Ausblick .....	68
3.4.2.9	Literatur .....	68
3.5	Technologiegruppe Speichertechnologien .....	69
3.5.1	Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98).....	69
3.5.1.1	Materialsstitution.....	69
3.5.1.2	Technologische Substitution .....	69
3.5.1.3	Funktionale Substitution .....	70
3.5.1.4	Mögliche Effizienzverluste.....	71
3.5.1.5	Mögliche Restriktionen .....	71
3.5.1.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	72
3.5.1.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	72
3.5.1.8	Fazit und Ausblick .....	73
3.5.1.9	Literatur .....	73
3.5.2	Lithium-Ionen Stromspeicher (UT Nr. 100).....	74
3.5.2.1	Materialsstitution.....	74
3.5.2.2	Technologische Substitution .....	75
3.5.2.3	Funktionale Substitution .....	76
3.5.2.4	Mögliche Effizienzverluste.....	76
3.5.2.5	Mögliche Restriktionen .....	77
3.5.2.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	78
3.5.2.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	79
3.5.2.8	Fazit und Ausblick .....	80
3.5.2.9	Literatur .....	80
3.6	Technologiegruppe Solartechnologien .....	81
3.6.1	Dünnschicht-Solarzellen (UT Nr. 87) .....	81
3.6.1.1	Materialsstitution.....	81
3.6.1.2	Technologische Substitution .....	82
3.6.1.3	Funktionale Substitution .....	82
3.6.1.4	Mögliche Effizienzverluste.....	83
3.6.1.5	Mögliche Restriktionen .....	84
3.6.1.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	84
3.6.1.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	85
3.6.1.8	Fazit und Ausblick .....	86

3.6.1.9	Literatur .....	87
3.6.2	Tandemzellen (UT Nr. 90) .....	87
3.6.2.1	Materialsstitution .....	87
3.6.2.2	Technologische Substitution .....	88
3.6.2.3	Funktionale Substitution .....	88
3.6.2.4	Mögliche Effizienzverluste.....	88
3.6.2.5	Mögliche Restriktionen .....	89
3.6.2.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	90
3.6.2.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	90
3.6.2.8	Fazit und Ausblick .....	90
3.6.2.9	Literatur .....	91
3.6.3	CSP-Technologie (UT Nr. 93) .....	91
3.6.3.1	Materialsstitution .....	91
3.6.3.2	Technologische Substitution .....	92
3.6.3.3	Funktionale Substitution .....	92
3.6.3.4	Mögliche Effizienzverluste.....	93
3.6.3.5	Mögliche Restriktionen .....	93
3.6.3.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	94
3.6.3.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	95
3.6.3.8	Fazit und Ausblick .....	95
3.6.3.9	Literatur .....	96
3.7	Sonstige Technologien .....	96
3.7.1	Kraftwerke GuD/Gas (UT Nr. 83).....	96
3.7.1.1	Materialsstitution .....	96
3.7.1.2	Technologische Substitution .....	97
3.7.1.3	Funktionale Substitution .....	97
3.7.1.4	Mögliche Effizienzverluste.....	98
3.7.1.5	Mögliche Restriktionen .....	98
3.7.1.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	99
3.7.1.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	99
3.7.1.8	Fazit und Ausblick .....	100
3.7.1.9	Quellen .....	100
3.7.2	RFID (UT Nr. 5).....	100
3.7.2.1	Materielle Substitution.....	101
3.7.2.2	Technologische Substitution .....	101
3.7.2.3	Funktionale Substitution .....	101

3.7.2.4	Mögliche Effizienzverluste.....	102
3.7.2.5	Mögliche Restriktionen .....	102
3.7.2.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	103
3.7.2.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	103
3.7.2.8	Fazit .....	104
3.7.2.9	Literatur .....	105
3.7.3	Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode (UT Nr. 13b) .....	105
3.7.3.1	Materielle Substitution.....	105
3.7.3.2	Technologische Substitution .....	106
3.7.3.3	Funktionale Substitution .....	106
3.7.3.4	Mögliche Effizienzverluste.....	107
3.7.3.5	Mögliche Restriktionen .....	107
3.7.3.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologien .....	108
3.7.3.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	108
3.7.3.8	Fazit und Ausblick .....	109
3.7.3.9	Literatur .....	109
3.7.4	Weiß Leuchtdioden (UT Nr. 27) .....	110
3.7.4.1	Materialsubstitution.....	111
3.7.4.2	Technologische Substitution .....	113
3.7.4.3	Funktionale Substitution .....	113
3.7.4.4	Mögliche Effizienzverluste.....	113
3.7.4.5	Mögliche Restriktionen .....	114
3.7.4.6	Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie.....	115
3.7.4.7	Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen.....	115
3.7.4.8	Fazit .....	117
3.7.4.9	Literatur .....	117
4	Fazit / Zusammenfassung .....	119
5	Anhang.....	121

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für die bleifreien Lote .....	28
Abbildung 3.2:	Technologiereife der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug- Abgas-Katalysator .....	35
Abbildung 3.3:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Pedelec-Batterien und Pedelec-Motoren.....	41
Abbildung 3.4:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für HEV.....	47
Abbildung 3.5:	Der derzeitige Entwicklungsstand der verschiedenen Substitutionsalternativen .....	54
Abbildung 3.6:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für HL Permanentmagnete .....	58
Abbildung 3.7:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Permanentmagnet- Generatoren in Windkraftanlagen .....	64
Abbildung 3.8:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen .....	73
Abbildung 3.9:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Lithium-Ionen- Stromspeicher.....	79
Abbildung 3.10:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Dünnschicht- Solarzellen.....	86
Abbildung 3.11:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Tandemzellen.....	90
Abbildung 3.12:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für die CSP-Technologie .....	95
Abbildung 3.13:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für Kraftwerke GuD/Gas.....	99
Abbildung 3.14:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für RFID .....	104
Abbildung 3.15:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode .....	109
Abbildung 3.16:	Technologiereife der Substitutionsoptionen für weiße Leuchtdioden .....	116

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien nach Technologiegruppen.....	19
Tabelle 3-1:	Substitutionsansätze für die bleifreien Lote.....	26
Tabelle 3-2:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die bleifreien Lote.....	27
Tabelle 3-3:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die bleifreien Lote.....	27
Tabelle 3-4:	Substitutionsansätze für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator.....	31
Tabelle 3-5:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator .....	31
Tabelle 3-6:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator .....	32
Tabelle 3-7:	Ökologische Vor- bzw. Nachteile der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator .....	33
Tabelle 3-8:	Substitutionsansätze für die Pedelecs (Motor und Batterie) .....	39
Tabelle 3-9:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die Pedelecs (Motor und Batterie) .....	39
Tabelle 3-10:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die Pedelecs (Motor und Batterie) .....	40
Tabelle 3-11:	Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsalternativen für die Pedelecs (Motor und Batterie) .....	40
Tabelle 3-12:	Substitutionsansätze für HEV .....	44
Tabelle 3-13:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die HEV.....	44
Tabelle 3-14:	Mögliche Restriktionen für die Substitutionsalternativen für die HEV .....	45
Tabelle 3-15:	Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten für die HEV.....	46
Tabelle 3-16:	Substitutionsansätze für BEV und PHEV .....	50
Tabelle 3-17:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für BEV und PHEV .....	51
Tabelle 3-18:	Vergleich der durchschnittlichen Effizienz von PSM, ASM und EESM.....	51
Tabelle 3-19:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für BEV und PHEV .....	52
Tabelle 3-20:	Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten für BEV und PHEV .....	52
Tabelle 3-21:	Substitutionsansätze für HL-Permanentmagnete .....	56
Tabelle 3-22:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionen für HL-Permanentmagnete.....	56
Tabelle 3-23:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für HL-Permanentmagnete .....	57

Tabelle 3-24:	Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten für HL-Permanent-magnete .....	57
Tabelle 3-25:	Substitutionsansätze für Permanentmagnet-Generatoren in WKA.....	61
Tabelle 3-26:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Permanentmagnet-Generatoren in WKA.....	62
Tabelle 3-27:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Permanentmagnet-Generatoren in WKA.....	62
Tabelle 3-28:	Substitutionsansätze für Synchron-Generatoren in WKA .....	66
Tabelle 3-29:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Synchron-Generatoren in WKA .....	66
Tabelle 3-30:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Synchron- Generatoren in WKA.....	66
Tabelle 3-31:	Technologiereife der verschiedenen Substitutionsansätze für Synchron-Generatoren in WKA .....	67
Tabelle 3-32:	Substitutionsansätze für Asynchron-Generatoren in WKA .....	68
Tabelle 3-33:	Substitutionsansätze für Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge.....	70
Tabelle 3-34:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge.....	71
Tabelle 3-35:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Li-Ionen Batterien für Fahr-zeuge.....	71
Tabelle 3-36:	Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen im Vergleich .....	72
Tabelle 3-37:	Substitutionsansätze für Lithium-Ionen Stromspeicher .....	76
Tabelle 3-38:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Lithium- Ionen Strom-speicher .....	77
Tabelle 3-39:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Lithium- Ionen Stromspeicher .....	78
Tabelle 3-40:	Ökologische Aspekte verschiedener chemischer Technologien (Substitutionsoptionen für Lithium-Ionen Stromspeicher) .....	79
Tabelle 3-41:	Substitutionsansätze für Dünnschicht-Solarzellen .....	83
Tabelle 3-42:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Dünnschicht-Solarzellen .....	83
Tabelle 3-43:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Dünnschicht-Solarzellen .....	84
Tabelle 3-44:	Dünnschichttechnologien a-Si, CIGS und CdTe.....	85
Tabelle 3-45:	Substitutionsansätze für Tandemzellen .....	88
Tabelle 3-46:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Tandemzellen.....	89
Tabelle 3-47:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Tandemzellen.....	89
Tabelle 3-48:	Substitutionsansätze für die CSP-Technologie .....	93



Tabelle 3-49:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die CSP-Technologie .....	93
Tabelle 3-50:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die CSP-Technologie .....	94
Tabelle 3-51:	Übersicht der Substitutionsoptionen der CSP-Technologie.....	94
Tabelle 3-52:	Substitutionsansätze für Kraftwerke GuD/Gas.....	97
Tabelle 3-53:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die Kraftwerke GuD/Gas.....	98
Tabelle 3-54:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die Kraftwerke GuD/Gas.....	98
Tabelle 3-55:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die RFID.....	102
Tabelle 3-56:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die RFID.....	103
Tabelle 3-57:	Substitutionsansätze für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode .....	106
Tabelle 3-58:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode .....	107
Tabelle 3-59:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode .....	108
Tabelle 3-60:	Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für weiße Leuchtdioden .....	114
Tabelle 3-61:	Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für weiße Leuchtdioden .....	114

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Ag</b>	Silber
<b>Au</b>	Gold
<b>BAU</b>	Business-As-Usual
<b>Ce</b>	Cer
<b>CSP</b>	Concentrated Solar Power Kraftwerke
<b>Cu</b>	Kupfer
<b>Dy</b>	Dysprosium
<b>Ga</b>	Gallium
<b>GE</b>	Green-Economy
<b>In</b>	Indium
<b>Ir</b>	Iridium
<b>Li</b>	Lithium
<b>Mg</b>	Magnesium
<b>Mn</b>	Mangan
<b>Nd</b>	Neodym
<b>OLED</b>	Organic Light Emitting Diode
<b>PHEV</b>	Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeug
<b>Pd</b>	Palladium
<b>Pr</b>	Praseodym
<b>Pt</b>	Platin
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>Rh</b>	Rhodium
<b>Ru</b>	Ruthenium
<b>SEE</b>	Seltenerdelement
<b>Si</b>	Silizium
<b>Sn</b>	Zinn
<b>Tb</b>	Terbium
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Titandioxid
<b>TRL</b>	Technologischer Reifegrad
<b>UT</b>	Umwelttechnologie
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>WKA</b>	Windkraftanlage

## 1 Ziele des 4. Arbeitspakets

Ziel des 4. Arbeitspakets „Substitutionspotentialscreening“ ist die Untersuchung der in AP 3 ausgewählten 20 Umwelttechnologien (UT) mit ihren jeweiligen als relevant identifizierten Rohstoffen hinsichtlich ihrer Substitutionsmöglichkeiten. Die 20 als relevant eingestuften Umwelttechnologien sind in folgender Tabelle in Technologiegruppen zusammengefasst. Die Ergebniskapitel in Kapitel 3 orientieren sich an dieser Clusterung.

Tabelle 1-1: Die 20 ausgewählten Umwelttechnologien nach Technologiegruppen

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

Als Ergebnis von AP 4 werden die Substitutionspotentiale der 20 relevanten Umwelttechnologien identifiziert. Weiterhin sollen die vielversprechendsten Substitutionsalternativen sowie ihr aktueller Entwicklungsstand genannt werden.

In Kapitel 2 wird die Vorgehensweise des Substitutionspotentialscreenings kurz erläutert.

In Kapitel 3 werden die Ergebnisse des Substitutionsscreenings in Form von Factsheets für die einzelnen untersuchten Umwelttechnologien ausgeführt. In den Factsheets werden die verschiedenen Substitutionsalternativen und ihre möglichen Restriktionen und Effizienzverluste sowie ökologische Vor- und Nachteile und der aktuelle Entwicklungsstand aufgezeigt.

Kapitel 4 gibt abschließend eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings.

## 2 Methodik

Das Substitutionspotentialscreening baut auf der Auswahl der 20 relevanten Umwelttechnologien aus AP 3 mit kritischem bzw. potentiell kritischem Materialbedarf auf. Differenziert wurde nach materieller, technologischer und funktionaler Substitution. Bei einer Materialsubstitution werden partiell Werkstoffe oder Teile derselben durch andere ersetzt. Ein Beispiel ist hier die reine Materialsubstitution von Dysprosium und Neodym durch Samarium und Kobalt in Permanentmagneten. Die technologische Substitution zeichnet sich dadurch aus, dass der Einsatz von neuen Technologien und Verfahren den gleichen Umweltnutzen erzielt. Hierzu zählen auch Faktorsubstitutionen unter Variation der Arbeits- und Materialintensität. Zum Beispiel ist der permanent erregte Synchronmotor mit Seltenen Erden in einem Elektrofahrzeug durch einen Asynchronmotor ohne Seltene Erden substituierbar. Die funktionale Substitution erzielt den gleichen Umweltnutzen durch ein neues Produkt oder eine Produkt-Dienstleistung. Eine funktionale Substitution eines Fahrzeug-Abgas-Katalysators besteht z.B. in einem vollelektrischen Pkw, der keinen Katalysator mehr benötigt.

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

Das Substitutionsscreening basiert auf intensiver Literatur- und Internetrecherche sowie Interviews mit Fachleuten aus Industrie und Wissenschaft. Die Ergebnisse von AP4 wurden am 13. Oktober 2016 im Rahmen eines Fachgesprächs ausgewählten Fachleuten aus den verschiedenen Technologiebereichen vorgestellt und gemeinsam mit ihnen diskutiert. Diese Expertenrunde konnte wichtige Hinweise liefern und Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings validieren. Die Rückmeldungen des Fachgesprächs sind in die Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings im folgenden Kapitel mit eingegangen. Im Anhang sind die Teilnehmer des Fachgesprächs aufgelistet.

### 3 Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings der 20 relevanten Umwelttechnologien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Substitutionspotentialscreenings der 20 relevanten Umwelttechnologien in Form von Factsheets vorgestellt. Die Umwelttechnologien sind in die sechs Technologiegruppen Elektronik, Katalysatoren, Permanentmagnete, Generatoren ohne Permanentmagnete, Speichertechnologien, Solartechnologien und Sonstige Technologien geclustert.

#### 3.1 Technologiegruppe Elektronik

In die Technologiegruppe Elektronik fallen die beiden Umwelttechnologien Grüne Rechenzentren (UT Nr. 24) und Bleifreie Lote (UT Nr. 56).

##### 3.1.1 Grüne Rechenzentren (UT Nr. 24)

Rechenzentren bestehen aus einer Vielzahl von Produkteinheiten oder Einzelkomponenten, wie Server, Storage und Netzwerktechnik (IT-Technik) sowie unterbrechungsfreie Stromversorgung, Kühl- und Klimatisierungssysteme und sonstige Infrastruktur wie Brandschutzeinrichtungen, Beleuchtung etc. Je nach Aufbau und Zweck kann die Ausstattung und Konfiguration der Rechenzentren sehr unterschiedlich sein. Im AP 2 wurde als spezifische Einheit die Referenz-Server-Einheit (ASU; Average Server Unit) definiert, womit unterschiedliche Konfiguration und Spezifikationen der Rechenzentren durchschnittlich abgebildet werden konnten (nach Borderstep 2010). Diese bildete die Grundlage für die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung der definierten spezifischen Einheit und somit der Rechenzentren in Deutschland und weltweit.

Aufgrund einer Vielzahl von Einzelkomponenten, die das System Rechenzentren bilden, enthalten die Rechenzentren sehr viele Metalle. Im AP 3 wurden aus Kritikalitätssicht insgesamt neun Rohstoffe in Rechenzentren identifiziert: Gallium, Gold, Kupfer, Neodym, Palladium, Platin, Ruthenium, Silber und Zinn. Dabei gehören Palladium (Ranking 2), Ruthenium (Ranking 3), Platin (Ranking 7) und Gallium (Ranking 9) zu den Rohstoffen mit hoher Kritikalität. Palladium weist sogar das höchste Risiko bezüglich der strategischen Bedeutung auf. Gallium hat ein relativ hohes Versorgungsrisiko (Ranking 4). Obwohl Gold ein sehr hohes Risiko bezüglich des ökologischen Schadenpotentials aufweist (Ranking 2), liegt es aufgrund von geringem Versorgungsrisiko (Ranking 15) sowie geringem Risiko für strategische Bedeutung (Ranking 21) insgesamt auf Platz 15.

Zu den meisten Komponenten sind grundsätzlich Substitutionsmöglichkeiten auf materieller, technischer bzw. technologischer Ebene vorhanden (z.B. Solid State Disks bei den Speichermodule). Allerdings ist zu erwarten, dass die Substitution eines kritischen Metalls bei einem dieser Module bzw. Komponenten oftmals durch die Verwendung eines oder mehrerer anderer kritischer Metalle „erkauft“ werden muss. Ein weiteres Problem ist die fehlende Datengrundlage für die Materialinventare. Die Daten, auf die man sich beziehen kann, sind teilweise veraltet. Eine konsolidierte Analyse zum Thema Substitution ist vor dem Hintergrund der Komplexität der Rechenzentren sowie der bestehenden Trade-offs und Zielkonflikte im Rahmen dieses Projektes nicht zu leisten.

Aus diesem Grund wird für Rechenzentren ein Substitutionsansatz querliegend zu der Material-, technologischen und funktionalen Substitution vorgeschlagen. Dabei werden die Parameter, die bei der Steigerung der Energieeffizienz der Rechenzentren eine wichtige Rolle spielen, ebenfalls als Indikatoren für die Verringerung des Rohstoffbedarfs herangezogen und im Folgenden hinsichtlich ihres Potentials beschrieben:

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

### 3.1.1.1 Steigerung der IT-Auslastung

IT-Auslastung ist die Prozesslast der IT-Technik im Verhältnis zur maximalen Kapazität der IT-Technik. Die Effizienz der IT-Technik sinkt mit abnehmender IT-Auslastung. Beispielsweise nutzen Server immer noch 30 bis 60 % ihrer maximalen Leistungsaufnahme, auch wenn sie unter 10 % ausgelastet sind (NRDC 2014). Dabei könnten sie auf höherer Auslastung für die gleiche Energie deutlich mehr Transaktionen und Aufgaben durchführen als auf niedrigerer Auslastung. Die meisten Server in Rechenzentren warten 24/7 darauf, Daten oder Transaktionsanforderungen zu empfangen. Denn die Rechenzentrumsbetreiber planen typischerweise die Anzahl und Verarbeitungskapazität von Servern, um die Spitzen im Datenverkehr besser aufzufangen. Den Rest der Zeit bleiben die meisten Server weitgehend ungenutzt. Laut NRDC (2014) hat sich die durchschnittliche Serverauslastung zwischen 2006 und 2012 kaum geändert und liegt zwischen 12 und 18 %. In der aktuellen Vorstudie zur Ökodesign-Richtlinie für Enterprise Server (ENTR Lot 9) wurde über alle Serverkategorien hinweg eine durchschnittliche Auslastung von 20 % über 24 Stunden angenommen (Bio by Deloitte & Fraunhofer IZM 2015). Auf der anderen Seite ging Schäppi (2011) von einer Auslastung der Server von häufig nur 5-15 % aus. Forschung von Google gibt an, dass typische Server-Cluster im Durchschnitt zu 10 bis 50 % ausgelastet seien (Barosso und Hölzle 2013).

Eine geringe Auslastung bedeutet, dass mehr Server, Storage und Netzwerk bereitgestellt werden müssen, wobei die gleichen Aufgaben und Transaktionen mit deutlich weniger Hardware gestemmt werden könnten. Neben dem höheren Energieverbrauch wird dadurch auch ein Mehrverbrauch von Hardware und somit von Rohstoffen verursacht. Ein hohes Potential für Energie- sowie Materialeinsparung bietet die Virtualisierung und Konsolidierung der IT-Technik. Bei der Virtualisierung von Servern beherbergt ein physischer Server mehrere virtuelle Server, die sich jeweils für den Kunden oder den darauf laufenden Diensten wie eigenständige Server verhalten. Dadurch kann eine deutlich bessere Auslastung der Prozessoren und der Speicher erreicht werden, während gleichzeitig weniger Server bereitgestellt werden müssen. Durch die Konsolidierung von Lasten auf weniger physische Hardware kann der Energie- und Materialverbrauch sowie der Aufwand für die Kühlung erheblich reduziert werden (Schäppi 2011, Prakash et al. 2012). Die Anforderungen an die Hardware sowie der Platzbedarf können durch die Virtualisierung somit erheblich reduziert werden. Zudem wird die Auslastung der Server deutlich erhöht durch die gemeinsam genutzte Hardware. Schäppi (2011) geht davon aus, dass sich die Auslastung durch die Virtualisierung auf 60-80 % erhöht werden kann. Stobbe et al. (2015) nehmen an, dass die Serverauslastung in einem grünen Entwicklungsszenario, vor allem durch Virtualisierung, bis 2025 auf 60 % ansteigen könnte (bei Volume-Servern). Stobbe et al. (2015) erwähnen außerdem, dass die Virtualisierungsrate von Servern in den nächsten Jahren deutlich ansteigen wird - von durchschnittlich sechs virtuellen Maschinen pro physikalischen Host im Jahr 2011 auf 30 virtuelle Maschinen pro physikalischen Host im Jahr 2020. Damit gäbe es enorme Potentiale, Materialien und Rohstoffe einzusparen.

Im Bereich Speicher nehmen Stobbe et al. (2015) an, dass die Auslastung bis 2025 um ca. 10 % verbessert und durch einen verstärkten Einsatz von De-duplizierung und Komprimierung die Anzahl von Festplatten und Controllern verringert werden könnte. Außerdem könnten laut Stobbe et al. mehr SSD-Festplatten in der Zukunft zum Einsatz kommen. Das würde möglicherweise zu einer Verringerung des Bedarfs an Neodym führen.

Je nach der erreichten verbesserten Auslastung hätte die Virtualisierung der IT-Technik das Potential, den Materialbedarf sowie den Bedarf an kritischen Rohstoffen um  $\frac{1}{3}$  bzw.  $\frac{1}{4}$  zu reduzieren.

### 3.1.1.2 Vermeidung von Überdimensionierung/Redundanz

Neben der geringen IT-Auslastung spielt die Planung bzw. die Dimensionierung der Rechenzentrumsinfrastruktur eine wichtige Rolle für den Materialbedarf. Rechenzentren werden oft deutlich überdimensioniert konzipiert als es die benötigte Kapazität erfordert. Untersuchungen zeigen allerdings, dass die durchschnittliche Auslastungsquote der Rechenzentren nur 6 bis 12 % ausmacht

(Computerwoche 2014). Das bedeutet, dass Rechenzentren teilweise um das Zehnfache größer dimensioniert sind als erforderlich. Die Planung der Dimensionierung der Rechenzentren zielt darauf ab, die möglichen hohen Schwankungen der maximalen Ist-Last aufzufangen. Damit soll das Risiko, dass die erforderliche Auslastung während des Betriebs nicht erreicht werden könnte, minimiert werden. Da die künftigen Kapazitätsanforderungen schwer vorhersehbar sind, erscheint der Schritt einer geplanten Überdimensionierung unumgänglich.

Allerdings versprechen Entwicklungen im Bereich **Cloud Computing** enorme Chancen, die Ressourcen in den Rechenzentren effizienter zu nutzen. Laut dem globalen Cloud-Index von Cisco entfallen rund 46 % der derzeitigen Arbeitslast von Rechenzentren auf Cloud-Dienste. Bis 2017 soll dieser Anteil auf 63 % ansteigen. Mit dem Einsatz neuer Technologien und Bau einer effizienten IT-Infrastruktur, bei der ein Teil der Daten und Prozesse über die Cloud und ein anderer Teil On-Premise oder über Server-Housing verarbeitet werden, könnte eine Auslastung von etwa 70 % erreicht werden. Dabei könnte das Rechenzentrum für eine durchschnittliche jährliche Auslastung dimensioniert werden. Bedarfsspitzen für Applikationen lassen sich über eine Public Cloud oder Virtual Private Cloud abdecken (Computerwoche 2014).

Das Gabler Wirtschaftslexikon führt die folgende Beschreibung von Cloud Computing auf, woraus Potentiale für Ressourcenschonung klarer werden: „Anstatt IT-Ressourcen in unternehmenseigenen Rechenzentren, können diese bedarfsorientiert bei einem Cloud-Anbieter reserviert, genutzt und wieder freigegeben werden. Wie bei Gemeinschaftsrechenzentren und Lohnarbeits- bzw. Servicerechenzentren hat die bedarfsorientierte Abrechnung den Effekt, dass der Einsatz von Cloud Computing langfristige Investitionsausgaben für IT-Ressourcen reduziert und die operationalen Ausgaben für IT-Ressourcen stärker zum Tragen kommen. Der Unterschied einer Cloud zu traditionellen Rechenzentren ist ihre Dynamik oder Elastizität der Ressourcennutzung. IT-Ressourcen können schnell, oft innerhalb von Minuten bereitgestellt oder freigegeben werden. Cloud Computing ermöglicht diese dynamische Ressourcenverwaltung, sprich die Bereitstellung und Freigabe von IT-Ressourcen, oft durch den Einsatz von Hardware-Virtualisierung, die den Betrieb mehrerer virtualisierter Server auf einem physikalischen Server ermöglicht. Virtualisierung bildet somit auch die Grundlage für die Ausnutzung von Skaleneffekten durch den Cloud-Anbieter. Im Gegensatz zu reiner Hardware-Virtualisierung verwendet Cloud Computing die Konzepte der Virtualisierung und gemeinsamen Nutzung auch für andere IT-Ressourcen, die z.B. Anwendungsfunktionalität oder Plattformen für den Betrieb von kundeneigenen Anwendungen bereitstellen und die so in gleicher Weise von mehreren Nutzern geteilt werden können (Gabler Wirtschaftslexikon, 2016).

Wenn Cloud Computing Ansätze mit der modularen und skalierbaren Bauweise der Rechenzentren verbindet, sprich eine kontinuierliche Anpassung an die veränderten Anforderungen und Auslastungen, können weitere Potentiale zur Ressourcenschonung realisiert werden.

### 3.1.1.3 Miniaturisierung der integrierten Schaltkreise

Durch die zunehmende Miniaturisierung der IT-Komponenten, insbesondere der integrierten Schaltkreise, kommt es zu einer immer stärkeren Verdichtung von Rechenleistung (vgl. das Mooresche Gesetz, nach dem sich die Zahl der Transistoren von integrierten Schaltungen jährlich verdoppelt. Das Mooresche Gesetz trifft auch für die Integrationsdichte zu). Laut Stobbe et al. (2015) sind schon heute Serverkonzepte verfügbar, bei denen in einem einzigen Serverschrank 150 oder mehr Server mit je zwei Prozessoren untergebracht werden. Bei speziellen Serverarchitekturen werden sogar bis zu 600 Server pro Rack erreicht (Stobbe et al. 2015). Allerdings gehen führende Firmen wie Intel und AMD von einem Ende des Mooreschen Gesetzes um 2023 aus (Peckham 2012). Stobbe et al. (2015) heben außerdem hervor, dass die kontinuierliche Miniaturisierung der Integrierten Schaltkreise seit längerer Zeit durch eine systemische Integration, d.h. den Aufbau von planaren bzw. auch gestapelten Multichip-Modulen ergänzt wird. Diese sogenannte Heterosystem-Integration ermöglicht sehr hohe Rechen- und Speicherleistung auf kleinem Raum und damit auch eine noch höhere funktionale



Integration. Ein Beispiel ist die Entwicklung von halbleiterbasierten Flash-Speichern und Solid-State-Drive Festspeichern (Stobbe et al. 2015). Der vermehrte Einsatz von halbleiterbasierten Flash-Speichern und Solid-State-Drive Festspeichern könnte dazu führen, dass der Materialbedarf an Neodym in den Rechenzentren zurückgeht. Allerdings ist der Herstellungsaufwand von einer SSD um ca. 10-fach höher als eine konventionelle HDD (Prakash et al. 2016). Ob der hohe Herstellungsaufwand einer SSD durch eine verbesserte Rechenleistung wieder aufgefangen wird, kann zurzeit nicht beurteilt werden.

#### 3.1.1.4 Literatur

Barroso, L.A., Hölzle, U.; The Data Center as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, 2nd ed., Morgan & Claypool, 2013.

Bio by Deloitte & Fraunhofer IZM 2015: Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC, DG ENTR Lot 9 - Enterprise servers and data equipment, im Auftrag von European Commission, DG Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SME

Cloud Computing; <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/cloud-computing.html>; Zugriff: 12.08.2016

Computerwoche 2014: Wie die Zukunft der Rechenzentren aussieht; <http://www.computerwoche.de/a/wie-die-zukunft-der-rechenzentren-aussieht,3064208>; Zugriff: 12.08.2016

NRDC 2014: Data Center Efficiency Assessment: Scaling Up Energy Efficiency Across the Data Center Industry: Evaluating Key Drivers and Barriers, Issue Paper August 2014, Natural Resources Defense Council

Peckham, M. (2012) The Collapse of Moore's Law: Physicist Says It's Already Happening, <http://techland.time.com/2012/05/01/the-collapse-of-moores-law-physicist-says-itsalready-happening/>

Prakash, S.; Antony, F.; Köhler, A.; Liu, R.; Schlösser, A.; Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC), Öko-Institut e.V. in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin, Forschungskennzahl (UFOPLAN) FKZ 3712 95 301 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau

Prakash, S., Brommer, E., Gröger, J.; PROSA Grüne Rechenzentren: Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projekts „Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte“, Öko-Institut e.V. im Auftrag des Umweltbundesamtes, Freiburg, 2012

Schäppi, B.: Energieeffiziente IT und Infrastruktur für Rechenzentren und Serverräume, PrimeEnergyIT, Austrian Energy Agency, Wien 2011.

Stobbe, L., Proske, M., Zedel, H.; Hintemann, R., Clausen, J., Beucker, S.; Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland, Fraunhofer IZM in Kooperation mit Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2015

### 3.1.2 Bleifreie Lote (UT Nr. 56)

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

#### 3.1.2.1 Materielle Substitution

Eine materialbezogene Alternative zu den vorherrschenden Zinn-Kupfer- bzw. Zinn-Silber-Kupfer-Loten stellen Zinn-Bismut-Legierungen dar. Der Schmelzpunkt von Zinn-Bismut-Legierungen (z.B. Sn42Bi57Ag1) ist mit 138 °C sogar deutlich niedriger als der von bleihaltigen SnPb-Legierungen (183 °C), womit sich die thermische Belastung der Bauelemente verringern ließe (IPC 2009).

Allerdings wird davon ausgegangen, dass angesichts der begrenzten Verfügbarkeit Zinn-Bismut-Legierungen nur für Nischen eingesetzt werden können; die Förderung von 15.000 t Bismut jährlich

(als Koppelprodukt der Bleiförderung) wird keine flächendeckende Umstellung auf Zinn-Bismut-Lote ermöglichen.

### 3.1.2.2 Technologische Substitution

Einen Ansatz zur technologischen Substitution der bleifreien Löttechnik stellt das so genannte Silber-Sintern dar, welcher insbesondere durch die zunehmende Miniaturisierung von elektronischen Schaltungsträgern begünstigt wird. Der große Vorteil einer Sintertechnologie mit dünnen Silberschichten besteht laut der Anbieter darin, dass beim Sintern maximal Temperaturen von 250 °C auftreten und (anders als bei der Löttechnologie) keine flüssige Phase entsteht. Andererseits lässt sich die Verbindung bis über 300 °C hinaus thermisch belasten und soll sich erst bei 960 °C wieder lösen. Der Sinterprozess erfolgt innerhalb von 2 bis 5 s durch Erwärmen und Pressen (Industrieanzeiger 2016).

Eine weitere Möglichkeit auf der Ebene der technologischen Substitution bietet das Mikro-Reibrührschweißen, dessen Anwendungsbereich sich jedoch auf ultradünne Bleche und Spezialschaltungen reduziert. Beim Reibrührschweißen handelt es sich um ein Festkörperfügeverfahren, bei dem die beiden zu fügenden Komponenten im Wesentlichen mittels der Reibungswärme verbunden werden, die ein rotierendes Schweißwerkzeug erzeugt. Die Komponenten werden dann zusammengepresst, wodurch glatte Verbindungen mit ultrafeinen Kornstruktur entstehen (Cordis 2014).

Im Rahmen des Fachgesprächs am 13. Oktober 2016 in Berlin wurde darauf hingewiesen, dass weitere Substitutionsmöglichkeiten auf technologischer Ebene vorhanden sind (z.B. Transient Liquid Phase Bonding). Diese werden im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung berücksichtigt.

### 3.1.2.3 Funktionale Substitution

Molekulare Elektronik verfolgt den Ansatz, die derzeit vorherrschende, auf Silizium basierende Elektronik durch eine Technologie zu substituieren, die auf Molekülen und molekularen Funktionseinheiten aufgebaut ist, d.h. das Verarbeiten, Weiterleiten und Speichern würde auf der Ebene von einzelnen Molekülen erfolgen. Als Speicherelemente werden beispielsweise Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT), als „Drähte“ Polypyrrole diskutiert (Ferdinand 2009). Aufgrund dieses „Quantensprungs“ würde sich folglich auch die Frage der Verbindung und Kontaktierung der einzelnen „Bauteile“ bzw. Bestandteile einer elektronischen Schaltung auf völlig anderer Ebene stellen und mit großer Wahrscheinlichkeit die derzeit bestehende Löttechniken obsolet machen.

Die folgende Tabelle fasst die verschiedenen Substitutionsansätze nochmals zusammen:

Tabelle 3-1: Substitutionsansätze für die bleifreien Lote

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsubstitution	Zinn-Bismut-Legierungen
Technologische Substitution	Silber-Sintern Mikro-Reibrührschweißen
Funktionelle Substitution	Molekulare Elektronik

### 3.1.2.4 Mögliche Effizienzverluste

Die verfügbaren Informationen hinsichtlich möglicher Effizienzverluste bei den verschiedenen Substitutionsansätzen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 3-2: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die bleifreien Lote

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsstitution</b>	
Zinn-Bismut-Legierungen	Keine Informationen verfügbar.
<b>Technologische Substitution</b>	
Silber-Sintern	Keine Informationen verfügbar.
Mikro-Reibrührschweißen	Keine Effizienzverluste zu erwarten; stattdessen Effizienzgewinne durch deutlich geringeren Energiebedarf im Vergleich zu konventionellen Fügetechniken.
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Molekulare Elektronik	Keine Informationen verfügbar; aufgrund der Miniaturisierung sind eher Effizienzsteigerung zu erwarten.

### 3.1.2.5 Mögliche Restriktionen

Die Restriktionen der verschiedenen Substitutionsansätze werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die bleifreien Lote

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
Zinn-Bismut-Legierungen	Ausdehnen des Lotes beim Abkühlen und dadurch Anhebung der Lötnaht in Lötverbindungen mit Via-Bohrungen; Bismut ist ein sehr spröder Stoff, weshalb Zinn-Bismut-Lote sich möglicherweise nicht für alle Anwendungen eignen; Aufgrund Verfügbarkeit Beschränkung des Einsatzes auf Nischen.
<b>Technologische Substitution</b>	
Silber-Sintern	Bislang auf Leistungselektronik bei Pkws beschränkt, aber nicht im Niedrigpreissektor; insbesondere für Hochtemperaturanwendungen wird versucht, das Silber-Sintern für die Baugruppenmontage (Widerstände, Dioden, Spulen, LEDs, ICs) nutzbar zu machen.
Mikro-Reibrührschweißen	Beschränkung des Anwendungsbereichs auf ultradünne Bleche und Spezialschaltungen.
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Molekulare Elektronik	Sehr niedriger technologischer Reifegrad (TRL); Frage der Kontaktierung bislang noch völlig ungeklärt.

### 3.1.2.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Zu Zinn-Bismut-Legierungen waren zu diesem Aspekten keine Informationen verfügbar. Das Silber-Sintern würde voraussichtlich zu Schaltungen führen, die sich besser recyceln lassen bzw. aufgrund des Edelmetallgehalts die Nachfrage bei den Recyclern steigern. Bei der molekularen Elektronik ist es angesichts der geringeren Technologiereife nicht möglich, belastbare Aussagen zu ökologischen Vor- bzw. Nachteilen zu treffen.

Beim Reibrührschweißen wird davon ausgegangen, dass im Vergleich zu den konventionellen Verfahren der Fügetechnik deutlich weniger Energie benötigt wird und kaum Schadstoffe entstehen (Cordis 2014). Quantifizierungen dieser Aussagen sind jedoch in der ausgewerteten Literatur nicht enthalten.

### 3.1.2.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Firmen des IKT- bzw. Unterhaltungselektroniksektors wie Hewlett-Packard (HP) haben bereits umfangreiche Test mit Zinn-Bismut-Legierungen durchgeführt und sind dabei zu positiven Ergebnissen gekommen (Sandy et al. 2011). Es ist daher davon auszugehen, dass sich dieser Substitutionsansatz mindestens auf der Ebene von Prototypen befindet.

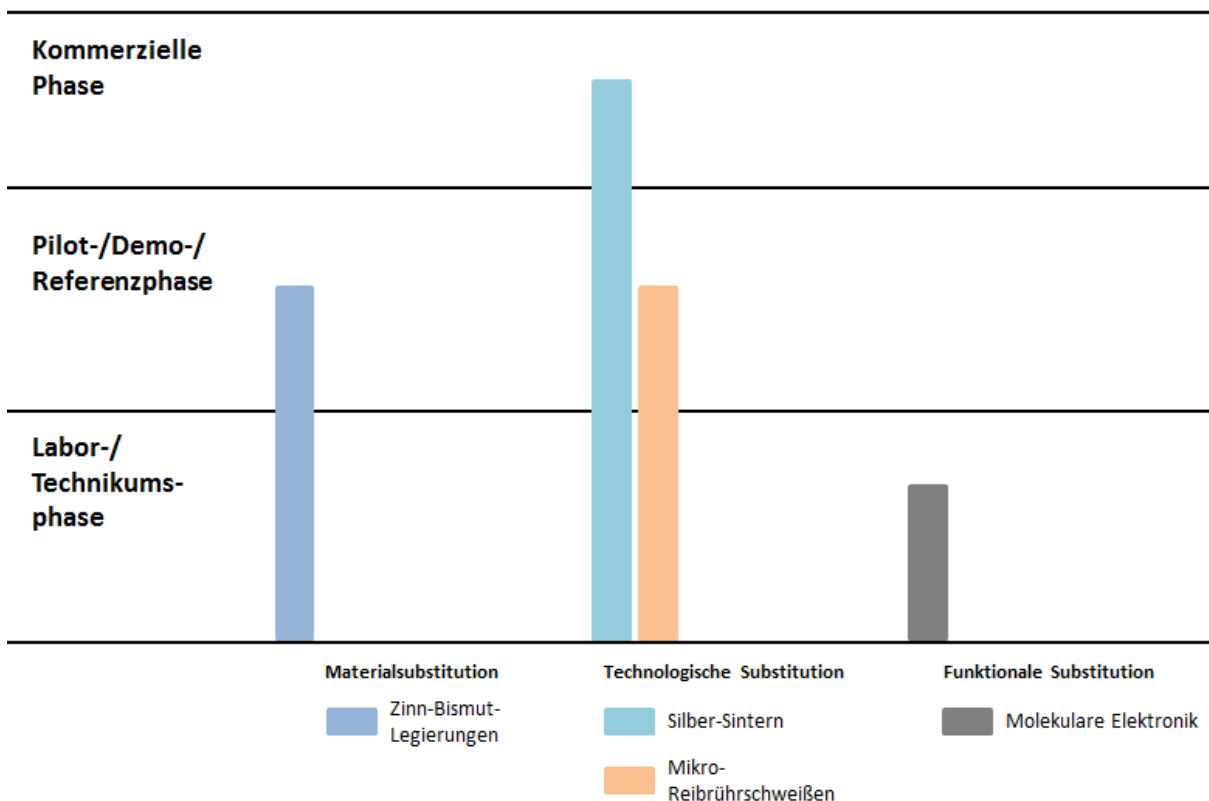
Im Jahr 2006 hat die Firma PINK mit der „SIN200+“ die erste inline-fähige Anlage für das Silber-Sintern vorgestellt (Zühlke 2016). Diese Technologie befindet sich folglich bereits in der Marktreife.

Nicht ganz so weit entwickelt ist das Mikro-Reibrührschweißen. Bei dieser Technologie wurden bislang nur Prototypensysteme für den Einsatz in der Elektronikfertigung und das Nahtschweißen zur hermetischen Abdichtung entwickelt (Cordis 2014).

Demgegenüber wird eine Marktreife bei der molekulare Elektronik erst in der fernen Zukunft erwartet, erste Versuche beschränken sich auf die Laborebene (Ferdinand 2009).

Die folgende Abbildung fasst die Einschätzungen in Hinblick auf die Technologiereife der verschiedenen Substitutionsmöglichkeiten zusammen.

Abbildung 3.1: Technologiereife der Substitutionsoptionen für die bleifreien Lote



Quelle: Eigene Darstellung

### 3.1.2.8 Fazit

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

### 3.1.2.9 Literatur

BGR 2014: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: DERA Rohstoffinformationen (20): Zinn, 2014, online verfügbar unter: [http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-20.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=9](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-20.pdf?__blob=publicationFile&v=9) (abgerufen am 25.08.2016)

Cordis 2014: Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Gemeinschaft (CORDIS), Vielversprechende Alternative zum Lötten, online verfügbar unter: [http://cordis.europa.eu/result/rcn/93052\\_de.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/93052_de.html) (abgerufen am 25.08.2016)

Deubzer 2007: Deubzer, O.: Explorative Study into the Sustainable Use and Substitution of Soldering Metals in Electronics – Ecological and Economical Consequences of the Ban of Lead in Electronics and Lessons to Be Learned for the Future; PhD thesis TU Delft, The Netherlands, January 2007, ISBN 978-90-5155-031-3, online verfügbar unter: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid/%3Af9a776cf-57c3-4815-a989-fe89ed59046e/> (abgerufen am 25.08.2016)

Ferdinand 2009: Ferdinand, L.: Was ist molekulare Elektronik? Seminarvortrag, Heidelberg 2009, online verfügbar unter: [http://www.uni-heidelberg.de/institute/fak12/OC/hashmi/MCII/MCII/seminar/Was\\_ist\\_Molekulare\\_Elektronik\\_2009.pdf](http://www.uni-heidelberg.de/institute/fak12/OC/hashmi/MCII/MCII/seminar/Was_ist_Molekulare_Elektronik_2009.pdf) (abgerufen am 25.08.2016)

Industrieanzeiger 2016: Blei-Verbot macht die Entwickler erfinderisch, online verfügbar unter: <http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/12503/15997564/> (abgerufen am 25.08.2016)

IPC 2009: Association Connecting Electronics Industries (IPC), Joint Industry Standard, Requirements for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronic Soldering Applications, IPC J-STD-006B, Amendments 1&2, September 2009, online verfügbar unter: [http://www.ipc.org/4.0\\_Knowledge/4.1\\_Standards/Free/j-std-006b-amendments1-2.pdf#xml=http://localhost/tehis/searchipc/pdfhi.txt?query=Sn+Bi&pr=IPC-NonMember&prox=page&rorder=500&rprox=500&rdfreq=0&rwfreq=1000&rlead=750&rdepth=31&sufs=1&order=r&cq=&sr=-1&id=527d929017](http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/Free/j-std-006b-amendments1-2.pdf#xml=http://localhost/tehis/searchipc/pdfhi.txt?query=Sn+Bi&pr=IPC-NonMember&prox=page&rorder=500&rprox=500&rdfreq=0&rwfreq=1000&rlead=750&rdepth=31&sufs=1&order=r&cq=&sr=-1&id=527d929017)

Sandy et al. 2011: Sandy, B., Briggs, E., Lasky, R.; Advantages of Bismuth-based Alloys for Low Temperature Pb-Free Soldering and Rework, Indium Corporation Tech Paper, Toronto, 2011, online verfügbar unter: [http://www.smtnet.com/library/files/upload/advantages\\_of\\_bismuth\\_based\\_alloys\\_for\\_low\\_temp\\_soldering.pdf](http://www.smtnet.com/library/files/upload/advantages_of_bismuth_based_alloys_for_low_temp_soldering.pdf) (abgerufen am 25.08.2016)

Zühlke 2016: Zühlke, K.; Sintern - das neue Lötten, online verfügbar unter: <http://www.elektroniknet.de/elektronikfertigung/fertigungstechnik/artikel/127303/> (abgerufen am 25.08.2016)

Experten:

Dr.-Ing. Otmar Deubzer, United Nations University

## 3.2 Technologiegruppe Katalysatoren

Zu der Technologiegruppe der Katalysatoren gehören die Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren (UT Nr. 43) und die Industriekatalysatoren (UT Nr. 53).

### 3.2.1 Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren (UT Nr. 43)

Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren haben die Aufgabe, die Reaktionen der umwelt- und gesundheitsschädlichen Bestandteile (Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonooxid und Stickstoffoxide) der Motorenabgase zu nicht gesundheitsschädlichen Verbindungen (Wasser, Kohlenstoffdioxid und

Stickstoff) zu beschleunigen und unter den im Katalysator gegebenen Bedingungen zu ermöglichen. Hierfür sind für die verschiedenen Reaktionen verschiedene Metalle notwendig. **Platin** begünstigt Oxidationsprozesse, vor allem die Oxidation von Kohlenwasserstoffen und Kohlenstoffmonooxid. Es wurde aus Kostengründen, soweit es technisch möglich war, durch **Palladium** teilsubstituiert, das ebenfalls Oxidationsreaktionen fördert. **Rhodium** begünstigt Reduktionsvorgänge, vor allem die Reduktion der Stick-stoffoxide zu Stickstoff. **Cer** dient im Katalysator in seiner oxidischen Form als Sauerstoffspeicher, um unter sauerstoffarmen Bedingungen eine Oxidation des Kohlenstoffmonooxids zu ermöglichen.

#### 3.2.1.1 Materielle Substitution

**Platin** kann, wie es aus Kostengründen bereits partiell geschehen ist, durch Palladium ersetzt werden. In Dieselmotoren ist dies in beschränkter Form möglich, während eine weitgehende Substitution bei Benzinmotoren möglich ist. Eine Schwefelvergiftung und damit eine Verringerung der Standzeit kann hier allerdings die Folge sein. Da Palladium in der Kritikalitätswertung 5 Ränge über Platin liegt, ist diese Substitution aus dem Blickwinkel der Kritikalität aber kontraproduktiv.

Eine weitere Möglichkeit Platin zumindest in Katalysatoren von Dieselfahrzeugen zu ersetzen, ist Noxicat, ein Mineralkatalysator auf Mullitbasis. 2012 ist die Forschung zum Katalysator in Science publiziert worden, allerdings gab es danach keine Meldungen mehr von der Entwicklerfirma Nanostellar, weshalb ein Einsatz in der Praxis bisher fraglich ist.

Eine letzte Substitutionsmöglichkeit für Platin im Katalysator ist Gold. Nanostellar hat bereits Tests durchgeführt, allerdings handelte es sich hierbei auch nur um eine Teilsubstitution, so dass Platin und Palladium immer noch notwendig sind. Es ist unsicher, ob Gold einen Stabilitätstest über 100.000 Meilen schaffen könnte, ohne seinen Effekt durch Versinterung oder Vergiftung zu verlieren.

Platin kann in Dieselpartikelfiltern durch Silber substituiert werden, allerdings müsste diese Einsparung im Filter wieder im Katalysator eingebaut werden, da Silber ein schlechter Oxidationskatalysator ist.

**Palladium** kann problemlos durch Platin ersetzt werden. Der heutige Palladiumanteil im Katalysator ist erst später hinzugefügt worden, als Palladium deutlich günstiger erhältlich war als Platin. Aus Kritikalitätssicht würde hier das Palladium, welches Rang 2 annimmt, durch Platin substituiert werden, welches auf Platz 7 rangiert. Dies würde zwar ein kritisches Material durch ein anderes substituieren, aber Platin ist im Ranking weniger kritisch als Palladium.

Für Palladium gelten die gleichen Substitutionsmöglichkeiten durch Gold sowie Silber wie sie bei Platin beschrieben sind.

#### 3.2.1.2 Technologische Substitution

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

Der Cerbedarf für den Sauerstoffspeicher könnte durch eine andere Luftsteuerung (sauerstoffreiches Luftgemisch) vermindert werden, führt aber zu anderen Problemen, so ist z.B. eine Reduktion von NOx

mit normalem Katalysator nicht möglich, da die Reduktionsmittel im Abgas wie Kohlenwasserstoffe oder Kohlenstoffmonooxid durch den höheren Sauerstoffanteil vollständig verbrennen und nicht mehr zur NO<sub>x</sub>-Reduktion zur Verfügung stehen. Der Einbau einer weiteren Katalysatorkomponente und die bessere Steuerung der Luftzahl können den Cerbedarf minimieren, aber nicht auf null bringen.

### 3.2.1.3 Funktionale Substitution

Die vollständige Funktion des Katalysators kann durch neue Antriebstechnologien wie Elektromotoren (UT 38), angetrieben über Akkumulatoren (UT 98) (Battery Electric Vehicle - BEV) oder Brennstoffzellen (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV), ersetzt werden. Allerdings sind für diese Technologien andere kritische Metalle wie Lithium oder Neodym notwendig.

In Tabelle 3-4 sind alle Substitutionsoptionen nochmal zusammenfassend dargestellt.

### 3.2.1.4 Übersicht über die Substitutionsansätze

Tabelle 3-4: Substitutionsansätze für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsstitution	Ersatz von Platin durch Palladium (Schwefelvergiftung möglich) Ersatz von Platin durch Mullitkatalysatoren in Dieselfahrzeugen Partieller Ersatz von Platin durch Gold Ersatz von Platin durch Silber in Dieselpartikelfiltern Ersatz von Palladium durch Platin Partieller Ersatz von Platin durch Gold Ersatz von Platin durch Silber in Dieselpartikelfiltern
Technologische Substitution	Rhodium durch Platin in einer HC-SCR Rhodium durch Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram in einer SCR Rhodium durch Zeolithe (mit Kupfer oder Eisen) in einer SCR Cer durch andere Luftsteuerung
Funktionelle Substitution	Elektromobilität mit BEV Elektromobilität mit FCEV

### 3.2.1.5 Mögliche Effizienzverluste

In Tabelle 3-5 sind die Effizienzverluste der Substitutionsoptionen dargestellt. Hierbei handelt es sich um qualitative Aussagen, da keine direkten Untersuchungen vorhanden sind, welche die Effizienzverluste quantifizieren. Wie zu erkennen ist, gibt es bei der Substitution von Platin durch Mullitkatalysatoren in Dieselfahrzeugen einen Effizienzgewinn. Die Substitution von Palladium durch Platin zeigt keine Verluste, während alle übrigen Optionen Effizienzverluste aufweisen. Die Effizienzverluste beziehen sich auf Standzeiten, bessere Performance der Katalyse, Mehraufwand an Kraftstoff durch höheres Gewicht bzw. höhere notwendige Temperatur oder durch Verluste durch Vorleistungen in der Bereitstellungskette (z.B. Verluste durch Stromumwandlung).

Tabelle 3-5: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator

	Effizienzverluste
<b>Materialsstitution</b>	
Ersatz von Platin durch Palladium (Schwefelvergiftung möglich)	Schwefelvergiftung und damit geringere Standzeit möglich
Ersatz von Platin durch	Höhere Effizienz (45 % weniger NO <sub>x</sub> -Emissionen) als



	Effizienzverluste
Mullitkatalysatoren in Dieselfahrzeugen	Platinkatalysatoren
Partieller Ersatz von Platin durch Gold	Effizienzverluste bei der Standzeit
Ersatz von Platin durch Silber in Dieselpartikelfiltern	Effizienzverluste bei der Standzeit
Ersatz von Palladium durch Platin	Keine Verluste
Partieller Ersatz von Palladium durch Gold	Effizienzverluste bei der Standzeit
Ersatz von Palladium durch Silber in Dieselpartikelfiltern	Effizienzverluste bei der Standzeit
<b>Technologische Substitution</b>	
Rhodium durch Platin in einer HC-SCR	Entwicklung von Lachgas als potentes Treibhausgas; Treibstoffmehrverbrauch von etwa 5 %
Rhodium durch Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram in einer SCR	Zusätzlicher Harnstofftank notwendig → mehr Gewicht
Rhodium durch Zeolithe mit Cu oder Fe in einer SCR	Zusätzlicher Harnstofftank notwendig → mehr Gewicht; höhere Temperaturen im Katalysator notwendig
Cer durch andere Luftsteuerung	Reduktion von NO <sub>x</sub> nicht ohne weitere Technologien möglich, eine vollständige Substitution von Cer nicht möglich
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Elektromobilität mit BEV	Umwandlungsverluste bei der Bereitstellung von Strom
Elektromobilität mit FCEV	Umwandlungsverluste bei der Bereitstellung von H <sub>2</sub> oder CH <sub>3</sub> OH; aktuell niedriger Wirkungsgrad

### 3.2.1.6 Mögliche Restriktionen

In Tabelle 3-6 sind die Restriktionen der einzelnen Substitutionsoptionen dargestellt. Es ist zu sehen, dass keine der möglichen Optionen ohne Restriktionen implementierbar ist. Die Mullitkatalysatoren haben die Beschränkung, nur in Dieselfahrzeugen eingesetzt werden zu können.

Tabelle 3-6: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator

	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
Ersatz von Platin durch Palladium (Schwefelvergiftung möglich)	Schwefelvergiftung und damit geringere Standzeit möglich; höhere Kritikalität
Ersatz von Platin durch Mullitkatalysatoren in Dieselfahrzeugen	Nur auf Dieselfahrzeuge beschränkt
Partieller Ersatz von Platin durch Gold	Höhere Kosten; geringere Standzeit
Ersatz von Platin durch Silber in Dieselpartikelfiltern	Nur bei Dieselfahrzeugen; dafür mehr Platin/Palladium im Katalysator notwendig
Ersatz von Palladium durch Platin	Höhere Kosten
Partieller Ersatz von Palladium durch Gold	Höhere Kosten; geringere Standzeit
Ersatz von Palladium durch Silber in	Nur bei Dieselfahrzeugen; dafür mehr Platin/Palladium im



	Restriktionen
Dieselpartikelfiltern	Katalysator notwendig
<b>Technologische Substitution</b>	
Rhodium durch Platin in einer HC-SCR	Lachgasentwicklung und Treibstoffmehrverbrauch von etwa 5 %
Rhodium durch Vanadiumpentoxid /Titandioxid/Wolfram in einer SCR	Zusätzlicher Harnstofftank notwendig → mehr Gewicht; unbequemer da zusätzlicher Tankvorgang notwendig
Rhodium durch Zeolithe mit Cu oder Fe in einer SCR	Zusätzlicher Harnstofftank notwendig → mehr Gewicht; höhere Temperaturen im Katalysator notwendig; unbequemer da zusätzlicher Tankvorgang notwendig
Cer durch andere Luftsteuerung	Reduktion von NO <sub>x</sub> nicht ohne weitere Technologien möglich
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Elektromobilität mit BEV	Reichweitenverlust; längere Ladezeiten; Infrastrukturausbau notwendig
Elektromobilität mit FCEV	Sehr teuer; niedriger Wirkungsgrad; geringe Lebensdauer; große Tanks notwendig; sehr giftiger Kraftstoff im Fall von Methanol, fast keine Infrastruktur vorhanden

### 3.2.1.7 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

In Tabelle 3-7 sind die ökologischen Vor- bzw. Nachteile der Substitutionsoptionen dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Ersatz von Platin durch einen Mullitkatalysator bei den Materialsubstitutionen als einziger deutliche Vorteile hat. Die funktionellen Substitutionsoptionen, allen voran die Elektromobilität, haben deutliche ökologische Vorteile gegenüber den übrigen Optionen.

Tabelle 3-7: Ökologische Vor- bzw. Nachteile der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator

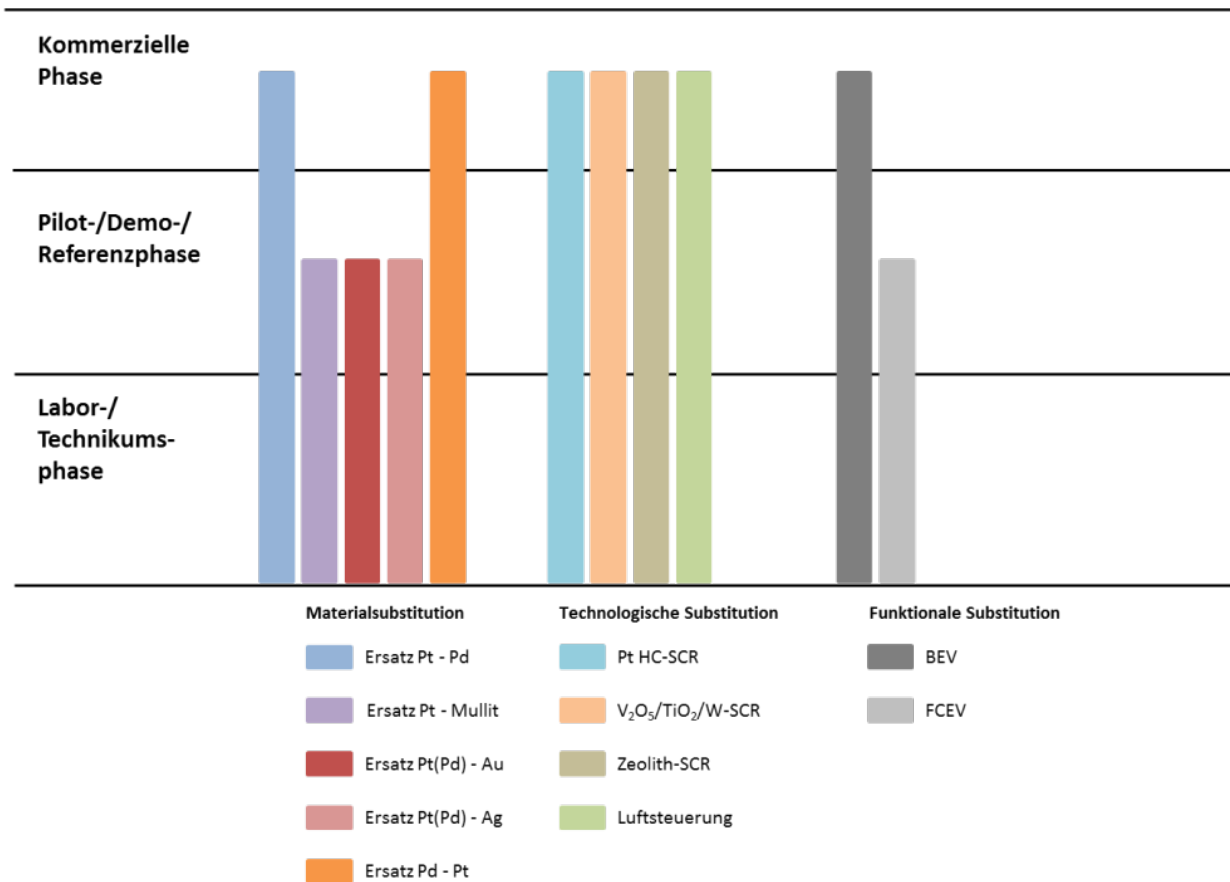
	Ökologische Vor-/Nachteile
<b>Materialsubstitution</b>	
Ersatz von Platin durch Palladium (Schwefelvergiftung möglich)	Palladium weniger resistent gegenüber Schwefel; Förderung von Palladium hat geringere CO <sub>2</sub> -Emissionen
Ersatz von Platin durch Mullitkatalysatoren in Dieselfahrzeugen	45 % geringere NO <sub>x</sub> -Emissionen als Platinkatalysator; Mullit ist deutlich umweltfreundlicher zu fördern als Platin
Partieller Ersatz von Platin durch Gold	geringere Standzeit → Austausch vor dem EoL des Fahrzeugs
Ersatz von Platin durch Silber in Dieselpartikelfiltern	Wenn überhaupt nur geringe Einsparungen der Edelmetalle
Ersatz von Palladium durch Platin	Förderung von Platin hat höhere CO <sub>2</sub> -Emissionen
Partieller Ersatz von Palladium durch Gold	geringere Standzeit → Austausch vor dem EoL des Fahrzeugs
Ersatz von Palladium durch Silber in Dieselpartikelfiltern	Wenn überhaupt nur geringe Einsparungen der Edelmetalle
<b>Technologische Substitution</b>	
Rhodium durch Platin in einer HC-SCR	Verstärkte Treibhausgasemissionen durch Lachgasbildung; Mehrverbrauch von etwa 5 %; mehr Platin notwendig
Rhodium durch Vanadiumpentoxid	Mehr Gewicht führt zu höheren Kraftstoffverbrauch;

	Ökologische Vor-/Nachteile
/Titandioxid/Wolfram in einer SCR	Harnstoffproduktion benötigt Energie; Ti/V/W umweltfreundlicher bei Förderung
Rhodium durch Zeolithe mit Cu oder Fe in einer SCR	Mehr Gewicht führt zu höheren Kraftstoffverbrauch; Harnstoffproduktion benötigt Energie; Zeolitheherstellung ist emissionsarm
Cer durch andere Luftsteuerung	Kein Cer → weniger Emissionen durch Förderung; NO <sub>x</sub> -Emissionen müssen anders entfernt werden → möglicherweise Mehremissionen oder neue Technologie benötigt Edelmetalle; vollständige Substitution ist nicht möglich
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Elektromobilität mit BEV	Keine Luftschadstoffe am Fahrzeug; weniger Lärm innerstädtisch; geringerer Energiebedarf und geringere CO <sub>2</sub> -Emissionen absolut
Elektromobilität mit FCEV	Keine Luftschadstoffe am Fahrzeug; weniger Lärm innerstädtisch

#### 3.2.1.8 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

In Abbildung 3.2 sind die Entwicklungsstadien der einzelnen Substitutionsoptionen dargestellt. Es ist zu sehen, dass sieben der elf dargestellten Optionen in der kommerziellen Phase sind. Die übrigen vier Optionen befinden sich im Stadium zwischen Laborphase und kommerzieller Phase. Es ist leider nicht vorherzusehen, wann die Optionen in der zweiten Phase ihren kommerziellen Durchbruch schaffen, da sich einige der Optionen schon lange in dieser Phase befinden.

Abbildung 3.2: Technologiereife der Substitutionsalternativen für den Fahrzeug-Abgas-Katalysator



Quelle: Eigene Darstellung

### 3.2.1.9 Fazit

Auf der Ebene der Materialsubstitution wäre es direkt möglich, Palladium durch Platin zu ersetzen, auch wenn dies erhöhte Kosten zur Folge hat. Die Substitution von Platin durch Palladium ist technisch möglich, würde aber eine erhöhte Kritikalität und eine erhöhte Anfälligkeit des Katalysators gegenüber Schwefel verursachen. Die übrigen Optionen der Materialsubstitution sind noch nicht marktreif und befinden sich in der Erprobungsphase. Ein Marktdurchbruch ist aktuell nicht absehbar.

Auf der Ebene der technologischen Substitutionen sind alle Optionen in der kommerziellen Phase. Die Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR befindet sich bereits im Einsatz, aber nur bei einem kleinen Teil der Fahrzeugflotte. Gleiches gilt für die Zeolith-SCR. Die Luftsteuerung wird implementiert, allerdings gibt es hier technische Grenzen, sodass eine vollständige Substitution von Cer nicht möglich ist. Die HC-SCR verursacht Lachgasemissionen und einen Treibstoffmehrverbrauch, weshalb sie hier nicht als zielführende Substitution zu sehen ist.

Auf der Ebene der funktionalen Substitution ist die Elektromobilität durch batteriegetriebene Fahrzeuge im Markt vorhanden und auch einsetzbar. Die hohen Investitionskosten und die noch nicht ausgebaute Ladeinfrastruktur sowie die Komforteinbußen stehen der flächendeckenden Substitution der Verbrennungstechnologie allerdings noch entgegen. Ähnliches gilt auch für die Brennstoffzellentechnologie, die allerdings sehr hohe Investitionskosten hat und mit zahlreichen technischen Problemen zu kämpfen hat und somit als Substitutionsoption keine Rolle spielen dürfte.

### 3.2.2 Industriekatalysatoren (UT Nr. 53)

Katalysatoren und ihre Anwendung haben eine lange Geschichte, die bis zur Antike zurückreicht. In der Neuzeit wurden Katalysatoren dann durch Ostwald definiert. Der erste industrielle Katalysator war das Stickstoffdioxid, welches im Bleikammervverfahren zur Herstellung von Schwefelsäure genutzt wurde. Seitdem wurden zahlreiche verschiedene Katalysatoren entdeckt und entwickelt.

Aus Kritikalitätssicht sind vor allem Katalysatoren aus den Platingruppenmetallen Rhodium, Palladium, Ruthenium, Iridium und Platin genauer zu betrachten, ebenso wie Silber. Die Anwendung dieser Metalle ist sehr breit über die verschiedensten chemischen Prozesse verteilt. Iridium hat nur eine Hauptanwendung: die Herstellung von Essigsäure. Silber hat zwei Hauptanwendungen: die Herstellung von Ethylenoxid und von Formaldehyd. Die übrigen Metalle finden ihre Anwendung z.B. in der Erdölraffination, der Salpetersäureherstellung oder anderen Umwandlungsreaktionen der organischen Chemie (Hydrierung, Oxidation, Isomerisierung, u.a.).

Die zu diesen Anwendungen gehörenden Verfahren wurden auf Substitutionsmöglichkeiten hin untersucht. Das Ergebnis war jedoch für alle Anwendungen stets gleich: Es gibt immer ein vorher angewandtes Verfahren, welches allerdings durch das aktuelle Verfahren ersetzt wurde, da es höhere Ausbeuten, schnellere Umsätze oder eine kostengünstigere Produktion bietet.

Anschaulich lässt sich dies vor allem bei der Synthese von Essigsäure darstellen:

Essig lässt sich über die oxidative Fermentation oder die Holzverkokung herstellen. Dies kann aber nicht den industriellen Bedarf decken, weshalb die Acetaldehyd-Oxidation der erste wichtige Prozess war, um Essigsäure herzustellen. Hier werden Co- oder Mn-Katalysatoren eingesetzt, um Acetaldehyd mit Luft oder Sauerstoff zu oxidieren. Über dieses Verfahren wurden in Europa 1979 noch 62 % der Essigsäure hergestellt. Für die Herstellung des Acetaldehyds wird allerdings Palladium als Katalysator genutzt. Es folgte die Herstellung über die Umsetzung von Methanol mit Kohlenstoffmonoxid. Hier dienten erst Kobalt und Iod in Form von  $\text{CoI}_2$  als Katalysator. Interessant wurde diese Syntheseroute erst nach der Einführung eines Rhodiumkatalysators, den „Monsanto-Prozess“. Über diesen Prozess wurden 1991 bereits 55 % der weltweiten Essigsäuremengen hergestellt, trotz der hohen Katalysatorkosten. Der letzte Entwicklungsschritt war die Einführung des Cativa-Prozesses, welcher einen Iridiumkatalysator nutzt, der günstiger ist und eine höhere Raum-Zeit-Ausbeute liefert.

Auch wenn  $\text{CoI}_2$  in dieser Entwicklung der günstigste Katalysator ist, haben andere Faktoren wie Ausbeute oder Standzeit eine so große ökonomische Auswirkung, dass der teure Katalysator eingesetzt wird. Bei den hohen Rückgewinnungsraten, welche bei industriellen Katalysatoren vorliegen ist dies sogar verständlich, da nur ein geringer Verlust entsteht.

Dennoch gibt es Katalysatoren, welche bei der Herstellung verloren gehen. Bei der homogenen Katalyse, also der Auflösung des Katalysators im Reaktionsmedium (z.B. Eduktgemisch oder Lösungsmittel), ist dies der Fall. Das prominenteste und teuerste Beispiel ist die Herstellung von vernetzten (vulkanisierten) Silikonen, bei welchen ein Platinkatalysator zur Additionsvernetzung eingesetzt wird. Jährlich gehen über diese Anwendung 4 bis 6 t Platin „verloren“, obwohl auch andere Vernetzungsalternativen existieren (z.B. Peroxid- und Kondensationsvernetzung), welche aber nicht die Leistung der platinkatalysierten Vernetzung bieten und somit zu schlechteren Produkteigenschaften oder schlechterer Verarbeitung führen würden.

#### 3.2.2.1 Materielle Substitution

Es sind bisher keine materiellen Substitutionen identifizierbar.

#### 3.2.2.2 Technologische Substitution

Alte Verfahren sind vorhanden, aber wirtschaftlich nicht tragfähig.

### 3.2.2.3 Funktionale Substitution

Ein Austausch der hergestellten Produkte ist in manchen Fällen möglich, aber nicht wirtschaftlich darstellbar.

### 3.2.2.4 Übersicht über die Substitutionsansätze

Es sind keine Substitutionsmöglichkeiten identifiziert worden, die in der Praxis unter wirtschaftlichen Bedingungen umgesetzt werden können.

### 3.2.2.5 Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der üblichen industriellen Katalyse eine hohe Rückgewinnungsrate der Metalle vorherrscht und somit eine Substitution nicht zwingend erforderlich ist. Wirtschaftlich würde sich eine solche Substitution auch nur darstellen lassen, wenn die Substitutionsalternative bessere Eigenschaften (z.B. höhere Ausbeute) hätte, so dass eine Investition in neue Anlagen Vorteile bringen würde. Eine Ausnahme hiervon sind die genannten homogenen Katalysatoren, welche zumeist verloren gehen. Hier wird zwar seit langem geforscht, aber eine wirtschaftlich darstellbare Substitution ist noch nicht gefunden worden, andernfalls wäre diese bereits im Markt vorhanden.

## 3.3 Technologiegruppe Permanentmagnete

In die Technologiegruppe der Permanentmagnete fallen die Motoren der Hybridfahrzeuge, der vollelektrischen und der Plug-in-Hybrid-Pkw sowie die Motoren der Pedelecs. Bei den Pedelecs werden in diesem Kapitel auch die Substitutionsmöglichkeiten der Batterie mitbetrachtet. Zum anderen gehören die Hochleistungs-Permanentmagnete der Industrieanwendungen sowie die Permanentmagnet-Generatoren der Windkraftanlagen in diese Technologiegruppe.

### 3.3.1 Pedelecs (UT Nr. 35 Motoren und Batterie)

Unter dieser Umwelttechnologie sind Pedelecs bis 250 Watt zusammengefasst. S-Pedelecs und E-Bikes sind ausgenommen, da S-Pedelecs 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 Pedelec, S-Pedelec und E-Bike eine kurze Erläuterung: Ein Pedelec (Pedal Electric Cycle) ist mit einem elektromotorischen Antrieb von bis zu 250 Watt ausgestattet, der beim Anfahren oder am Berg den Fahrer unterstützt. Bei zunehmender Geschwindigkeit verringert sich jedoch diese Unterstützung und wird bei Erreichen von 25 km/h unterbrochen. Straßenverkehrsrechtlich gilt das Pedelec als Fahrrad. Schnelle Pedelecs (sogenannte S-Pedelecs) oder E-Bikes fallen aufgrund ihrer höheren Geschwindigkeitsleistung in den Geltungsbereich der EG-Richtlinie 2002/24/EG und sind damit Kraftfahrzeuge. S-Pedelecs 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. Als Referenztechnologie des Pedelec-Motors wird ein Permanentmagnet-Motor angenommen. Dieser hat zwei bedeutende Vorteile. Zum einen besitzt er eine hohe Energiedichte und hohe Leistungsfähigkeit. Zum anderen gewährleistet dies eine leichte und kompakte Bauform des Antriebsmotors. Zum anderen wird die Traktionsbatterie beim Pedelec betrachtet. Hier werden als Referenztechnologie die LiNiMnCoO<sub>2</sub>- oder LiFePO<sub>4</sub>-Akkus angesetzt.

Für die Pedelecs sind folgende 6 Rohstoffe als kritisch und relevant eingestuft (in alphabetischer Reihenfolge): Dysprosium, Kupfer, Lithium, Mangan, Neodym, Praseodym

#### 3.3.1.1 Materielle Substitution

#### Materielle Substitution der Motoren

Im Motor werden die Seltenen Erden Dysprosium, Neodym und Praseodym sowie Kupfer eingesetzt. Es wird an einem reduzierten Einsatz von Seltenen Erden geforscht. Aufgrund der sehr hohen Kritikalität von Dysprosium wird v.a. an Dy-freien Permanentmagnet-Motoren geforscht. Erste Seltene-Erden-freie Permanentmagnet-Motoren wurden entwickelt (Honkura 2013). Allerdings ist nicht bekannt, ob bzw. dass dieser Seltenen-Erden-freie Motorentyp bereits eingesetzt wird. (Schulze, Buchert 2016; Schulze 2016).

Für den Einsatz von Kupfer im E-Motor ist keine materielle Substitution bekannt.

### **Materielle Substitution der Batterie**

In der Batterie der Pedelecs werden Lithium, Mangan und Kupfer eingesetzt. Die Substitutionsmöglichkeiten der Batterieeinheit richten sich nach der Ausarbeitung zu UT Nr. 98 „Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge“.

Lithium wird als aktives Material in der Elektrode und im Elektrolyt verwendet. Es ist ein sehr leichtes Element und besitzt das negativste Normalpotential aller Elemente, so dass sehr hohe Zellspannungen und damit besonders hohe massespezifische Energiedichten erreicht werden können. Aufgrund dieser Eigenschaften kann Lithium in Li-Ionen-Akkus nicht vollständig substituiert werden. Es gibt jedoch verschiedene Technologievarianten, die sich in ihrem Lithiumbedarf unterscheiden. Die Angaben zum Lithiumgehalt reichen von 50 g Li/kWh bis zu 300 g Li/KWh (DERA 2016).

Kupfer wird als Stromleiter verwendet. Als Kupferersatz kommt Aluminium in Frage, es wird bereits eingesetzt. Aluminium weist zwar eine sehr viel geringere elektrische Leitfähigkeit auf, ist jedoch auch bedeutend leichter als Kupfer; dadurch lässt sich potenziell das Gewicht der Batterie senken, was insbesondere in der Elektromobilität von Bedeutung ist (Automotive IQ 2011; Lücke et al., 2013).

Mangan wird in der Batteriekathode eingesetzt. Zurzeit gibt es keine befriedigende Substitutionsmöglichkeit (EU 2016).

Für Pedelecs könnten auch Lithium-Cobalt-Oxide (LCO)-Speicher in Frage kommen. Für den Pkw-Bereich sind diese Batterietypen zu teuer, aber bei den Pedelecs denkbar.

#### **3.3.1.2 Technologische Substitution**

##### **Technologische Substitution der Motoren**

Als technologische Substitution wird am Einsatz von Reluktanzmotoren anstelle der Permanentmagnet-Motoren geforscht. Eine US Startup-Firma hat sich einen Reluktanzmotor patentieren lassen. Allerdings sind keine Informationen zu einem Einsatz im Pedelec-Markt bekannt. (Wang 2012; Yale Global Online 2012; Schulze 2016)

Eine Substitution des Permanentmagnet-Motors durch Kupferspulen oder anderen Motortypen mit erhöhtem Platzbedarf und höherem Gewicht ist für Pedelecs nicht erstrebenswert.

##### **Technologische Substitution der Batterie**

Auf technologischer Ebene können verschiedene Kombinationen aus Anoden-, Kathoden- und Elektrolytmaterial substitutiv zum Einsatz kommen. Alle Konzepte basieren auf der Grundlage einer Lithium-Verbindung, daher gibt es bis dato keine Möglichkeiten zur Substitution von Lithium, allenfalls ließe sich die Konzentration verringern. Batterien mit reduziertem Lithium-Einsatz sind bereits auf dem Markt vorhanden. Eine detailliertere Darstellung der Batterievarianten ist in der Ausarbeitung zu UT Nr. 98 „Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge“ gegeben.

### 3.3.1.3 Funktionale Substitution

#### Funktionale Substitution der Motoren

Es ist keine funktionale Substitution bekannt.

#### Funktionale Substitution der Batterie

In Bezug auf den funktionalen Ersatz kommen als Alternative zu Akkumulatoren Brennstoffzellen-Systeme in Frage. Diese erzeugen elektrische Energie mit Hilfe von Wasserstoff oder Methanol aus chemischer Energie. Diese Brennstoffzellen-Pedelects sind bereits in Pilotserie von Linde und Pragma Industries hergestellt. Pragma Industries hat ihre Serienproduktion des Modells „Alpha“ für 2016 angekündigt (Pragma Industries 2016). Diese Pedelect-Varianten besitzen eine Reichweite von 100km und können in wenigen Minuten geladen werden. (hzwei 2016; ingenieur.de 2016) Neben der Brennstoffzelle als Batterie wird weiterhin noch eine zusätzliche Li-Ionen Batterie benötigt. (Pragma Industries 2016)

Es gibt weitere Substitutionsmöglichkeiten wie z.B. High-Power-Blei-Säure-Batterien, NiMH-Akkumulatoren und Doppelschicht-Kondensatoren, die aber bisher keine wirkliche Alternative darstellen. Eine Einschätzung zu diesen Substitutionen wird in UT Nr. 98 (Li-Ionen-Batterie für Fahrzeuge) zu den PHEV gegeben.

In der folgenden Tabelle werden die materiellen, technologischen und funktionellen Substitutionsoptionen als Übersicht dargestellt.

Tabelle 3-8: Substitutionsansätze für die Pedelects (Motor und Batterie)

Substitutionsebenen	Ansätze Batterie	Ansätze Motor
Materialsubstitution	Kupfer durch Aluminium (Markt)	SEE-freie Motoren (Pilotstadium)
Technologische Substitution	Reduzierung Li-Einsatz (Markt)	Reluktanzmotor (Pilotstadium)
Funktionelle Substitution	Brennstoffzelle (Pilotstadium)	Nicht bekannt

### 3.3.1.4 Mögliche Effizienzverluste

Im folgenden Kapitel werden die Substitutionsalternativen miteinander und mit der untersuchten UT verglichen. In der folgenden Tabelle werden mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen dargestellt.

Tabelle 3-9: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die Pedelects (Motor und Batterie)

Substitutionsebenen	Effizienzverluste Batterie	Effizienzverluste Motor
<b>Materialsubstitution</b>		
Kupfer durch Aluminium	Geringere elektrische Leitfähigkeit	-
SEE-freie Motoren	-	Nicht bekannt
<b>Technologische Substitution</b>		
Reduzierung Li-Einsatz	Nicht bekannt	-



Reluktanzmotor	-	Nicht bekannt
<b>Funktionale Substitution</b>		
Brennstoffzelle	Nicht bekannt	-

### 3.3.1.5 Mögliche Restriktionen

Die Umsetzung der Substitutionsoptionen hängt wesentlich von technischen Fortschritten und der Kostenentwicklung ab. Beim Pedelec spielen die kompakte Bauform und das Gewicht eine entscheidende Rolle.

Tabelle 3-10: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die Pedelecs (Motor und Batterie)

Substitutionsebenen	Restriktionen Batterie	Restriktionen Motor
<b>Materialsstitution</b>		
Kupfer durch Aluminium	Keine bekannt	-
SEE-freie Motoren	-	Keine bekannt
<b>Technologische Substitution</b>		
Reduzierung Li-Einsatz	Keine bekannt	-
Reluktanzmotor	-	Keine bekannt
<b>Funktionale Substitution</b>		
Brennstoffzelle	Keine bekannt (evtl. Infrastruktur, da Batterien an jeder Steckdose geladen werden können); Derzeit der hohe Preis	-

### 3.3.1.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Die ökologischen Vorteile und Nachteile der Substitutionsalternativen der Pedelec-Motoren und Pedelec-Batterien werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-11: Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsalternativen für die Pedelecs (Motor und Batterie)

	Vorteile	Nachteile
<b>Materialsstitution</b>		
Kupfer durch Aluminium (Batterie)	Reduzierung der Umweltauswirkungen der Kupfergewinnung	Zusätzliche Umweltauswirkungen der Bauxitgewinnung
SEE-freie Motoren	Wegfall der Umweltauswirkungen der SEE-Gewinnung	Keine bekannt
<b>Technologische Substitution</b>		
Reduzierung Li-Einsatz (Batterie)	Reduzierung der Umweltauswirkungen der Li-Gewinnung (relativ geringere Umweltbelastung je spezifischer Einheit)	Keine bekannt
Reluktanzmotor	Vermeidung der Umweltauswirkungen	Keine bekannt



der SEE

**Funktionale Substitution**

Brennstoffzelle

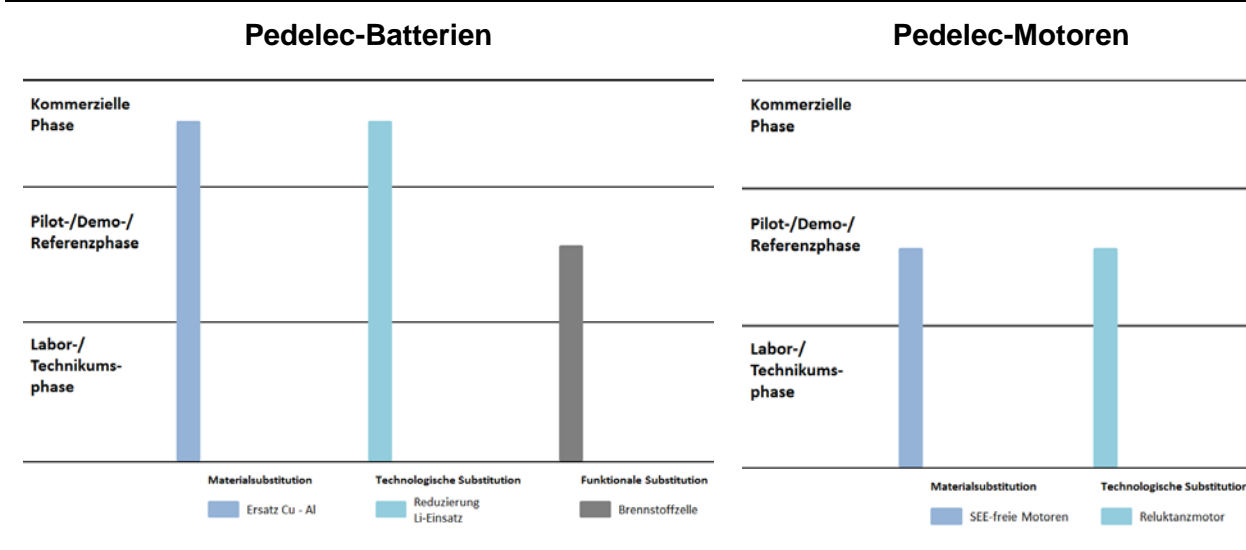
Geringerer Einsatz von Lithium  
(zusätzlich zur Brennstoffzelle wird ein  
Batterie benötigt)

Zusätzliche Umweltauswirkungen durch  
den Einsatz von Platin

**3.3.1.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen**

In der folgenden Abbildung wird der technologische Reifegrad der verschiedenen Substitutionsansätze für Pedelec-Batterien und Pedelec-Motoren dargestellt. Die Reifegrade werden unterschieden nach Laborphase, Pilotphase und kommerzieller Phase. Während bei der Batterie Substitutionsmöglichkeiten im Markt vorhanden sind, liegen die Substitutionsoptionen des Pedelec-Motors in der Pilotphase.

Abbildung 3.3: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Pedelec-Batterien und Pedelec-Motoren



Quelle: Eigene Zusammenstellung

**3.3.1.8 Fazit**

In den vergangenen Jahren wurde aufgrund der Preisvolatilität der Seltenen Erden und des Versorgungsrisikos viel in Forschung und Entwicklung bezüglich Verzicht bzw. Reduzierung an Seltenen Erden-Einsatz investiert. Nachdem die Preise in der jüngsten Zeit wieder gefallen sind und auch die Exportrestriktionen aufgehoben wurden, ist der Druck nach Substitutionsmöglichkeiten diesbezüglich geringer geworden. Auf Materialebene bestehen erste Möglichkeiten, auf Seltene Erden zu verzichten bzw. diese deutlich zu reduzieren. Das Potential dieser Technologien kann allerdings noch nicht abgeschätzt werden. Für die Pedelec-Motoren sind bisher keine Alternativen auf dem Markt verfügbar. Aufgrund des geringen Gewichts, einer kompakten Bauform, hoher Energieeffizienz und einer hohen Leistungsdichte wird bei den Pedelec-Motoren weiterhin auf die NdFeB-Magnete zurückgegriffen.

Für die Lithium-Ionen-Batterien sind einige Substitutionsmöglichkeiten sowohl auf der materiellen als auch der technologischen und funktionalen Ebene auf dem Markt verfügbar. Innerhalb der Li-Ionen-Batterien sind verschiedenen Zellchemien – auch mit reduziertem Li-Einsatz – möglich. Keiner dieser Optionen kann jedoch auf Lithium verzichten. Für die funktionale Substitution mit der Brennstoffzelle sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Auswirkungen der Substitutionsmöglichkeiten abzuschätzen. Beispielsweise sind bei der Brennstoffzelle Platin sowie eine zusätzliche Batterie

notwendig. Eine Marktdurchdringung der Brennstoffzelle wird aktuell durch hohe Preise verhindert und ist nur bei sinkenden Kosten denkbar.

### 3.3.1.9 Literatur

Automotive IQ 2011: The evolution from Copper to Aluminum. <https://automotiveiq.wordpress.com/2011/03/15/the-evolution-from-copper-to-aluminum-%E2%80%93-are-you-ready/>

Buchert et al. 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Gefördert durch das BMUB, Darmstadt, 2011 (<http://www.oeko.de/oekodoc/1340/2011-003-de.pdf>)

DERA 2016: Rohstoffe für Zukunftstechnologien, erarbeitet Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Hummen, T.; Erdmann, L.; Tercero Espinoza, L.; Angerer, G.; Marwede, M.; Benecke, S. Berlin. März 2016. (abrufbar unter: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie\\_Zukunftstechnologien-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3))

EU 2016: Materials Information system. Institute for energy and Transport (EIT). European Commission, 2016

Honkura, 2013: Y. Honkura: The Development of Dy-free MAGFINE and Its Applications to Motors (2013) <http://komag.org/2013winter/Yoshinobu%20Honkura.pdf>

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

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

Lücke et al. 2013: Vergleich von Werkstoffen auf Basis von Cu und Al sowie Trends bei deren Anwendung in der Elektroenergie-technik. Lücke, N.; Schlegel, S.; Großmann, S. in: METALL, 11/2013

Pragma Industries 2016: Pragma Industries Homepage – Light Mobility. Abgerufen am 11.10.2016 unter <http://www.pragma-industries.com/consumer-products/light-mobility/#>

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; September 2015 (nicht veröffentlicht)

Schulze, Buchert 2016; Schulze, R.; Buchert, M.: Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. In: Resources, Conservation and Recycling 113 (2016) 12-27.

Schulze 2016: Schulze, Rita: EREAN Blog E-Bikes and Rare Earths; abgerufen am 1.7.2016 unter <http://erean.eu/wordpress/e-bikes-and-rare-earths/>

Wang 2012: Wang, U., 2012. An electric motor that's ditched the rare earth materials: Gigaom Blog. <https://gigaom.com/2012/11/21/an-electric-motor-thats-ditched-the-rare-earth-materials/>

Yale Online 2012: Yale Global Online, 2012. No Rare Earths in Next Generation Electric Vehicles. <http://yaleglobal.yale.edu/content/no-rare-earths-next-generation-electric-vehicles>

### 3.3.2 Hybridmotoren (UT Nr. 37)

Hybridmotoren sind elektrische Antriebsmotoren für sogenannte Hybridfahrzeuge (HEV) wie z.B. der Toyota Prius. Antriebsmotoren für Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) und vollelektrische Antriebe (BEV) sind unter UT Nr. 38 (Elektroantriebsmotoren BEV und PHEV) abgedeckt. Ein HEV besitzt neben dem Elektroantriebsmotor auch einen konventionellen Verbrennungsmotor. Daher ist in einem HEV eine kompakte Bauform des E-Motors von hoher Bedeutung. In der Regel werden daher permanent erregte Synchronmotoren (PSM) mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten aufgrund ihres geringen Gewichts und Volumens bei hoher Leistungsdichte eingesetzt. (Buchert et al. 2011, Schüler et al. 2015)

Bei dieser Umwelttechnologie sind folgende 6 Rohstoffe als kritisch und relevant eingestuft (in alphabetischer Reihenfolge): Dysprosium (Dy), Gallium (Ga), Kupfer (Cu), Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Terbium (Tb)

### 3.3.2.1 Materielle Substitution

Als materielle Substitution der Seltenen Erden in einem Permanentmagnet (NdFeB) sind folgende Optionen denkbar:

- Der **Samarium-Kobalt-Permanentmagnet** (SmCo) kann Neodym und Dysprosium vollständig ersetzen und erzeugt eine bessere Stabilität bei hohen Temperaturen. SmCo-Permanentmagnete benötigen einen aufwändigen Herstellungsprozess und mit Kobalt ein anderes kritisches Metall. (Schüler et al. 2015) Weiterhin sind SmCo-Legierungen spröde und bruchanfällig (Buchert et al. 2014).
- **Substitution durch Cer und Kobalt:** Dieser Permanentmagnet kann Dysprosium und Neodym ersetzen und besitzt eine höhere Magnetstärke bei hohen Temperaturen. Diese Materials substitution befindet sich noch in einem sehr frühen F&E-Stadium. (Schüler et al. 2015)

Dysprosium könnte durch das Seltene Erden Element Terbium vollständig ersetzt werden, ohne an Leistungsfähigkeit zu verlieren (Schüler et al. 2015). Aufgrund des höheren Preises von Terbium und der gleichen Versorgungsrisiken wird hier nicht weiter auf die Alternative eingegangen.

Für Gallium sind keine Substitute bekannt. Der von Fachleuten erwartete Preisanstieg ist bisher nicht erkennbar. Die Preise sinken sogar, so dass die Galliumgewinnung aus der Bauxitverarbeitung teilweise eingestellt wird.

Für den Rohstoff Kupfer sind ebenfalls keine Substitute im Elektromotor bekannt.

### 3.3.2.2 Technologische Substitution

Erfolgreich wird an einem reduzierten Einsatz von Seltenen Erden (SEE) in Elektromotoren von HEV geforscht. Aufgrund der sehr hohen Kritikalität der schweren Seltenen Erden (HREE) (wie Dy, Tb) sind v.a. Dy-freie Permanentmagnet-Motoren im Fokus. (Schüler et al 2015) Aktuell hat der Nd-Magnet-Motor von Honda und Daido Steel Marktreife erreicht, der ohne den Einsatz von schweren Seltenen Erden (Dy oder Tb) produziert wird. (greencarcongress 2016)

Es wird an weiteren technologischen Substitutionen für HEV geforscht. Im Prototyp-Stadium zeigen sich folgende Optionen:

- **Asynchronmotor** (ASM)<sup>1</sup>: Der ASM ist frei von Seltenen Erden; er weist eine hohe Robustheit und hohe Zuverlässigkeit bei niedrigen Produktionskosten auf. Allerdings ist die Leistungsdichte niedriger als beim PSM und es bedarf eines größeren Bauraums sowie höheren Gewichts. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- Der **ASM mit hohen rpm** (Asynchronmotor mit hoher Drehzahl) ist ebenfalls frei von Seltenen Erden. Er hat Potential für hohe Energie- und Materialeffizienz sowie niedrige Produktionskosten. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- Der **Externally/Electrically excited synchronous Motor** (EESM) ist ebenfalls frei von Seltenen Erden und besitzt eine hohe Effizienz. Der größere Bauraumbedarf ist nachteilig sowie eine hohe Komplexität in der Struktur, die höhere Produktionskosten zur Folge haben. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- Der **PSM with low-cost magnets** (AlNiCo- und Ferrit-Magnete) ist ebenso frei von Seltenen Erden und besitzt Potential für eine allgemein gute Leistung. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

---

<sup>1</sup> Asynchronmotoren (ASM) werden auch als Induktionsmotoren („induction motor“) bezeichnet.

- Der **Switched reluctance motor** (SRM) ist ebenfalls frei von Seltenen Erden. Der Vorteil liegt in einer robusten Bauart und Potential für eine kostengünstige Motorenproduktion. Der hohe Geräuschpegel ist im Pkw-Bereich ein großer Nachteil. Der SRM benötigt außerdem einen speziellen Inverter, der nicht kompatibel mit anderen Produktionslinien der Leistungselektronik für Motoren ist und ist daher kostenaufwändig. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

Im frühen F&E-Stadium befinden sich Technologien wie z.B. der Seltene-Erden-freie Transversal Flux Motor (TFM). (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

### 3.3.2.3 Funktionale Substitution

Es sind keine funktionalen Substitutionen bekannt.

### 3.3.2.4 Übersicht über die Substitutionsansätze

In der folgenden Tabelle werden die materiellen und technologischen Substitutionsoptionen als Übersicht dargestellt.

Tabelle 3-12: Substitutionsansätze für HEV

Substitutionsebenen	Ansätze HEV
Materialsstitution	SmCo-Magnete (theoretisch) Ce und Co für Nd und Dy (F&E)
Technologische Substitution	ASM (Prototyp) ASM mit hoher rpm (Prototyp) EESM (Prototyp) PM mit sonstigem Magnet (Prototyp) SRM (Prototyp) TFM (F&E) HREE-freier Nd-Magnet (Markt)

### 3.3.2.5 Mögliche Effizienzverluste

Die verschiedenen Substitutionsalternativen weisen Effizienzverluste oder andere Leistungseinbußen auf. Diese sind in folgender Tabelle als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 3-13: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die HEV

Substitutionsebenen	Effizienzverluste / Leistungsverluste
<b>Materialsstitution</b>	
SmCo-Magnete	Niedrigere Leistung
Ce und Co für Nd und Dy	Nicht bekannt – Technologie in Forschungsstadium
<b>Technologische Substitution</b>	
HREE-frei	Sehr neu im Markt – noch nicht bekannt
ASM	Niedrigere Effizienz als PSM in Stadtgebieten Niedrigere Leistungsdichte als beim PSM
ASM mit hoher rpm	Nicht bekannt
EESM	Niedrigere Leistungsdichte Geringfügig niedrigere Effizienz bei geringer Geschwindigkeit (da mehr Leistungselektronik benötigt wird)
PM mit sonstigem Magnet	Deutlich niedrigere Effizienz (Forschungsstand)

Substitutionsebenen	Effizienzverluste / Leistungsverluste
SRM	Nicht bekannt – Technologie in Forschungsstadium
TFM	Nicht bekannt – Technologie in Forschungsstadium

Ein ausführlicher Vergleich der durchschnittlichen Effizienz von PSM (permanent erregter Synchronmotor), ASM und EESM ist im Kapitel zu UT 38 (Elektroantriebsmotoren) enthalten.

### 3.3.2.6 Mögliche Restriktionen

Im Allgemeinen können Restriktionen durch die Konkurrenz zu anderen Produkten entstehen sowie durch einen beschränkten Zugang zu den Primärrohstoffen. Als Beispiel sind hier die Ausfuhrbeschränkungen der Seltenen Erden aus China zu nennen, die bis 2015 anhielten. Im Vergleich zu den vollelektrischen E-Fahrzeugen sind der Platzbedarf und das Gewicht beim HEV von großer Bedeutung, da hier neben dem Elektromotor auch ein konventioneller Verbrennungsmotor eingebaut ist.

Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-14: Mögliche Restriktionen für die Substitutionsalternativen für die HEV

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
SmCo-Magnete	Kobalt ist ebenfalls ein kritischer Rohstoff, Samarium ebenfalls SEE Preis von Samarium könnte deutlich steigen (deutlich geringere primäre Jahresproduktion als Neodym); geringere Leistungsdichte SmCo-Legierungen sind spröde und bruchanfällig (Buchert et al., 2014)
Ce und Co für Nd und Dy	Kobalt ist ebenfalls ein kritischer Rohstoff; befindet sich erst im Forschungsstadium
<b>Technologische Substitution</b>	
HREE-freie PM-Motoren	Keine bekannt
ASM	Zusätzlicher Einsatz von Kupfer und Aluminium notwendig Größere Bauform notwendig Höheres Gewicht Niedrigere Leistungsdichte
ASM mit hoher rpm	Hohe Anforderung an Komponenten für hohe rpm (Rotorstabilität)
EESM	Größere Bauform notwendig Höhere Kosten (Hohe Komplexität in der Struktur – hohe Produktionskosten, benötigt mehr Wartung)
PM mit sonstigem Magnet	Niedrigere Magnetstärke Befindet sich noch im Prototyp-Stadium
SRM	Kosten (Spezieller Inverter benötigt: aufwändig)
TFM	Nicht bekannt – noch im frühen F&E-Stadium

### 3.3.2.7 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Die ökologischen Vorteile und Nachteile der Substitutionsalternativen der Motoren in Hybridfahrzeugen werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

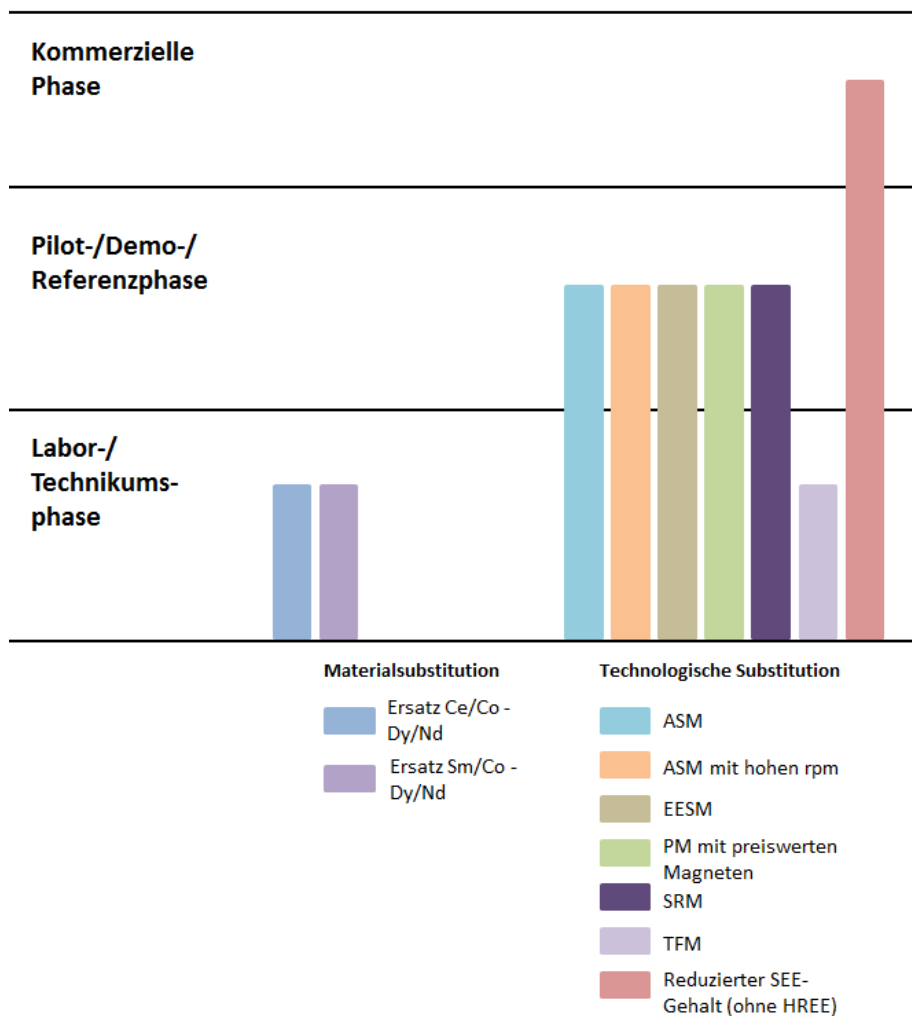
Tabelle 3-15: Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten für die HEV

	Ökologische Vorteile	Ökologische Nachteile
<b>Materialsstitution</b>		
Cer Kobalt	Vollständige Substitution von Neodym und Dysprosium	Weiterhin aufwändige SEE-Kette Kobalt ist kritisches Metall
SmCo	Substitution von Neodym und Dysprosium	Weiterhin aufwändige SEE-Kette Kobalt ist weiteres kritisches Metall
<b>Technologische Substitution</b>		
Reduzierter SEE-Gehalt (HREE-frei)	Substitution von schweren Seltenen Erden Relativ geringere Umweltbelastungen pro spezifischer Einheit aufgrund geringerem SEE-Bedarf	Nicht bekannt
ASM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette Hohe Effizienz bei hoher Geschwindigkeit	Niedrigere Effizienz als PSM in Stadtgebieten Deutlich zusätzlicher Einsatz von Kupfer und Aluminium notwendig: entsprechend höhere Belastung in der Primärroute
EESM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Elektrischer Wirkungsgradverlust aufgrund zusätzlich notwendiger Leistungselektronik Niedrigere Leistungsdichte Zusätzlicher Einsatz von Kupfer
ASM with high rpm	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Bisher keine Erfahrungen aus der Serienproduktion
PSM with low-cost magnets	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Bisher keine Erfahrungen aus der Serienproduktion
SRM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Hoher Geräuschpegel
TFM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette Potential für hohe Leistungsdichte und Effizienz	Frühes F&E-Stadium (nicht bekannt)

### 3.3.2.8 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Der derzeitige Entwicklungsstand der verschiedenen Substitutionsalternativen ist in folgender Abbildung dargestellt. Es wird dabei unterschieden nach F&E/Labor-Phase, Pilot-/Prototyp-Phase und Kommerzielle Phase.

Abbildung 3.4: Technologiereife der Substitutionsoptionen für HEV



Quelle: Eigene Zusammenstellung

Im Allgemeinen dauert die Entwicklung eines neuen Motors ca. 3 Jahre; bis zur Serienproduktion sind es etwa 5 Jahre. Technologiesprünge sind v.a. in der Technologischen Substitution von ASM mit hohem rpm und bei Permanentmagneten mit sonstigen Magneten zu erwarten.

### 3.3.2.9 Fazit

Für die Substitution des Einsatzes der Seltenen Erden in den Permanentmagneten der HEV-Elektromotoren sind bereits viele Anstrengungen in F&E vorgenommen worden. Nach dem derzeitigen Stand ist eine reine Materials substitution in den nächsten Jahren nicht absehbar. Erste Erfolge wurden im Einsatz von Nd-Magneten ohne schwere Seltene Erden erzielt. Der reduzierte SEE-Gehalt wird auch von Fachleuten als vielversprechendste Substitutionsalternative gesehen.

Der HEV ist in der Langfristperspektive eine Übergangstechnologie hin zum vollelektrischen Pkw.

### 3.3.2.10 Literatur

Buchert et al. 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Gefördert durch das BMUB, Darmstadt, 2011 (<http://www.oeko.de/oekodoc/1340/2011-003-de.pdf>)

Buchert et al. 2014: Buchert, M.; Manhart, A.; Sutter, J.: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industrielle Einsatz in Baden-Württemberg. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Januar 2014 (<http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>)

Doppelbauer 2015: Doppelbauer, Martin: Elektrische Fahrtriebe, Antriebssysteme. Professur für Hybridelektrische Fahrzeuge, Elektronisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Frühjahr 2015

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

Pavel et al. 2016: Pavel, C.; Tiel, C.; Degreif, S.; Blagoeva, D.; Buchert, M.; Schüler, D.; Tzimas, E: Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications (noch nicht veröffentlicht)

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; September 2015 (nicht veröffentlicht)

### 3.3.3 Elektroantriebsmotoren BEV und PHEV (UT Nr. 38)

Unter dieser Umwelttechnologie sind Elektroantriebsmotoren für vollelektrische PKW (BEV), Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sowie für Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) zusammengefasst. Letztere verfügen neben einem Verbrennungsmotor über einen Elektromotor, der von einer Batterie mit Ladenschluss („Plug-in“) gespeist wird. Diese Umwelttechnologie fokussiert auf permanent erregte Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten (PSM) (Buchert et al. 2011, Schüler et al. 2015). Dies ist der Standard-Motortyp aufgrund seines geringen Gewichts und geringen Volumens bei hoher Leistungsdichte.

Bei dieser Umwelttechnologie sind folgende 6 Rohstoffe als kritisch und relevant eingestuft (in alphabetischer Reihenfolge): Dysprosium (Dy), Gallium (Ga), Kupfer (Cu), Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Terbium (Tb)

#### 3.3.3.1 Materielle Substitution

Als materielle Substitution der Seltenen Erden in einem Permanentmagnet (NdFeB) sind folgende Optionen zu nennen, die sich noch im Forschungsstadium befinden:

- Der **Samarium-Kobalt-Permanentmagnet** (SmCo) kann Neodym und Dysprosium vollständig ersetzen und erzeugt eine bessere Stabilität bei hohen Temperaturen. SmCo-Permanentmagnete benötigen einen aufwändigen Herstellungsprozess und mit Kobalt ein anderes kritisches Metall. (Schüler et al. 2015) Weiterhin sind SmCo-Legierungen spröde und bruchanfällig (Buchert et al. 2014).
- **Substitution durch Cer und Kobalt:** Dieser Permanentmagnet kann Dysprosium und Neodym ersetzen und besitzt eine höhere Magnetstärke bei hohen Temperaturen. Diese Materialsubstitution befindet sich noch in einem sehr frühen F&E-Stadium. (Schüler et al. 2015)

Dysprosium könnte durch das Seltene Erden Element Terbium vollständig ersetzt werden, ohne an Leistungsfähigkeit zu verlieren (Schüler et al. 2015). Aufgrund des höheren Preises von Terbium und der gleichen Versorgungsrisiken wird hier nicht weiter auf die Alternative eingegangen.

Für Gallium sind keine Substitute bekannt. Der von Fachleuten erwartete Preisanstieg ist bisher nicht erkennbar. Die Preise sinken sogar, so dass die Galliumgewinnung aus der Bauxitverarbeitung teilweise eingestellt wird. Für den Rohstoff Kupfer sind ebenfalls keine Substitute im Elektromotor bekannt.



### 3.3.3.2 Technologische Substitution

Des Weiteren wird an einem **reduzierten Einsatz von Seltenen Erden** (SEE) geforscht und dies auch bereits auf dem Markt umgesetzt. Ein geringerer SEE-Gehalt (mit Einsatz von Dy) in den Permanentmagnetmotoren wird bereits bei den Motoren im BMW BEV i3 und BMW PHEV 7 eingesetzt.<sup>2</sup> Aufgrund der sehr hohen Kritikalität von Dysprosium wird v. a. an Dy-freien Permanentmagnet-Motoren geforscht. (Schüler et al 2015)

#### PHEV

Der hybride Ansatz von reduziertem Einsatz Seltener Erden im Permanentmagnet-Motor mit synchronem Reluktanzprinzip wird beim BMW PHEV 7 bereits eingesetzt. Weitere technologische Substitutionen für den Elektromotor mit NdFeB-Magneten sind nicht auf dem Markt bekannt. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

Im Prototyp-Stadium zeigen sich folgende Optionen:

- ▶ **Asynchronmotor** (ASM): Der ASM ist frei von Seltenen Erden und weist eine hohe Robustheit und hohe Zuverlässigkeit bei niedrigen Produktionskosten auf. Allerdings ist die Leistungsdichte niedriger als beim PSM und es bedarf eines größeren Bauraums sowie höheren Gewichts. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Der **ASM mit hohen rpm** (Asynchronmotor mit hoher Drehzahl) ist ebenfalls frei von Seltenen Erden. Er hat Potential für hohe Energie- und Materialeffizienz sowie niedrige Produktionskosten. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Der **Externally / Electrically excited synchronous Motor** (EESM) ist ebenfalls frei von Seltenen Erden und besitzt eine hohe Effizienz. Der größere Bauraumbedarf ist bei einer kompakten Bauform nachteilig wie auch die hohe Komplexität in der Struktur, was höhere Produktionskosten zur Folge hat. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Der **Permanentmagnet mit sonstigen Magneten** (AlNiCo- und Ferrit-Magnete) ist ebenso frei von Seltenen Erden und besitzt Potential für eine allgemein gute Leistung. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Der **Reluktanzmotor** (SRM = Switched reluctance motor) ist ebenso frei von Seltenen Erden. Der Vorteil liegt in einer robusten Bauart und Potential für eine kostengünstige Motorenproduktion. Der hohe Geräuschpegel ist im Pkw-Bereich ein großer Nachteil. Der SRM benötigt außerdem einen speziellen Inverter, der nicht kompatibel mit anderen Produktionslinien der Leistungselektronik für Motoren ist und ist daher kostenaufwändig. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

Im F&E-Stadium befinden sich Technologien wie z.B. der Seltene-Erden-freie Transversal Flux Motor (TFM). Der TFM befindet sich aber noch in einem frühen F&E-Stadium. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

#### BEV

Für den vollelektrischen Antrieb (BEV) sind folgende Substitutionen zum Permanentmagnet-Motor bereits in Serienproduktion auf dem Markt:

---

<sup>2</sup> Hier werden hybride Ansätze gewählt, bei denen sowohl Permanentmagnete eingesetzt werden (allerdings in deutlich geringerem Umfang von 30-50%) als auch synchrone Reluktanzprinzipien (Schüler et al. 2015, Pavel et al. 2016)

- ▶ Der **Asynchronmotor** (ASM)<sup>3</sup> ist frei von Seltenen Erden und wird bereits z.B. im Tesla S eingesetzt. Er weist eine hohe Robustheit und hohe Zuverlässigkeit bei niedrigen Produktionskosten auf. Allerdings ist die Leistungsdichte niedriger als beim PSM und es bedarf eines größeren Bauraums sowie höheren Gewichts (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Der **Electrically/Externally excited Synchronmotor** (EESM) ist ebenfalls frei von Seltenen Erden und wird z.B. im Renault Zoe eingesetzt. Er besitzt eine hohe Effizienz. Der größere Bau- raumbedarf ist im Vergleich zum PHEV von nicht so großer Bedeutung. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Ebenso wird der hybride Ansatz von **reduziertem Einsatz Seltener Erden** im Permanentmagnet-Motor mit synchronem Reluktanzprinzip beim BMW BEV i3 bereits eingesetzt. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

Folgende Substitutionsoptionen befinden sich im Prototyp-Stadium für den BEV:

- ▶ Der **ASM mit hohen rpm** (Asynchronmotor mit hoher Drehzahl) ist bereits in Planung für eine Serienproduktion. Er ist ebenfalls frei von Seltenen Erden und besitzt Potential für eine hohe Energie- und Materialeffizienz sowie niedrige Produktionskosten. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Der Permanentmagnetmotor mit **sonstigen Magneten** (AlNiCo- und Ferrit-Magnete) ist ebenso frei von Seltenen Erden und besitzt Potential für eine allgemein gute Leistung. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)
- ▶ Der **Reluktanzmotor** (SRM = switched reluctance motor) ist ebenso frei von Seltenen Erden. Der Vorteil liegt in einer robusten Bauart und Potential für eine kostengünstige Motorenproduktion. Der hohe Geräuschpegel ist im Pkw-Bereich ein großer Nachteil. Der SRM benötigt außerdem einen speziellen Inverter, der nicht kompatibel mit anderen Produktionslinien der Leistungselektronik für Motoren ist und ist daher kostenaufwändig. (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

Im F&E-Stadium befinden sich Technologien wie z.B. der SEE-freie Transversal Flux Motor (TFM). (Schüler et al. 2015; Pavel et al. 2016)

### 3.3.3.3 Funktionale Substitution

Es sind keine funktionalen Substitutionen bekannt.

### 3.3.3.4 Übersicht über die Substitutionsansätze

In der folgenden Tabelle werden die materiellen und technologischen Substitutionsoptionen als Übersicht dargestellt.

Tabelle 3-16: Substitutionsansätze für BEV und PHEV

Substitutions- ebenen	Ansätze BEV	Ansätze PHEV
<b>Material- substitution</b>	SmCo-Magnete (F&E) Ce und Co für Nd und Dy (F&E)	SmCo-Magnete (F&E) Ce und Co für Nd und Dy (F&E)
<b>Technologische Substitution</b>	Reduzierung SEE-Gehalt (Markt) ASM (Markt) ASM mit hoher rpm (Prototyp) EESM (Markt)	Reduzierung SEE-Gehalt (Markt) ASM (Prototyp) ASM mit hoher rpm (Prototyp) EESM (Prototyp)

<sup>3</sup> Asynchronmotoren (ASM) werden auch als Induktionsmotoren („induction motor“) bezeichnet.

Substitutions- ebenen	Ansätze BEV	Ansätze PHEV
	PM mit sonstigem Magnet (Prototyp) SRM (Prototyp) TFM (F&E)	PM mit sonstigem Magnet (Prototyp) SRM (Prototyp) TFM (F&E)

### 3.3.3.5 Mögliche Effizienzverluste

Die verschiedenen Substitutionsalternativen weisen Effizienzverluste oder andere Leistungseinbußen auf.

Tabelle 3-17: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für BEV und PHEV

Substitutionsebenen	Effizienzverluste / Leistungsverluste
<b>Materialsubstitution</b>	
SmCo-Magnete	Niedrigere Leistung
Ce und Co für Nd und Dy	Nicht bekannt – Technologie in Forschungsstadium
<b>Technologische Substitution</b>	
Reduzierter SEE-Gehalt	Nicht bekannt
ASM	Niedrigere Effizienz als PSM in Stadtgebieten Niedrigere Leistungsdichte als beim PSM
ASM mit hoher rpm	Nicht bekannt
EESM	Niedrigere Leistungsdichte Geringfügig niedrigere Effizienz bei geringer Geschwindigkeit (da mehr Leistungselektronik benötigt wird)
PM mit sonstigem (SEE-freien) Magnet	Deutlich niedrigere Effizienz (Forschungsstand)
SRM	Nicht bekannt – Technologie in Forschungsstadium
TFM	Nicht bekannt – Technologie in Forschungsstadium

Einen Vergleich der vielversprechendsten Motorentypen PSM (permanent erregter Synchronmotor), EESM und ASM hat Doppelbauer (2015) in den unterschiedlichen Fahrleistungen zusammengestellt. Dabei ergibt sich kein eindeutiges Bild, welcher Motorentyp in allen Fahrleistungen am effizientesten ist. Der EESM besitzt die höchste Effizienz bei hoher Geschwindigkeit. Der PSM zeigt dagegen bei geringer und mittlerer Geschwindigkeit die höchste Effizienz während der ASM in allen Fahrbereichen eine gute Effizienz aufweist.

Tabelle 3-18: Vergleich der durchschnittlichen Effizienz von PSM, ASM und EESM

Common Artemis Driving Cycle (CADC)	$\eta_{\text{total, PSM}}$	$\eta_{\text{total, EESM}}$	$\eta_{\text{total, ASM}}$
Urban	96,0	94,8	92,2
Road	93,6	96,3	95,4
Motor 130	84,6	96,2	95,7

Quelle: Doppelbauer 2015

### 3.3.3.6 Mögliche Restriktionen

Im Allgemeinen können Restriktionen durch die Konkurrenz zu anderen Produkten entstehen sowie durch einen beschränkten Zugang zu den Primärrohstoffen. Als Beispiel sind hier die Ausfuhrbeschränkungen der Seltenen Erden aus China zu nennen, die bis 2015 anhielten. Des Weiteren sind Platzmangel und Gewicht bei E-Fahrzeugen von besonderer Bedeutung. Die Restriktionen der Substitutionsalternativen aus technologischer Sicht sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-19: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für BEV und PHEV

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsubstitution</b>	
SmCo-Magnete	Kobalt ist ebenfalls ein kritischer Rohstoff, Samarium ebenfalls SEE; Preis von Samarium könnte deutlich steigen (deutlich geringere primäre Jahresproduktion als Neodym) SmCo-Legierungen sind spröde und bruchanfällig (Buchert et al., 2014)
Ce und Co für Nd und Dy	Kobalt ist ebenfalls ein kritischer Rohstoff; befindet sich erst im Forschungsstadium
<b>Technologische Substitution</b>	
Reduzierter SEE-Gehalt	Benötigt weiterhin Seltene Erden
ASM	Zusätzlicher Einsatz von Kupfer und Aluminium notwendig Größere Bauform notwendig Höheres Gewicht Niedrigere Leistungsdichte
ASM mit hoher rpm	Hohe Anforderung an Komponenten für hohe rpm (Rotorstabilität)
EESM	Größere Bauform notwendig Kosten (hohe Komplexität in der Struktur – hohe Produktionskosten, benötigt mehr Wartung)
PM mit sonstigem Magnet	Niedrigere Magnetstärke Befindet sich noch im Prototyp-Stadium
SRM	Kosten (Spezieller Inverter benötigt: aufwändig)
TFM	Nicht bekannt – noch im frühen F&E-Stadium

### 3.3.3.7 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

In der folgenden Tabelle werden die ökologischen Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten dargestellt.

Tabelle 3-20: Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten für BEV und PHEV

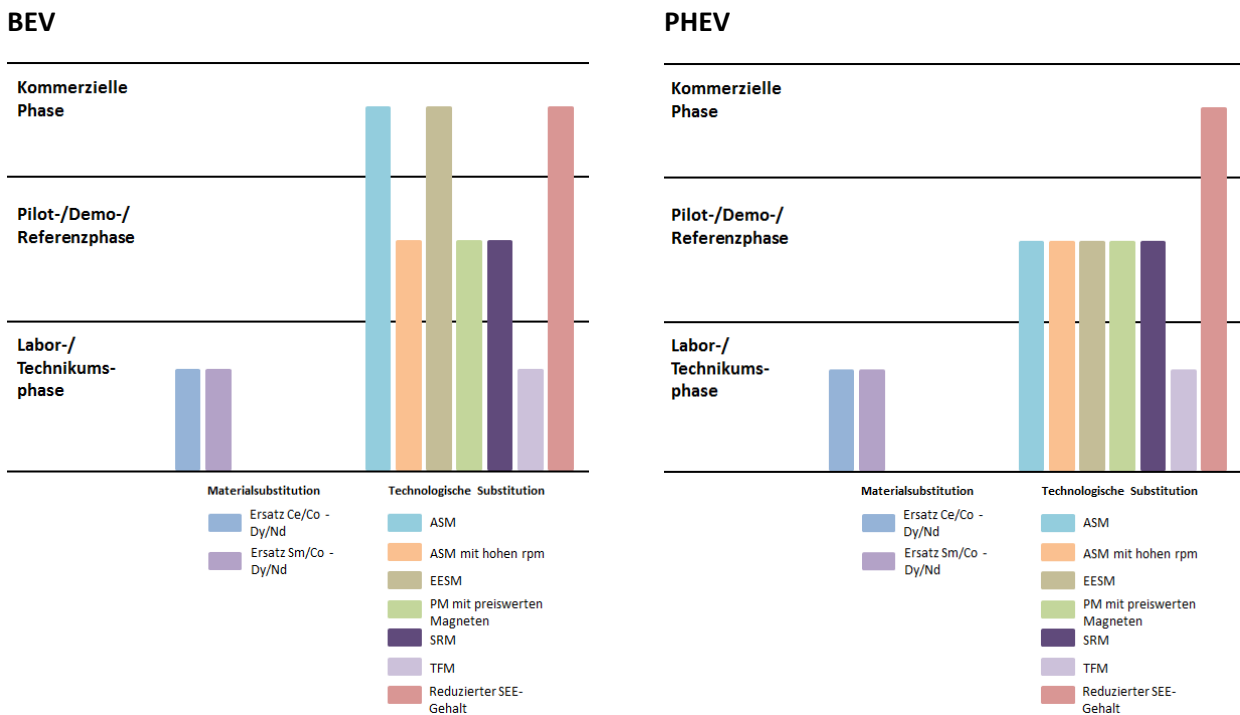
	Ökologische Vorteile	Ökologische Nachteile
<b>Materialsubstitution</b>		
Cer Kobalt	Vollständige Substitution von Neodym und Dysprosium	Weiterhin aufwändige SEE-Kette Kobalt ist weiteres kritisches Metall
SmCo	Substitution von Neodym und Dysprosium	Weiterhin aufwändige SEE-Kette Kobalt ist weiteres kritisches Metall

	Ökologische Vorteile	Ökologische Nachteile
<b>Technologische Substitution</b>		
Reduzierung SEE-Gehalt beim Permanentmagnet (NdFeB)	Relativ geringere Umweltbelastungen pro spezifischer Einheit aufgrund geringerem SE-Bedarf	Nicht bekannt
ASM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette Hohe Effizienz bei hoher Geschwindigkeit	Niedrigere Effizienz als PSM in Stadtgebieten Deutlich zusätzlicher Einsatz von Kupfer und Aluminium notwendig: entsprechend höhere Belastung in der Primärroute
EESM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Elektrischer Wirkungsgradverlust aufgrund zusätzlich notwendiger Leistungselektronik Niedrigere Leistungsdichte Zusätzlicher Einsatz von Kupfer
ASM with high rpm	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Bisher keine Erfahrungen aus der Serienproduktion
PSM with low-cost magnets	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Bisher keine Erfahrungen aus der Serienproduktion
SRM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Hoher Geräuschpegel
TFM	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette Potential für hohe Leistungsdichte und Effizienz	Frühes F&E-Stadium (nicht bekannt)

### 3.3.3.8 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Der derzeitige Entwicklungsstand der verschiedenen Substitutionsalternativen ist in folgender Abbildung dargestellt. Es wird dabei unterschieden nach F&E/Labor-Phase, Pilot-/Prototyp-Phase und Kommerzielle Phase.

Abbildung 3.5: Der derzeitige Entwicklungsstand der verschiedenen Substitutionsalternativen



Quelle: Eigene Zusammenstellung

Im Allgemeinen dauert es ca. 3 Jahre bis ein neuer Motor entwickelt wird. Bis zur Serienproduktion sind es etwa 5 Jahre. Technologiesprünge sind v.a. in der Technologischen Substitution von ASM mit hohen rpm und bei Permanentmagneten mit sonstigen Magneten (AlNiCo, Ferrit) zu erwarten.

### 3.3.3.9 Fazit

Für die Substitution des Einsatzes der Seltenen Erden in den Permanentmagneten der Elektromotoren sind bereits viele Anstrengungen in F&E vorgenommen worden. Nach dem derzeitigen Stand ist eine reine Materialsubstitution in den nächsten Jahren nicht absehbar. Eine reine Mengenreduzierung des SEE-Gehaltes (SEE-Gehalt absolut) ist bereits im vollelektrischen (BEV) und im Plug-in-Hybrid-Pkw (PHEV) realisiert z.B. im BMW i3 und PHEV 7.

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

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

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

Die Forschung nach Substitutionsmöglichkeiten für den Einsatz von Seltenen Erden wurde v.a. aufgrund der kurzfristig rasant gestiegenen Preise in 2010 und Exportrestriktionen aus China an-

getrieben. Nachdem die Preise in der jüngsten Zeit wieder gefallen sind und auch die Exportrestriktionen aufgehoben wurden, ist der Druck nach Substitutionsmöglichkeiten geringer geworden.

### 3.3.3.10 Literatur

Buchert et al. 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektro-mobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungs-potenziale von Elektrofahrzeugen. Gefördert durch das BMUB, Darmstadt, 2011 (<http://www.oeko.de/oekodoc/1340/2011-003-de.pdf>)

Buchert et al. 2014: Buchert, M.; Manhart, A.; Sutter, J.: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industrielle Einsatz in Baden-Württemberg. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Januar 2014 (<http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>)

Doppelbauer 2015: Doppelbauer, Martin: Elektrische Fährantriebe, Antriebssysteme. Professur für Hybridelektrische Fahrzeuge, Elektronisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Frühjahr 2015

Pavel et al. 2016: Pavel, C.; Tiel, C.; Degreif, S.; Blagoeva, D.; Buchert, M.; Schüler, D.; Tzimas, E: Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications (noch nicht veröffentlicht)

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; September 2015 (nicht veröffentlicht)

### 3.3.4 Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen (UT Nr. 60)

Diese Umwelttechnologie umfasst Hochleistungs-Permanentmagnete (im Wesentlichen NeodymEisenBorMagnete), 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 ausgenommen. Synchronmotoren mit Permanentmagneten zeichnen sich durch sehr hohe elektrische Wirkungsgrade aus und weisen daher eine entsprechende Marktdynamik auf.

Bei dieser Umwelttechnologie sind folgende fünf Rohstoffe als kritisch und relevant eingestuft (in alphabetischer Reihenfolge): Dysprosium (Dy), Kupfer (Cu), Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Terbium (Tb).

#### 3.3.4.1 Materielle Substitution

Eine materielle Substitution der NdFeB-Magnete sind Samarium-Kobalt-Dauermagnete (SmCo). Die Dauermagnetmotoren werden auch als permanenterregte Synchronmaschinen bezeichnet. Die SmCo Dauermagnete sind bereits auf dem Markt etabliert. Es handelt sich hierbei um die Ursprungstechnologie (1. Technologie), die heute in Nischenanwendungen noch eingesetzt wird.

Im Allgemeinen wird an der Reduzierung des Einsatzes von Seltenen Erden und speziell von Dysprosium aufgrund des besonders hohen Preises und der Kritikalität in den Permanentmagneten geforscht. (Buchert et al. 2014)

Praseodym kann Neodym bis zu einem Mischverhältnis (3 Nd: 1Pr) ohne Qualitätseinbußen ersetzen. Dysprosium, welches für die Temperaturstabilität von besonderer Bedeutung ist, könnte durch das Seltenerdelement Terbium vollständig ersetzt werden, ohne an Leistungsfähigkeit zu verlieren. Aufgrund des höheren Preises von Terbium und der gleichen Versorgungsrisiken wird hier nicht weiter auf die Alternative eingegangen.

Für den Rohstoff Kupfer sind keine Substitute im Elektromotor bekannt.

### 3.3.4.2 Technologische Substitution

Für HL-Permanentmagnete im Industriebereich sind derzeit folgende technologische Substitutionen bekannt:

- ▶ Drehstrom-Asynchronmaschinen sind fremderregte Asynchronmaschinen ohne Seltene Erden, die aber einen erhöhten Kupferbedarf aufweisen (Buchert et al. 2014). Diese Technologie ist der Vorgänger zu den Hochleistungs-Permanentmagneten.
- ▶ Niederspannungsmotoren (z.B. Synchronreluktanzmotoren) benötigen keine Seltenen Erden (Buchert et al. 2014; KSB 2015).
- ▶ Ferrit-Magnete ohne Seltene Erden besitzen eine deutlich geringere Energiedichte. Daher kommt die Substitution nicht in Frage. (Buchert et al. 2014)

An einer Verbesserung der Materialeffizienz wird ebenfalls geforscht – z.B. an Dünnschicht-Magneten. Das Potential der Materialeffizienzsteigerung wird von Fachleuten auf 20-25 % bei verbesserter Herstellertechnologie geschätzt (SubSKrit 2016). Allerdings erschwert eine Reduzierung des eingesetzten Materials das Recycling der relevanten Rohstoffe.

### 3.3.4.3 Funktionale Substitution

Eine funktionale Substitutionsmöglichkeit ist nicht bekannt.

### 3.3.4.4 Übersicht über die Substitutionsansätze

In der folgenden Tabelle werden die materiellen und technologischen Substitutionsoptionen als Übersicht dargestellt.

Tabelle 3-21: Substitutionsansätze für HL-Permanentmagnete

Substitutionsebenen	Ansätze HL-Permanentmagnete
Materialsubstitution	SmCo-Magnete
Technologische Substitution	Drehstrom-Asynchronmotor Niedrigspannungsmotor (Synchronreluktanzmotor)

### 3.3.4.5 Mögliche Effizienzverluste

Die verschiedenen Substitutionsalternativen weisen allerdings Effizienzverluste oder andere Leistungseinbußen auf.

Tabelle 3-22: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionen für HL-Permanentmagnete

Substitutionsebenen	Effizienzverluste / Leistungsverluste
<b>Materialsubstitution</b>	
SmCo-Magnete	Niedrigere Leistung
<b>Technologische Substitution</b>	
Drehstrom-Asynchronmotor	Niedrigere Effizienz Niedrigere Leistungsdichte
Niedrigspannungsmotor (Synchronreluktanzmotor)	Niedrigere Leistungsdichte



### 3.3.4.6 Mögliche Restriktionen

Neben der Konkurrenz zu anderen Produkten ist auch der Zugang zu den Rohstoffen (in diesem Fall bei Seltenen Erden aus China) von besonderer Bedeutung. Die Restriktionen der Substitutionsalternativen sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-23: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für HL-Permanentmagnete

Substitutionsebenen	Effizienzverluste / Leistungsverluste
<b>Materialsstitution</b>	
SmCo-Magnete	Kobalt ebenfalls kritischer Rohstoff, Samarium ebenfalls SEE. Preis von Samarium könnte deutlich steigen (deutlich geringere primäre Jahresproduktion als Nd); niedrigere Leistungsdichte; SmCo-Legierungen sind spröde und bruchanfällig (Buchert et al. 2014)
<b>Technologische Substitution</b>	
Drehstrom-Asynchronmotor	Zusätzlicher Einsatz von Kupfer Niedrigere Leistungsdichte
Niedrigspannungsmotor (Synchronreluktanzmotor)	Deutlich größeres Bauvolumen (50-100 % größer als PM) Geringere Überlastfähigkeit als der Permanentmagnet (PM) Spezieller Inverter benötigt, der nicht zu anderen Motoren passt. Kann daher nicht mit einem Netzanschluss betrieben werden. (Buchert et al 2014)

### 3.3.4.7 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

In der folgenden Tabelle sind ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten gegenüber der derzeitigen Technologie dargestellt.

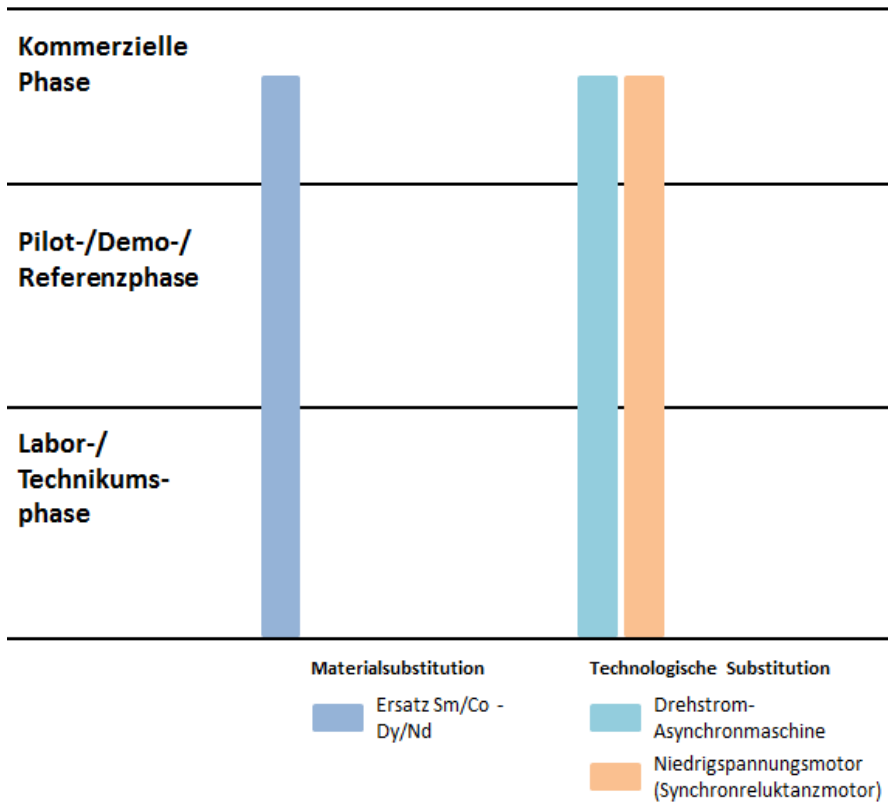
Tabelle 3-24: Ökologische Vor- und Nachteile der Substitutionsmöglichkeiten für HL-Permanentmagnete

Substitutionsebenen	Ökologische Vorteile	Ökologische Nachteile
<b>Materialsstitution</b>		
SmCo-Magnete	Substitution von Nd und Dy	Weiterhin aufwändige SEE-Kette Kobalt ist weiteres kritisches Metall
<b>Technologische Substitution</b>		
Drehstrom-Asynchronmotor	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette	Niedrigere Effizienz Zusätzlicher Einsatz von Kupfer notwendig: entsprechend höhere Belastung in der Primärroute
Niedrigspannungsmotor (Synchronreluktanzmotor)	Einsparung der Umweltbelastungen der SEE-Kette Hohe Effizienz in bestimmten Anwendungsbereichen	

### 3.3.4.8 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Der derzeitige Entwicklungsstand der verschiedenen Substitutionsalternativen ist in folgender Abbildung dargestellt. Es wird dabei unterschieden nach F&E-Stadium, Pilot-/Prototyp-Phase und Kommerzielle Phase.

Abbildung 3.6: Technologiereife der Substitutionsoptionen für HL Permanentmagnete



Quelle: Eigene Darstellung

Das Materialsubstitut mit SmCo wird nur in Nischenanwendungen eingesetzt. Allerdings ist ein Umstieg von NdFeB-Magneten auf SmCo-Magnete nicht sehr wahrscheinlich. Die SmCo-Legierungen sind sehr spröde und bruchanfällig. Daher erreichen sie nur einen deutlich geringeren Marktanteil. Der Drehstrom-Asynchronmotor ist die Technologie, die dem Permanentmagnet-Motor voranging und auch weiterhin in der Anwendung ist. Die Substitution durch Niederspannungsmotoren (Reluktanzmotoren) ist bereits im Markt etabliert beispielsweise durch den Hersteller KSB (KSB 2016). Allerdings ist der Reluktanzmotor nur in bestimmten Industrieanwendungen einsetzbar.

### 3.3.4.9 Fazit

Es sind Substitutionsoptionen für den HL-Permanentmagneten im Markt vorhanden. Hierunter fällt zum einen die Ursprungstechnologie des SmCo-Magneten. Diese Technologie stellt keine Second-Best-Technologie dar und wird nur noch in Nischenanwendungen eingesetzt. Der Drehstrom-Asynchronmotor ist ebenso eine Vorläufertechnologie, die aber eine Second-Best-Technologie darstellt. Die Entwicklung geht hier in Richtung Effizienzoptimierung, um eine Substitution ohne Effizienzverluste zu erreichen. Der Reluktanzmotor stellt eine Substitution dar, die allerdings nur in bestimmten Industrieanwendungen einsetzbar ist, die keine besondere Überlastfähigkeit oder begrenzten Bauraum benötigen.

An einer Verbesserung der Materialeffizienz wird ebenso geforscht. Fachleute schätzen das Potential der Materialeffizienzsteigerung auf 20-25 %, die allerdings das Recycling der relevanten Rohstoffe erschwert.

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

#### 3.3.4.10 Literatur

Buchert et al. 2014: Buchert, M.; Manhart, A.; Sutter, J.: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industrielle Einsatz in Baden-Württemberg. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Januar 2014 (<http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>)

KSB 2015: KSB Aktiengesellschaft: Pumpen, Antriebe und Systeme. Bedarfsgerecht Planen -

Auslegen – Regeln. 14.04.2015. abrufbar unter

[https://www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur/bvs/bv\\_karlsruhe\\_dateien/150414VDI\\_Karlsruhe-Planen-Auslegen-Regeln-Energieeffizienz.pdf](https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur/bvs/bv_karlsruhe_dateien/150414VDI_Karlsruhe-Planen-Auslegen-Regeln-Energieeffizienz.pdf)

KSB 2016: KSB Aktiengesellschaft: Die neue KSB SuPremE-Motorengeneration – die Energiediät für Ihre Anlage. (<https://www.ksb.com/supreme>)

SubSKrit 2016: Fachgespräch zum Projekt „Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen in Umwelttechnologien“ am 13.10.2016 in Berlin

### 3.3.5 Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 106)

Permanentmagnete (PMG) bestehen im Wesentlichen aus Eisenmetallen (Eisen, Cobalt, seltener Nickel) und Seltenen Erden (insbesondere Neodym, Samarium, Praseodym, Dysprosium, Terbium, Gadolinium, Yttrium). Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie gleichzeitig eine hohe magnetische Remanenzflussdichte und eine hohe magnetische Koerzitivfeldstärke und damit eine hohe magnetische Energiedichte aufweisen. Das am häufigsten zum Einsatz kommende Material für Permanentmagnete in Windkraftanlagen ist NdFeB, dem Dysprosium zugesetzt wird, um die Koerzitivfeldstärke und Temperaturbeständigkeit zu erhöhen. Der Bedarf an NdFeB-Magnetmaterial liegt laut BGR (2016) zwischen 0,2 bis 2,0 t/MW. In den Generatoren wird, wie in anderen Generatoren auch, Kupfer für die Stator-Wicklungen benötigt. Kupfer gilt als relativ unkritischer Rohstoff; zudem verwenden PMG weniger Kupfer als andere Generorentypen, da die Kupferwicklungen im Rotor durch Permanentmagnete ersetzt werden. Eine Substitution etwa durch Aluminium wäre technologisch denkbar, würde jedoch mit bedeutenden Wirkungsgradeinbußen einhergehen; zudem würden Aluminiumwicklungen einen größeren Bauraum bedingen, was sie für viele Anwendungen ausschließen würde. Daher wird diese Alternative praktisch nicht diskutiert.

Die momentan am intensivsten verfolgten Ansätze zur Reduzierung der Abhängigkeit von Seltenen Erden in Permanentmagneten ist die Entwicklung neuartiger mikrostruktureller Strategien, durch die sich der Einsatz Seltener Erden reduzieren lässt; in Zukunft sollen Nanokomposite den vollständigen Verzicht auf Seltene Erden ermöglichen. Zudem laufen Bemühungen, neue Materialien für Permanentmagnete zu finden.

Generell lassen sich Permanentmagnete recyceln. Ihre Eigenschaften können dabei über die Zugabe von Neumaterial gezielt an die neuen Anforderungen angepasst werden. Allerdings ist dies nicht ohne Qualitätsverlust möglich – der Remanenzverlust bei einer Zugabe von 30 % Recyclat liegt bei rund 3 %.

### 3.3.5.1 Materialsubstitution

Während für den Einsatz in der Elektromobilität schon Permanentmagnetmotoren verfügbar sind, die auf den Einsatz von Dysprosium verzichten (VDI 2013), ist dieses Ziel für Generatoren in Windkraftanlagen noch nicht erreicht. Bislang ist eine teilweise Substitution von Neodym durch Praseodym möglich. Dabei kann jedoch ein Verhältnis von Nd:Pr = 3:1 nicht unterschritten werden, da ansonsten die magnetischen Eigenschaften zu stark beeinträchtigt würden (Fraunhofer ISI, 2016). Daher soll es hier nicht weiter als Substitution betrachtet werden. Als Substitut kommt auch Terbium in Frage. Genau wie Dysprosium erhöht Terbium die Temperaturbeständigkeit, den Korrosionswiderstand und die Koerzitivfeldstärke der Magnete; darüber hinaus reduziert es (anders als Dysprosium) nicht ihre Remanenz. Sollten die Preise für Terbium zukünftig fallen, könnte es als Substitut zum Einsatz kommen (Fraunhofer ISI 2016).

Mittels Hochdurchsatz-Screening wird darüber hinaus nach neuen Materialien gesucht, deren magnetische Eigenschaften einen Einsatz in PMGs ermöglichen könnten (Fraunhofer ISI 2015). Aussichtsreich erscheinen mittelfristig FeCo- oder FeNi-basierte Materialien.

### 3.3.5.2 Technologische Substitution

Zahlreiche Forschungsprojekte zielen auf die Verringerung des Bedarfs an Seltenerdelementen, hier insbesondere Dysprosium, für NdFeB-Magnete durch neue produktionstechnische Verfahren. Dazu zählt das Metallpulverspritzguss-Verfahren (Net-Shape-Production), bei dem die Magnete unmittelbar in der erforderlichen Form produziert werden. Dadurch lassen sich Fertigungsabfälle beim Schleifen und Schneiden vermeiden. Ein materialwissenschaftlicher Ansatz ist die Dysprosium-Layer-Technologie. Hier wird Dysprosium gezielt an Korngrenzen konzentriert, so dass mit einer niedrigeren Gesamtmenge an Dysprosium gleiche Materialeigenschaften gewährleistet werden. Ein weiterer Ansatz ist das Grain Size-Tuning. Bei diesem Verfahren werden die Korngrößen des Magnetmaterials bis in den Nanobereich so optimiert, dass weniger Dysprosium bei gleichbleibenden Magneteigenschaften erforderlich ist (DERA 2016). Genau genommen stellen diese Ansätze keine Substitutionsmöglichkeit dar, sondern ermöglichen Verbesserungen der Materialeffizienz. Langfristig könnten Nanokomposite und Nanostrukturen, die die magnetische Anisotropie nutzen ohne Seltene Erden auskommen. Zum Einsatz kommen könnte beispielsweise Material auf Basis einer Eisen-Kobalt-Verbindung, in der nanometerkleine magnetische Stäbchen wie an einer Perlenschnur aufgereiht in einer Matrix fixiert sind (Elektronik Praxis 2015).

In einigen Anwendungsfällen lassen sich PMG durch fremderregte Generatoren substituieren. Dies wird mit niedrigeren Wirkungsgraden einhergehen, die allerdings durch ebenfalls niedrigere Investitionskosten dennoch einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen könnten. Die Nutzung fremderregter Generatoren führt jedoch zu größeren Gondeln, was für Anlagen mit sehr hohen Leistungen, insbesondere Offshore, ein Ausschlusskriterium darstellt.

Größere Erwartungen werden in Reluktanzgeneratoren und besonders High-Temperature-Superconducting (HTS) Generatoren gesetzt, in denen das Kupfer in den Läuferwicklungen teilweise durch keramische Hochtemperatursupraleiter ersetzt wird. HTS-Generatoren scheinen sehr gut geeignet für Anwendungen in hohen Leistungsbereichen und Offshore-Anwendungen, da sie Gondeln mit sehr hohen Wirkungsgraden bei kompakten Ausmaßen und geringem Gewicht ermöglichen. Im Vergleich zu einem permanenterregten Generator für eine 10-MW-Anlage können rund 50 % des Generatorgewichts eingespart werden (Wuppertal Institut, 2014). HTS-Generatoren sind eine vergleichsweise junge Technologielinie. Große Maschinen werden zwar getestet, jedoch ist noch nicht abzusehen, wann HTS-Generatoren in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen könnten (Expertengespräch 2016).

Die Entwicklung der keramischen Hochtemperatursupraleiter konzentriert sich auf Wismut-(Blei)-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxid ((Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+x</sub> kurz BSCCO). Für die Verwendung in

Windkraftanlagen scheint dieses Material jedoch nicht geeignet. Für diesen Anwendungsbereich könnten Yttrium-Barium-Kupferoxid-Gruppen ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  mit  $x < 0,6$ ) zum Einsatz kommen. Hier könnte Yttrium auch durch Neodym oder andere Seltenerdmetalle substituiert werden, was jedoch im Hinblick auf heutige Preise nicht zu erwarten ist.

### 3.3.5.3 Funktionale Substitution

Die Funktion des Generators in Windkraftkraftanlagen, nämlich die Umwandlung von rotatorischer Bewegungsenergie in elektrische Energie, ist grundlegend für den Betrieb. Die Funktion lässt sich nicht durch andere Praktiken erfüllen.

Tabelle 3-25: Substitutionsansätze für Permanentmagnet-Generatoren in WKA

Substitutionsebenen	Ansätze
<b>Materialsubstitution</b>	Dysprosium durch Terbium FeCo- oder FeNi-basierte Materialien
<b>Technologische Substitution</b>	Nanokomposite Nanostrukturen Fremderregte Generatoren HTS-Generatoren

### 3.3.5.4 Mögliche Effizienzverluste

Die Abschätzung möglicher Effizienzverluste gestaltet sich schwierig, da sich viele Substitutionsmöglichkeiten noch in der Anfangsphase der Entwicklung befinden. Eine Substitution von Dysprosium durch Terbium scheint technisch möglich, aber momentan nicht wirtschaftlich. Die Substitution von Neodym durch Praseodym ist nur teilweise möglich, ohne die magnetischen Eigenschaften des Materials negativ zu beeinflussen.

Die Entwicklung von FeCo- oder FeNi-basierten Materialien sowie Nanokompositen und -strukturen dagegen befindet sich noch im Labormaßstab; auch mittelfristig scheinen die Energiedichten von marktüblichen Permanentmagneten nicht erreicht zu werden (REFREEPERMAG - FP7 EU Project, 2015).

Die Nutzung fremderregter Generatoren geht mit Effizienzverlusten einher, da das Magnetfeld des Läufers durch stromdurchflossene Spulen erzeugt wird, in denen Verluste auftreten; wie hoch diese sind, hängt jedoch von Größe, Konstruktion und Betrieb der Anlage ab. Im Gegensatz zu fremderregten Generatoren, in denen das elektrische Feld des Läufers durch stromführende Kupferspulen erzeugt wird, können durch den Einsatz von Permanentmagneten die Wirkungsgrade gesteigert werden und die Ausmaße sowie das Gewicht des Gesamtsystems gesenkt werden. Insbesondere der letzte Punkt ist für Offshore-Anlagen von entscheidender Bedeutung.

Der Wirkungsgrad von HTS-Generatoren hängt stark vom Leistungsbereich ab. HTS-Kraftwerksgeneratoren mit mehreren 100 MW Leistung erreichen Wirkungsgrade von 99,5 %; diese fallen jedoch für niedrigere Leistungen stark ab, da der Aufwand für die Kühlung nicht proportional sinkt. Für Windkraftanlagen wird erwartet, dass sie in Zukunft bessere Wirkungsgrade als PMG aufweisen; insbesondere im Teillastbereich zeigen sie Vorteile (Wuppertal Institut, 2014).

Tabelle 3-26: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Permanentmagnet-Generatoren in WKA

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsubstitution</b>	
FeCo- oder FeNi-basierte Materialien	Anvisierte Energiedichte von 160 kJ/m <sup>3</sup> (Neodymbasierte PMG: >400 kJ/m <sup>3</sup> )
Dysprosium durch Terbium	Nicht bekannt
<b>Technologische Substitution</b>	
Nanostrukturen	Energiedichten von 100-165 kJ/m <sup>3</sup>
Nanokomposite	Mittels nanometerdicken Schichten aus FeCo und FePt lassen sich Energiedichten von bis zu 400 kJ/m <sup>3</sup> erreichen
Fremderregte Generatoren	Schlechtere Wirkungsgrade
HTS-Generatoren	Für WKA im hohen Leistungsbereich bessere Wirkungsgrade

Quellen : REFREPERMAG 2015, Fraunhofer ISI 2016, WI 2014

### 3.3.5.5 Mögliche Restriktionen

Die Magnete in Permanentmagnetgeneratoren (PMG) müssen hohen Temperaturen widerstehen können. Üblicherweise wird heutzutage dazu Dysprosium beigelegt, das auch die Korrosionsbeständigkeit erhöht. Neue Verfahren zur Sinterung mittels Mikrowellenstrahlung könnten dazu beitragen, die Dicke der Korngrenzschichten (und damit den Dysprosiumbedarf) zu reduzieren.

Zudem spielt die Größe der Gondel insbesondere für Offshore-Anlagen eine kritische Rolle. Sie verkompliziert den Aufbau erheblich und lässt sich auf Grund konstruktiver Restriktionen und den zu widerstehenden Belastungen nicht beliebig steigern. Doch auch für Onshore-Anlagen ist die Größe begrenzt, und sei es nur durch praktische Erwägungen wie die Breite der Straßen, die zum Antransport der Anlagenteile genutzt werden können. Daher scheinen fremderregte Generatoren für zukünftige Windkraftanlagen im hohen Leistungsbereich eher ungeeignet. Auch neue Ansätze (FeCo- oder FeNi-basierte Materialien sowie Nanostrukturen und -komposite) werden eine zu heutigen Permanentmagneten vergleichbare Energiedichte erreichen müssen, um für solche Anwendungen konkurrenzfähig zu sein.

Eine weitere wichtige Rolle für Offshore-Anlagen spielt die Robustheit des Systems, da sich Reparaturen komplizierter gestalten als für Onshore-Anlagen.

Tabelle 3-27: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Permanentmagnet-Generatoren in WKA

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsubstitution</b>	
FeCo- oder FeNi-basierte Materialien	Gondelgröße und -gewicht insb. für Offshore-Anlagen begrenzt
<b>Technologische Substitution</b>	
Nanostrukturen	Gondelgröße und -gewicht insb. für Offshore-Anlagen begrenzt
Nanokomposite	Gondelgröße und -gewicht insb. für Offshore-Anlagen begrenzt
Fremderregte Generatoren	Gondelgröße und -gewicht insb. für Offshore-Anlagen begrenzt Kontakte der Läuferspulen unterliegen Verschleiß

Substitutionsebenen	Restriktionen
HTS-Generatoren	Hohe Wirkungsgrade erst im hohen Leistungsbereich Robustheit insb. für Offshore-Anlagen wichtig

### 3.3.5.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Generell erscheint der Einsatz von Technologien, die nicht auf Seltene Erden angewiesen sind, unter ökologischen Gesichtspunkten erstrebenswert, da der Abbau dieser Rohstoffe (zumindest momentan) mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden ist. In dieser Hinsicht wäre der Einsatz von Nanokompositen und -strukturen erstrebenswert. Bedenken, die im Hinblick auf die Auswirkungen von Nanopartikeln auf die Umwelt teilweise geäußert werden, erscheinen hier nicht relevant, da sie nicht dissipativ eingesetzt werden.

Der größte Zubau an Permanentmagnet-Generatoren in Deutschland wird in den kommenden Jahren in Offshore-Anlagen gesehen. Der Aufbau dieser Anlagen ist mit Umweltbedenken verbunden, insbesondere in Hinblick auf die Lärmbelastung: Die Fundamente der Anlagen werden mit Pfählen im Boden verankert, die mit über 1.000 Schlägen in den Untergrund getrieben werden; dabei verursacht jeder Schlag eine Schallbelastung von 225 Dezibel. Diese Belastung kann Schweinswale und Fische vertreiben oder verletzen. Abhilfe könnte etwa der Einsatz von Blasenschleiern liefern. Darüber hinaus gibt es Befürchtungen, dass See- und Zugvögel beeinträchtigt werden. Technologien, die leichtere Gondeln bei hoher Leistung ermöglichen (beispielsweise HTS-Generatoren) könnten diese Problematik potenziell ein wenig lindern, da sie den Aufbau vereinfachen. Es kann jedoch erwartet werden, dass diese Vorteile durch eine Höherdimensionierung der Anlage zunichte gemacht werden.

### 3.3.5.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

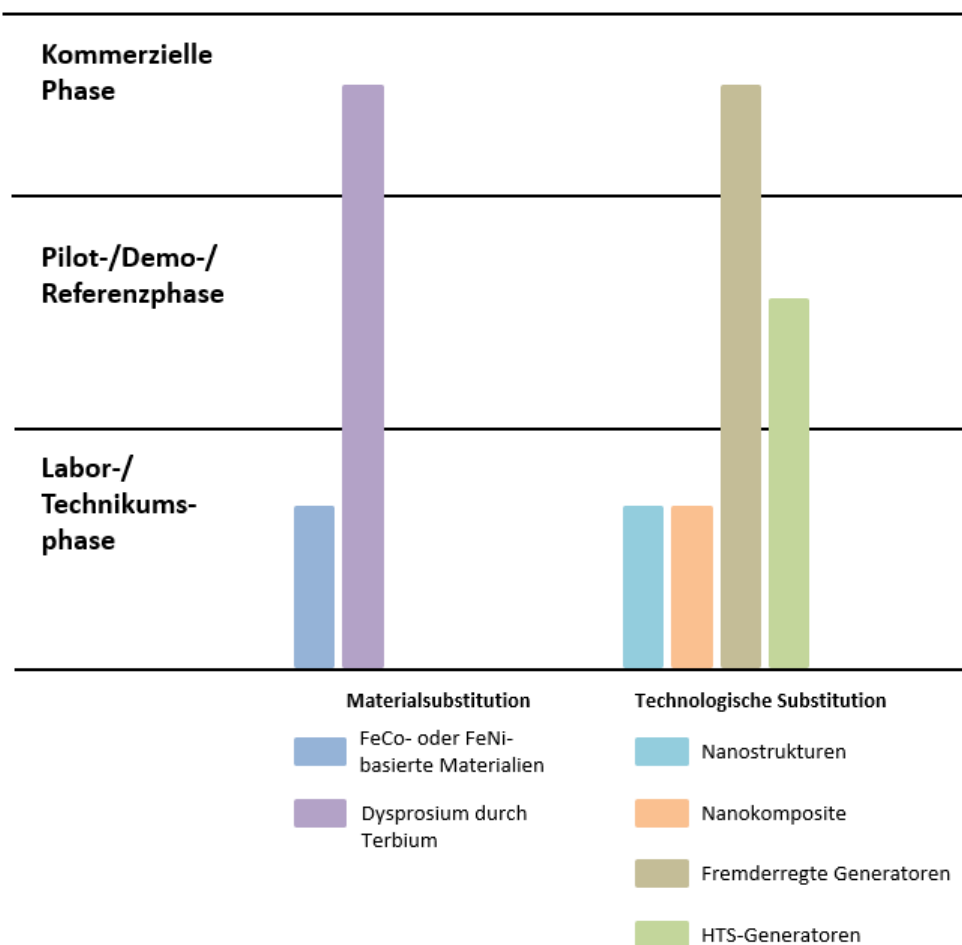
Folgt man dem Fraunhofer ISI (Fraunhofer ISI, 2016), so sind bei Permanentmagnet-Generatoren in absehbarer Zeit keine Substitutionsmöglichkeiten zu erwarten, die komplett ohne Seltene Erden auskommen.

Das EU-Projekt REFREEMPERMAG verfolgt einen neuen kombinatorischen Ansatz, um schneller als mittels des bisher zum Einsatz kommenden Single-Sputtering-Verfahrens nach potenziell einsetzbaren FeCo- oder FeNi-basierte Materialien zu suchen. Dennoch befindet sich dieser Ansatz, genau wie die Entwicklung von Nanostrukturen und -kompositen, noch im Forschungsstadium; eine Substitution von PMG in Windkraftanlagen ist daher noch nicht abzusehen.

Fremderregte Generatoren sind ausgereift und werden großflächig in Windkraftanlagen eingesetzt. HTS-Generatoren kommen als Kraftwerksgeneratoren in Leistungsbereichen von mehreren 100 MW zum Einsatz. Ihre Anwendung als Generator in Windkraftanlagen ist jedoch noch nicht abzusehen (Wuppertal Institut, 2014). Ein wichtiges Kriterium ist, dass die Materialentwicklung so weit vorangetrieben wird, dass die Supraleiter mit flüssigem Stickstoff ausreichend gekühlt werden können (Expertengespräch 2016).



Abbildung 3.7: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Permanentmagnet-Generatoren in Windkraftanlagen



Quelle: IZT

### 3.3.5.8 Fazit und Ausblick

Laut BGR (2016) wird auf absehbare Zeit trotz intensiver Forschungsanstrengungen kein Magnetmaterial mit vergleichbaren Eigenschaften ohne Seltenerdelemente zur Verfügung stehen. Wahrscheinlicher sind graduelle Optimierungen der NdFeB-Magnete, insbesondere eine Verbesserung der Produktionsmethoden und die Verringerung des Anteils schwerer Seltenerdelemente (BGR 2016). Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums ist der Einsatz dieser Technologien zeitlich nicht abzuschätzen. Mittelfristig scheint eine Substitution von PMG in Windkraftanlagen nur durch fremderregte Generatoren möglich. Diese sind jedoch durch ihre schlechteren Wirkungsgrade und das sich ergebende größere Gondelausmaß und -gewicht insbesondere für Offshore-Anlagen im hohen Leistungsbereich unzureichend. Hoffnungen werden in HTS-Generatoren gesetzt, ihr Einsatz in Windkraftanlagen ist aber noch ungewiss.

### 3.3.5.9 Literatur

DERA 2016: Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016, Nr. 28, Berlin, Auftragsstudie, Autoren: Frank Marscheider-Weidemann, Sabine Langkau, Torsten Hummen, Lorenz Erdmann, Luis Tercero Espinoza, Gerhard Angerer, Max Marwede, Stephan Benecke, [https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/Studie\\_Zukunftstechnologien-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

Elektronik Praxis 2015: Substitution Seltener Erden mithilfe der Nanotechnologie, <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/nanotechnologie/articles/492019/>



Fraunhofer ISI 2015: Roadmap for the Substitution of Critical Raw Materials in Electric Motors and Drives, [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/en/publikationen/CRM-InnoNet-Roadmap-for-CRM-substitution\\_Electric\\_Motors\\_And\\_Drives.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/en/publikationen/CRM-InnoNet-Roadmap-for-CRM-substitution_Electric_Motors_And_Drives.pdf)

REFREEPERMAG - FP7 EU Project 2015: Rare Earth Free Permanent Magnets. [http://www.criticalrawmaterials.eu/wp-content/uploads/reefreepermag\\_niachros.pdf](http://www.criticalrawmaterials.eu/wp-content/uploads/reefreepermag_niachros.pdf)

VDI 2013: Motorenhersteller meiden Seltene Erden, <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Motorenhersteller-meiden-Seltene-Erden>

Wuppertal Institut 2014: Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/KRESSE\\_Endbericht.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf)

### **3.4 Technologiegruppe Generatoren ohne Permanentmagnete**

Die Generatoren ohne Permanentmagnete umfassen zum einen die Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 107) und zum anderen die Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 108).

#### **3.4.1 Synchron-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 107)**

Fremderregte Synchron-Generatoren nutzen stromdurchflossene Kupferspulen, um ein elektromagnetisches Feld im Läufer zu erzeugen. Sie lassen sich sowohl als Asynchron-, als auch als Synchron-Generatoren ausführen. Beide Varianten sind allein auf Kupfer als kritischen Rohstoff angewiesen. Da sich Kupfer sehr gut recyceln lässt und in Windkraftanlagen nicht-dissipativ zum Einsatz kommt, ist der Substitutionsdruck gering. Generell werden fremderregte Generatoren als Alternative zu Permanentmagnet-Generatoren angesehen (s. die Analyse zu UT 106: Permanentmagnet-Generatoren), weil sie nicht auf Seltene Erden angewiesen sind.

#### **Materialsubstitution**

Das Kupfer in den Spulen der Synchron-Generatoren lässt sich potenziell durch andere leitfähige Materialien ersetzen. So gibt es Anwendungen, in denen Kupfer als elektrischer Leiter durch Aluminium ersetzt wird. Dieses besitzt jedoch eine deutlich schlechtere elektrische Leitfähigkeit (61 % des Kupfers). Eine Substitution würde daher mit deutlich größeren Leiterquerschnitten einhergehen, womit auch der benötigte Bauraum in der Gondel unzulässig steigen würde. Daher wird diese Möglichkeit für Windkraftanlagen nicht erwogen.

#### **Technologische Substitution**

Schon heute kommen neben Synchron- auch Asynchron-Generatoren in WKA zum Einsatz. Diese haben im Rotor keine Spulen verbaut, sondern eine Reihe an Kupfer- oder Aluminiumstäben, die an ihren Enden kurzgeschlossen sind. In Windkraftanlagen werden meist Kupferstäbe verwendet.

Eine mögliche technologische Substitution zeichnet sich mit der Entwicklung von Reluktanzgeneratoren ab. In diesen wird das Drehmoment nicht durch die Lorentz-, sondern durch die Reluktanzkraft erzeugt. Daher kann im Rotor auf stromdurchflossene Kupferspulen verzichtet werden.

#### **Funktionale Substitution**

Die Funktion des Generators in Windkraftanlagen – die Umwandlung von rotatorischer Bewegungsenergie in elektrische Energie – ist grundlegend für den Betrieb der WKA und lässt sich daher nicht anders darstellen.

Tabelle 3-28: Substitutionsansätze für Synchron-Generatoren in WKA

Substitutionsebenen	Ansätze
<b>Technologische Substitution</b>	Asynchrongeneratoren Reluktanzgeneratoren

#### 3.4.1.1 Mögliche Effizienzverluste

Asynchron-Generatoren werden meist in netzgekoppelten Windkraftanlagen verwendet; der Rotor muss also mit einer festen Drehzahl arbeiten und kann so nur eine bestimmte Windgeschwindigkeit optimal nutzen. Diese Einschränkung lässt sich konstruktiv mindern (etwa indem zwei Generatoren verbaut werden).

Um die mechanischen Belastungen beim Auftreten von Böen zu reduzieren, können Vorwiderstände zu- und abgeschaltet werden; dabei treten jedoch hohe Wärmeverluste auf. Generell haben Asynchrongeneratoren geringere Wirkungsgrade als Synchrongeneratoren.

Reluktanzgeneratoren eignen sich insbesondere für den Einsatz in hohen Leistungsbereichen. Verluste treten praktisch nur im Stator auf. Die Wirkungsgrade von Reluktanzmotoren sind besser als die vergleichbarer Synchronmotoren. Für Generatoren in kleinen Windkraftanlagen entsprechen die Wirkungsgrade etwa denen von Synchrongeneratoren (Europäische Kommission, 1998).

Tabelle 3-29: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Synchron-Generatoren in WKA

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Technologische Substitution</b>	
Asynchrongeneratoren	Schlechterer Wirkungsgrad
Reluktanzgeneratoren	Ähnlicher Wirkungsgrad

Quellen: Europäische Kommission 1998, Wuppertal Institut 2014

#### 3.4.1.2 Mögliche Restriktionen

Insbesondere für Offshore-Anlagen ist ein möglichst wartungsfreier Betrieb wichtig. Das spricht für den Einsatz von Asynchrongeneratoren, die im Gegensatz zu Synchrongeneratoren ohne Schleifkontakte am Rotor auskommen. Daher dominieren Asynchrongeneratoren heute den Offshore-Markt. Die Entwicklung geht jedoch hin zum Aufbau von Anlagen in immer höherem Leistungsbereich; die Verwendung von Asynchrongeneratoren (und auch Synchrongeneratoren) wird dabei durch die Ausmaße und das Gewicht der Gondel begrenzt.

Reluktanzgeneratoren besitzen im Vergleich zu fremderregten Synchron-Generatoren sehr einfach konstruierte Rotoren. Dadurch sind sie robuster, was für den Einsatz in Offshore-Anlagen einen Vorteil darstellt. Da Reluktanzgeneratoren immer mit einem Umrichter betrieben werden, sind die Investitionskosten für drehzahlvariable Anlagen nicht höher. Es gibt damit kein überzeugendes Argument, Windkraftanlagen mit Reluktanzgeneratoren für einen Betrieb mit konstanter Drehzahl auszulegen.

Tabelle 3-30: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Synchron-Generatoren in WKA

<b>Technologische Substitution</b>	
Asynchrongeneratoren	Ausmaß und Gewicht der Gondel
Reluktanzgeneratoren	Technisch bedingter Umrichter (in drehzahlvariablen Anlagen kein

finanzieller Nachteil)

#### 3.4.1.3 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Weder Asynchron- noch Reluktanzgeneratoren besitzen bemerkenswerte ökologische Vor- oder Nachteile gegenüber Synchrongeneratoren.

#### 3.4.1.4 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Asynchrongeneratoren gelten als ausgereifte Technologie; insbesondere in Offshore-Anlagen werden sie großflächig eingesetzt. Es werden keine grundlegenden Verbesserungen erwartet.

Reluktanzmotoren sind schon in einer Reihe von Anwendungen im Einsatz, etwa in Hybridfahrzeugen. Jedoch ist noch nicht abzusehen, ob Reluktanzgeneratoren in Zukunft in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen (Wuppertal Institut, 2014). In einem EU-Projekt wurde ein Reluktanzgenerator in einer direktangetriebenen Windkraftanlage mit einer nominellen Leistung von 18 kW getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass Reluktanzgeneratoren für diese Anwendung ähnliche Wirkungsgrade liefern wie andere fremderregte Generatoren (Europäische Kommission, 1998). Dennoch scheinen bis dato keine weiteren Entwicklungsprojekte angestoßen worden zu sein.

Tabelle 3-31: Technologiereife der verschiedenen Substitutionsansätze für Synchron-Generatoren in WKA

Technologische Substitution	
Asynchrongeneratoren	Ausgereift
Reluktanzgeneratoren	In anderen Anwendungen im Einsatz

#### 3.4.1.5 Fazit und Ausblick

Für Synchrongeneratoren sind Asynchron- und längerfristig möglicherweise Reluktanzgeneratoren als Substitutionsmöglichkeiten denkbar. Jedoch spielt die Substitution von Kupfer bei Generatoren bis dato keine Rolle. Kupfer in Generatoren von Windkraftanlagen kann effizient zurückgewonnen werden. Eine Substitution wird daher praktisch nicht erwogen.

#### 3.4.1.6 Literatur

Europäische Kommission, 1998: Variable reluctance generators in wind turbines – Report Summary, [http://cordis.europa.eu/result/rcn/20293\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/20293_en.html)

Wuppertal Institut, 2014: Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/KRESSE\\_Endbericht.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf)

### 3.4.2 Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen (UT Nr. 108)

Asynchron-Generatoren nutzen im Läufer kurzgeschlossene Kupferstäbe. Damit ist ihr leistungsspezifischer Kupferbedarf geringer als der von Synchrongeneratoren. Zudem kann das verbaute Kupfer leicht zurückgewonnen werden, so dass eine Substitution nicht ernsthaft diskutiert wird. Außer Kupfer werden keine anderen kritischen Materialien eingesetzt.

#### 3.4.2.1 Materialsubstitution

Die im Läufer eingesetzten Kupferstäbe lassen sich auch aus Aluminium ausführen. Jedoch ist der Substitutionsdruck gering.

#### 3.4.2.2 Technologische Substitution

Neben Asynchrongeneratoren kommen in Windkraftanlagen auch andere Generatoren zum Einsatz. Diese sind jedoch im Hinblick auf den leistungsbezogenen Ressourcenbedarf den Asynchrongeneratoren nicht vorzuziehen. Einzig Reluktanzgeneratoren könnten in Zukunft eine

ressourcenschonende Substitutionsmöglichkeit liefern; ihr Einsatz in Windkraftanlagen ist jedoch bislang nicht abzusehen. Für eine genauere Betrachtung siehe UT 107: Synchron-Generatoren.

#### 3.4.2.3 Funktionale Substitution

Die Funktion des Generators in einer Windkraftanlage ist die Umwandlung von rotatorischer Bewegungsenergie in elektrische Energie. Sie ist grundlegend für den Betrieb der Anlage. Alternativen, die diese Funktion erfüllen, existieren nicht.

Tabelle 3-32: Substitutionsansätze für Asynchron-Generatoren in WKA

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsubstitution	-
Technologische Substitution	Reluktanzgeneratoren
Funktionelle Substitution	-

#### 3.4.2.4 Mögliche Effizienzverluste

Reluktanzgeneratoren eignen sich insbesondere für den Einsatz in hohen Leistungsbereichen. Verluste treten praktisch nur im Stator auf, so dass die Wirkungsgrade besser sind als die vergleichbarer Asynchrongeneratoren (Wuppertal Institut, 2014).

#### 3.4.2.5 Mögliche Restriktionen

Wie auch Asynchrongeneratoren besitzen Reluktanzgeneratoren einen einfach aufgebauten Rotor. Dadurch sind diese sehr robust, was für den Einsatz in Offshore-Anlagen einen Vorteil darstellt.

#### 3.4.2.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Reluktanzgeneratoren besitzen keine nennenswerten ökologischen Vor- oder Nachteile.

#### 3.4.2.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Reluktanzmotoren sind schon in einer Reihe von Anwendungen im Einsatz, etwa in Hybridfahrzeugen. Jedoch ist noch nicht abzusehen, ob Reluktanzgeneratoren in Zukunft in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen (Wuppertal Institut, 2014). In einem EU-Projekt wurde ein Reluktanzgenerator in einer direktangetriebenen Windkraftanlage mit einer nominellen Leistung von 18 kW getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass Reluktanzgeneratoren für diese Anwendung ähnliche Wirkungsgrade liefern wie andere fremderregte Generatoren (Europäische Kommission, 1998). Dennoch scheinen bis dato keine weiteren Entwicklungsprojekte angestoßen worden zu sein.

#### 3.4.2.8 Fazit und Ausblick

In Zukunft können Asynchrongeneratoren möglicherweise durch Reluktanzgeneratoren substituiert werden. Ob diese Option tatsächlich realisiert wird, ist noch nicht abzusehen. Kupfer kann aus Generatoren für Windkraftanlagen sehr gut zurückgewonnen werden. Eine Substitution wird daher nicht ernsthaft vorangetrieben.

#### 3.4.2.9 Literatur

Europäische Kommission, 1998: Variable reluctance generators in wind turbines – Report Summary, [http://cordis.europa.eu/result/rcn/20293\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/20293_en.html)

Wuppertal Institut, 2014: Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/KRESSE\\_Endbericht.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf)

### 3.5 Technologiegruppe Speichertechnologien

In die Technologiegruppe der Speichertechnologien fallen die Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98) sowie die Lithium-Ionen Stromspeicher (UT Nr. 100).

#### 3.5.1 Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98)

Li-Ionen-Akkus bestehen aus Anode und Kathode, die in einen Elektrolyten eingetaucht und durch eine Polymermembran getrennt sind. Für den Einsatz in Li-Ionen-Batterien kommt eine Vielzahl an Kombinationen verschiedener Anoden, Kathoden und Elektrolytmaterialien in Betracht, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben. Das aktive Material der positiven Elektrode (Anode) eines gängigen Lithiumionen-Akkus besteht aus Graphit. Die negative Elektrode (Kathode) enthält Lithium-Metalloxid-Verbindungen, wie Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC), Lithium-Eisen-Phosphat (LFP), Lithium-Nickel-Aluminium-Kobaltoxid (NCA) und Lithium-Mangan-Oxid (LMO). Zum Einsatz kommt vor allem Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid mit einem Anteil von 40 %, auf NCA und LMO entfallen jeweils 20 %, der Anteil von LFP beträgt 15 % (Novinsky 2014). Welches Lithiumsystem sich zukünftig durchsetzen wird, ist noch nicht absehbar. Unter den Stoffen der Kritikalitätsliste befinden sich Lithium (Platz 15) und Mangan (Platz 21). Außerdem wird Kupfer als Stromleiter (Platz 15) verwendet.

##### 3.5.1.1 Materialsubstitution

**Lithium** wird als aktives Material in der Elektrode und im Elektrolyten eingesetzt. Es ist ein sehr leichtes Element und besitzt das negativste Normalpotential aller Elemente, so dass sehr hohe Zellspannungen und damit besonders hohe massespezifische Energiedichten erreicht werden können. Aufgrund dieser Eigenschaften kann Lithium in Li-Ionen-Akkus nicht vollständig substituiert werden. Es gibt jedoch verschiedene Technologievarianten, die sich in ihrem Lithiumbedarf unterscheiden. Die Angaben zum Lithiumgehalt reichen in der Literatur von 50 g Li/kWh bis zu 300 g Li/kWh (BGR 2016), wobei die Spanne in den am Markt befindlichen Systemen geringer sein dürfte (Expertengespräch 2016). DERA 2016 geht von einem Lithiumgehalt von 180 g/kWh aus, der durch zunehmende Ressourceneffizienz mittelfristig auf 150 g/kWh sinken wird (unter Annahme einer LiCoO-Zellchemie).

**Kupfer** wird als Stromleiter verwendet. Als Kupferersatz kommt Aluminium in Frage, es wird teilweise bereits eingesetzt. Aluminium weist zwar eine sehr viel geringere elektrische Leitfähigkeit auf, ist jedoch auch bedeutend leichter als Kupfer; dadurch lässt sich potenziell das Gewicht der Batterie senken, was insbesondere in der Elektromobilität von Bedeutung ist (Automotive IQ 2011; Lücke et al., 2013).

**Mangan** wird in der Batteriekathode eingesetzt. Zurzeit gibt es keine befriedigende Substitutionsmöglichkeit (EU 2016).

##### 3.5.1.2 Technologische Substitution

Bis dato gibt es keine alternativen Akku-Systeme, die ohne Lithium auskommen. Neben den dominierenden Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid-basierten Systemen kommen Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan (NMC/LiNiMnCoO<sub>2</sub>) und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA) in Betracht, die hohe Energiedichten aufweisen. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz von LiFePO<sub>4</sub>. Diese Technologie liefert Vorteile insbesondere in Bezug auf Sicherheit (ein wichtiges Kriterium für Batterien in EV) und Energiedichte (BCG 2010). Diese Zellchemie wurde vor allem in China eingesetzt; der Markt ist jedoch wieder rückläufig, da der Einsatz von LFP-Kathoden ein größeres spezifisches Volumen der Batterie bedingt, was im Automobilbereich ein entscheidendes Kriterium darstellt (Gernuks, Volkswagen AG, 2016).

Ein Anodenmaterial, von dem erwartet wird, dass es für den Einsatz in der Elektromobilität gut geeignet ist, ist Lithium-Titanoxid (LTO), Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, enthält also ebenfalls Lithium. LTO zeigt eine

hervorragende Zyklenstabilität und Leistungsdichte. Allerdings wurde nach einer praktischen Erprobung von Zellen mit LTO in Kombination mit Lithiummanganoxid (LMO) als Elektrode festgestellt, dass innerhalb der Batterie eine Gasentwicklung auftrat. Dieses Gas baut einen Innendruck auf, der die Elektroden auseinanderdrückt und letztlich zu einem Totalausfall der Batteriezelle führen kann. Die Lösung dieses Problems wird als Hürde gesehen, bevor LTO/LMO-Batterien für eine breite kommerzielle Anwendung eingeführt werden können (Nordh, 2013). Ein Ersatz der Graphit-Anode mit LTO geht mit einem gesteigerten Einsatz von Lithium und Titan einher. Nach Einschätzung von (Gernuks, Volkswagen AG, 2016) ist der Einsatz von LTO-Zellchemien möglich, wird jedoch in der Praxis nicht diskutiert, anscheinend da der Einsatz von NMC-Batterien vorteilhaft scheint.

Noch unsicher ist der Einsatz von Lithium-Polymer-, Lithium-Feststoff- und Lithium-Metall-Systemen. Für die Nutzung von Lithium-Metall 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. Sehr langfristig denkbar ist die Entwicklung von Lithium-Luft-Systemen. Diese erscheinen jedoch selbst auf Zellebene bis 2030 als sehr unsicher. Alle Konzepte basieren auf Lithium-Verbindungen, daher gibt es bis dato keine Möglichkeiten zur Substitution von Lithium, allenfalls ließe sich die Konzentration verringern.

In reinen Hybrid-Autos oder PHEV, die nur auf eine geringe Elektrifizierung setzen, werden auch Nickelmetallhydrid-(NiMH)-Akkus eingesetzt. Ihr Anteil liegt heute bei 30 %. Es wird erwartet, dass im Jahr 2020 verkaufte Neuwagen durchgängig mit Li-Ionen-Akkus ausgestattet sind, da diese eine etwa doppelt so hohe Energiedichte aufweisen. (DLR 2015; BCG 2010; Berman 2008). Demgegenüber stehen einzelne Forschungsanstrengungen, die Energiedichte von NiMH-Batterien auf 140 Wh/kg zu steigern. (Automobil Industrie 2015)

Derzeit werden auch andere Optionen zur elektrochemischen Energiespeicherung untersucht, beispielsweise Aluminium-Ionen oder Natrium-Ionen. Für diese ist ein Einsatz noch nicht absehbar.

### 3.5.1.3 Funktionale Substitution

In Bezug auf den funktionalen Ersatz, gibt es verschiedene Alternativen zur Li-Ion Akkus: Doppelschichtkondensator und Brennstoffzellen.

Doppelschichtkondensatoren weisen im Vergleich zu Batterien sehr gute Leistungsdichten und Zyklenwirkungsgrade auf. Jedoch beträgt ihre Energiedichte nur etwa 1/10 der von Batterien; damit kommen sie kurzfristig nur für reine Hybrid-Anwendungen in Frage. Um wettbewerbsfähig zu sein, müsste ihr Preis gesenkt werden (Burke, Zhao 2015). Die Doppelschichtkondensatoren werden eher als Teil-, denn als vollständige Substitutionsmöglichkeit gesehen; indem sie als Rekuperatoren Bremsenergie zwischenspeichern, kann die Kapazität der Batterie potenziell gesenkt werden. (Schmid, Volkswagen AG, 2016)

Als Alternative zu Akkumulatoren kommen Brennstoffzellen-Systeme in Frage, die elektrische Energie mit Hilfe von Wasserstoff oder Methanol aus chemischer Energie erzeugen. Brennstoffzellen konkurrieren mit Li-Ionen-Batterien, können aber auch den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien ergänzen, beispielsweise indem sie mit einer Hochleistungsbatterie ein Hybridsystem bilden (Fraunhofer ISI 2010).

Tabelle 3-33: Substitutionsansätze für Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge

Substitutionsebenen	Ansätze
<b>Materialsubstitution</b>	Kupfer durch Aluminium
<b>Technologische Substitution</b>	Nickel-Metall-Hydride (NiMH)
<b>Funktionelle Substitution</b>	Doppelschichtkondensator



## Brennstoffzellen

## 3.5.1.4 Mögliche Effizienzverluste

Lithium-Ionen-Zellen erfüllen die Leistungsanforderungen hoher Energiedichte, um bei geringem Akkugewicht eine große Fahrzeugreichweite zu erreichen, am besten. Nachteilig sind noch lange Ladezeiten. Unter den Batterien besitzen Li-Ionen-Akkus den höchsten Zyklenwirkungsgrad von 80-90 %, im Vergleich zu 66 % für NiMH und 50 % für Blei-Säure-Batterien (Sun 2010). Li-Ion Batterien haben eine relativ geringe Selbstentladung. Sie beträgt weniger als die Hälfte von Batterien auf Nickelbasis (Wietschel et al. 2015). Einen höheren Wirkungsgrad weisen nur Doppelschichtkondensatoren auf. Der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen ist stark abhängig von der betrachteten Systemgrenze. Die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse ist bis dato ein ineffizienter Prozess, wodurch auch der Gesamtwirkungsgrad sinkt.

Tabelle 3-34: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsstitution</b>	
Kupfer durch Aluminium	Geringere elektrische Leitfähigkeit, lässt sich ggf. durch höheren Leiterquerschnitt ausgleichen
<b>Technologische Substitution</b>	
Nickel-Metall-Hydride (NiMH)	Schlechterer Wirkungsgrad
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Doppelschichtkondensator	Besserer Zyklenwirkungsgrad
Brennstoffzellen	Schlechterer Wirkungsgrad

## 3.5.1.5 Mögliche Restriktionen

Die Umsetzung der Optionen hängt wesentlich von technischen Fortschritten und der Kostenentwicklung ab. Ein großes Hemmnis für den Einsatz von Brennstoffzellen stellt die fehlende Infrastruktur dar; ohne den Aufbau eines ausreichenden Wasserstoff-Tanknetzes zumindest in Deutschland ist eine größere Nachfrage beispielsweise nicht zu erwarten.

Im Einzelnen wurden folgende Restriktionen identifiziert:

Tabelle 3-35: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Li-Ionen Batterien für Fahrzeuge

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
Kupfer durch Aluminium	Keine
<b>Technologische Substitution</b>	
Nickel-Metall-Hydride (NiMH)	Nicht leistungsstark
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Brennstoffzellen	Fehlende Infrastruktur
Doppelschichtkondensator	Niedrige Energiedichte, hohe Kosten

### 3.5.1.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Die US Environmental Protection Agency (EPA) hat in einer Life Cycle Analysis Li-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen untersucht; dabei wurde ein Fokus auf die Wahl des Kathodenmaterials gelegt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Sie zeigen, dass das Lithium-Mangan-Oxid-System sowohl im Primärenergieverbrauch als auch im Treibhauspotential vergleichsweise gut abschneidet. Bezüglich Toxizität weist mit deutlichem Abstand das LFP-System das niedrigste Toxizitätspotential auf. (EPA 2013) Im Vergleich weisen NiMH-Batterien eine deutlich geringere Zyklenlebensdauer auf.

Tabelle 3-36: Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen im Vergleich

	LMO	LFP	NMC	NCA
Lebensdauer (Zyklen)	1000–1500	2000–5000	500–1000	500–1000
Primary Energy Use (MJ/kWh Capacity)	869	2500	1960	
Global Warming Potential (kg CO <sub>2</sub> -Eq./kWh Capacity)	63.4	151	121	
Ecological Toxicity Potential Impact Score (PAF m <sup>3</sup> day/kWh)	8.05	1.07	10.1	

LMO: Lithium-Mangan-Oxid; LFP: Lithium-Eisen-Phosphat; NMC: Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid; NCA: Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid; LTO: Lithium-Titan-Oxid

Quelle: EPA 2013

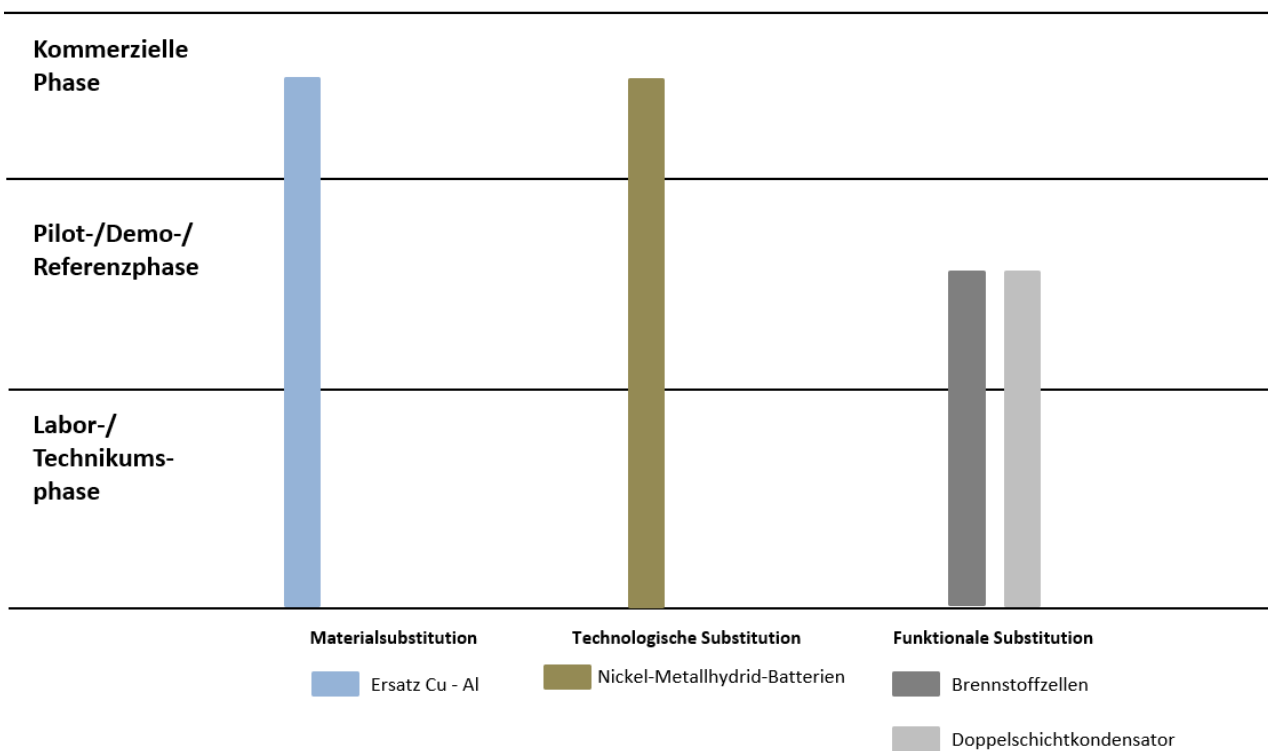
### 3.5.1.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

NiMH-Batterien sind auf dem Markt vertreten. Obwohl vereinzelt von Forschungsanstrengungen berichtet wird, gelten sie gemeinhin als ausgereift, so dass keine großen Verbesserungen zu erwarten sind.

Mehrere Automobilfirmen (u.a. Volkswagen, Toyota, Daimler) forschen teilweise bereits seit Jahrzehnten an Automobilen, deren Treibstoff Wasserstoff ist und die zur Energieumwandlung Brennstoffzellen sowie einen Elektromotor zum Antrieb nutzen. Bisherige Technologien sind noch sehr teuer, die Markteinführung und der Aufbau von Infrastrukturen ist nicht absehbar.



Abbildung 3.8: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen



Quelle: Eigene Darstellung

### 3.5.1.8 Fazit und Ausblick

Der Li-Ionen-Akku ist eine weit entwickelte Technologie und zeigt gegenüber anderen Batterietypen wesentliche Vorteile, die sie konkurrenzlos in Bezug auf den Einsatz in der Elektromobilität erscheinen lässt. Innerhalb der Lithium-Ionen-Akkus sind verschiedene Zellchemien möglich. Keine dieser Optionen verzichtet jedoch auf Lithium; eine zunehmende Optimierung der Elektroden lässt erwarten, dass der spezifische Lithiumgehalt sinkt. Ein Wechsel von der Graphit- auf eine Lithium-Titanoxid-Anode würde einen zusätzlichen Lithiumbedarf erzeugen.

Deshalb gibt es in absehbarer Zukunft keine Substitutionsalternativen für Li-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Der Fokus der Forschung liegt auf dem werkstofflichen Recycling der Li-Ionen-Batterien. Langfristig möglich wäre es, die Batterien aufzuarbeiten und wieder zu verwenden, um so den Rohstoffbedarf zu senken.

### 3.5.1.9 Literatur

Automobil Industrie 2015: BASF findet Potential bei Nickel-Metallhydrid-Akkus, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/basf-findet-potential-bei-nickel-metallhydrid-akkus-a-485205/>. Abgerufen am 27.10.2016.

Automotive IQ 2011: The evolution from Copper to Aluminum. <https://automotiveiq.wordpress.com/2011/03/15/the-evolution-from-copper-to-aluminum-%E2%80%93-are-you-ready/>

DLR 2015: Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität, Abschlussbericht. Stuttgart, 2015

EPA 2013: Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles. United States Environmental Protection Agency.

Lücke et al. 2013: Vergleich von Werkstoffen auf Basis von Cu und Al sowie Trends bei deren Anwendung in der Elektroenergie-technik. Lücke, N.; Schlegel, S.; Großmann, S. in: METALL, 11/2013

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

BCG 2010: Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. The Boston Consulting Group, 2010

Nordh 2013: Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> as an anode material for Li ion batteries in situ XRD and XPS studies. Uppsala Universitet. T.Nordh. 2013

US DoE o.J.: Batteries for Hybrid and Plug-In Electric Vehicles. US Department of Energy.

[http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric\\_batteries.html](http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html)

Berman 2008: The Hybrid Car Battery: A Definitive Guide. Brad Berman

Burke, Zhao 2015: Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles. A.Burke, H.Zhao.

Sun 2010: Stanford University. Car battery Efficiencies. John Sun

Wietschel, M., Ullrich, S., Markewitz, P., Schulte, F., & Genoese, F. (2015). Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer

Battery University Group. Li-Ion Batteries. 2010

EAI 2011: Roadmap

International Energy Agency. Hybrid & Electric vehicle. 2016

International Energy Agency. Electric and plug-in hybrid electric vehicles. 2011

EU 2016: Materials Information System. Institute for energy and Transport (EIT). European Com-mission, 2016

UBA 2016: Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Information- und Kommunikationstechnik (IKT), 2016

Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. Materials Today. 2016

DERA 2016, Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Berlin

Novkinsky, P. (2014): Entwicklung eines systemdynamischen Modells zur Analyse potentieller Versorgungseingpässe von Kobalt als Batterierohstoff für alternative Fahrzeugantriebe. Masterarbeit, KIT, Karlsruhe (zit. nach DERA 2016)

Experten

Dipl.-Ing. Marco Muhl. Technische Universität Berlin. Technischer Umweltschutz.

M.Sc. Christian Clemm. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM

Dipl.-Ing. Karsten Schischke. Team Leader. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM

### 3.5.2 Lithium-Ionen Stromspeicher (UT Nr. 100)

Der Zellaufbau von Li-Ionen-Stromspeichern entspricht prinzipiell dem Aufbau von Li-Ionen-Batterien für Fahrzeuge. Die Zellen bestehen aus Anode und Kathode, die in einen Elektrolyten eingetaucht und meist durch eine Polymermembran (Separator) getrennt sind. Je nach Anforderungen an die Kapazität bzw. die verfügbare Stromstärke wird Lithium in unterschiedlichen Verbindungen mit Übergangsmetallen als Kathodenmaterial eingesetzt: LCO (LiCoO<sub>2</sub>), LMO (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), LFP (LiFePO<sub>4</sub>), NMC (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) und NCA (LiNiCoAlO<sub>2</sub>). Die Anode in der Zelle ist zumeist mit Graphit (Kohlenstoff) beschichtet. In diese Kohlenstoffschicht lagert sich beim Ladevorgang das Lithium ein, es entsteht graphitiertes Lithium. Andere Anodenmaterialien sind Titandioxid oder Lithiumtitanat. Der Elektrolyt besteht aus verschiedenen organischen Lösungsmitteln bzw. Lösungsmittelgemischen, in denen ein Leitsalz gelöst ist. Als Leitsalz kommt in derzeit kommerziell erhältlichen Zellen nahezu ausschließlich Lithiumhexafluorophosphat (LiPF<sub>6</sub>) zum Einsatz. Bezüglich der Substitution kritischer Rohstoffe interessieren Lithium (Platz 15), Kupfer (Platz 17) und Mangan (Platz 21).

#### 3.5.2.1 Materialsstitution

**Lithium** lässt sich bis dato nicht substituieren. Es besitzt das negativste Normalpotential aller Elemente, so dass sehr hohe Zellspannungen und damit besonders hohe massespezifische Energiedichten erreicht werden können und ist deshalb als Kathodenmaterial besonders geeignet. Es gibt jedoch verschiedene Technologievarianten, die sich in ihrem Lithiumbedarf unterscheiden. Die

DERA nennt in einer neueren Studie einen Lithiumgehalt von 180 g Li/kWh für Kobaltoxid/Kobalt-Mischoxid-Systeme und 120 g Li/kWh für Eisenphosphatbasierte Li-Ionen-Akkusysteme (DERA 2016). Durch zunehmende Verbesserung der Elektroden ist zu erwarten, dass der spezifische Lithiumgehalt abnimmt.

**Mangan** wird in NMC und LMO-Batteriekathoden eingesetzt. Der spezifische Mangangehalt beträgt in NMC-Kathoden 0,27 g/Wh und bei LMO-Kathoden 0,610 g/Wh (BGR 2016). Zurzeit gibt es keine befriedigenden Substitutionsmöglichkeiten. (EU 2016)

**Kupfer** wird zur Herstellung von Stromleitern verwendet. In dieser Anwendung wird zunehmend auch Aluminium als Kupferersatz eingesetzt. Aluminium weist zwar eine sehr viel geringere elektrische Leitfähigkeit auf, ist jedoch günstiger als Kupfer. (EY 2013; Lücke et al., 2013)

### 3.5.2.2 Technologische Substitution

Als Alternative für Lithium-Ionen-Stromspeicher kommen folgende Technologien in Frage:

- ▶ Blei-Säure-Batterien
- ▶ Nickel-Cadmium-Batterien
- ▶ Natrium-Batterien (Na<sub>2</sub>S und NaNiCl<sub>4</sub>)
- ▶ Redox-Flow-Batterien (Vanadium, Zinkbromid)

Blei-Säure-Batterien kommen in vielen, insbesondere dezentralen stationären Energiespeichern zum Einsatz (Wietschel, Ullrich, Markewitz, Schulte, & Genoese, 2015). Sie sind eine ausgereifte, günstige Technologie. (IEC 2011) Ein bedeutender Nachteil ist jedoch ihre niedrige Energiedichte. Es wird daher erwartet, dass Blei-Säure-Batterien mittelfristig keine größere Rolle mehr spielen werden. (Battery University 2010)

Große Batteriesysteme mit NiCd-Akkus werden in einem ähnlichen Umfang wie Blei-Säure-Akkus eingesetzt. (IEC 2011) Auf Grund ihrer vergleichsweise geringen Zellspannungen, geringen Energie- und Leistungsdichten und Umweltbedenken wird NiCd-Akkus mittelfristig keine große Bedeutung zugesprochen.

Natrium-Schwefel-Batterien verwenden als aktive Materialien Schwefel für die positive und Natrium für die negative Elektrode. (ESA o.J.) Aufgrund der Betriebstemperatur und der stark korrodierenden Eigenschaften der Natriumpolysulfide eignen sich NaS-Batterien vor allem für große stationäre Anwendungen wie Netzenergiespeicherung. So entfällt der Großteil der installierten elektrochemischen Netzspeicherkapazität auf Na<sub>2</sub>S-Systeme. Die meisten Na<sub>2</sub>S-Speicher sind in Japan und in den USA installiert; die ersten europäischen Projekte finden sich seit 2012-2013 auf der Insel Réunion (Frankreich), in Deutschland und in Großbritannien. (EASE o.J.)

Redox-Flow Batterien (RFB) zeigen ein sehr hohes Potential für die Speicherung von erneuerbaren Energien. Das zu reduzierende Arbeitsmedium wird in externen Speichern aufbewahrt und der eigentlichen Batterie zur Energieentnahme zugeführt. Dadurch lassen sich Redox-Flow-Batterien sehr einfach skalieren. Energie und Leistung können unabhängig voneinander dimensioniert werden. Zudem weisen sie sehr hohe Zyklenwirkungsgrade und eine hohe Lebensdauer auf. (Alotto et al., 2013)

Nicht alle Batterietechnologien sind direkt untereinander substituierbar. Lithium-Ionen-Batterien erscheinen beispielsweise unter anderem sehr geeignet für die dezentrale, kurzfristige Speicherung regenerativ erzeugter Energie, während Redox-Flow-Batterien für diese Anwendung auf Grund ihrer Größe nicht in Frage kommen. Dafür können letztere auch zur längeren Speicherung von Energie eingesetzt werden, da sie keine Selbstentladung aufweisen.

Außerdem können Hybrid-Lösungen als „Großspeicher“ fungieren. Sie kombinieren die Lithium-Ionen-Technologie (Leistungsbatterie) mit der Vanadium-Redoxflow-Batterie (Energiebatterie). Ein

Beispiel ist der MWh-Speicher von Bosch in Braderup (Kostka 2015). Der Hybrid-Speicher dient der Vermeidung von Netzüberlastung und der Teilnahme am Regelenenergiemarkt.

### 3.5.2.3 Funktionale Substitution

In einem weiteren Sinne können als funktionale Alternative zu Lithium-Ionen-Stromspeichern sowohl andere Technologien der Energiespeicherung gesehen werden, als auch Ansätze, die die vorzuhaltenden Speicherkapazitäten reduzieren. Darunter können gezählt werden:

- ▶ Wasserstoff-Brennstoffzellen (in Kombination mit Elektrolyse)
- ▶ Doppelschichtkondensatoren
- ▶ Pumpspeicherkraftwerke
- ▶ Demand Side Management
- ▶ Netzausbau innerhalb Deutschlands
- ▶ Ausbau der Übertragungskapazitäten in Europa
- ▶ Abschaltung Erneuerbarer Energien
- ▶ Kraftwerke als Reserve
- ▶ Regelbare erneuerbare Kraftwerke (Biogasanlagen als Speicher von Wind- und Solarenergie, Power-to-Biogas)

Dabei können nicht alle Alternativen als direkte Substitutionsoptionen gesehen werden, sondern eher als Möglichkeit, die Menge der benötigten Li-Ionen-Stromspeicher zu reduzieren. So eignen sich Doppelschichtkondensatoren vor allem zur sehr schnellen Speicherung, etwa bei Spannungsspitzen, was eine Teilaufgabe von Li-Ionen-Batterien ist. Der Fokus liegt neben der Energiespeicherung auf der Netzstabilisation. Dagegen ist die Energiespeicherung mittels Wasserstoff oder Pumpspeicherkraftwerken für lange Zeiträume prädestiniert.

Die darüber hinausgehenden hier identifizierten funktionalen Substitutionen, die auf den übergreifenden Aufbau des Energiesystems zielen, sollen nicht weiter beleuchtet werden. Sie erfordern eine systemische Betrachtung, die im Rahmen dieses Projektes nicht geleistet werden kann.

Tabelle 3-37: Substitutionsansätze für Lithium-Ionen Stromspeicher

Substitutionsebenen	Ansätze
<b>Materialsubstitution</b>	Kupfer durch Aluminium
<b>Technologische Substitution</b>	Blei-Säure-Batterie NiCd-Batterie Natrium-Schwefel-Batterie Redox Flow-Batterie
<b>Funktionelle Substitution</b>	Wasserstoff-Brennstoffzellen (in Kombination mit Elektrolyse) Doppelschichtkondensatoren Pumpspeicherkraftwerke

### 3.5.2.4 Mögliche Effizienzverluste

Effizienzverluste sind bei Bleibatterien zu konstatieren. Im Vergleich zum Li-Ionen-Stromspeicher mit einer Energiedichte von 140 Wh/kg weisen Bleibatterien mit 40 Wh/kg eine drastisch schlechtere Energiedichte auf. Da bei Redox-Flow-Batterien die Löslichkeit der Salze in den Elektrolyten in der Regel nicht sehr groß ist, werden Energiedichten in der Größenordnung der von Bleibatterien erreicht (Wietschel et al. 2010). Für Speicherblöcke auf Basis von NaS oder NaNiCl-Zellen im Bereich einiger 10 bis 100 kWh ergeben sich auf Systemebene gravimetrische Leistungsdichten im Bereich von 120 Wh/kg. Sie sind somit in einer Klasse mit Li-Batterien einzuordnen.

Der Zyklenwirkungsgrad von Li-Ionen-Speichern ist für alle Technologievarianten mit rund 95 % sehr hoch. Auch NaS-Akkus weisen einen hohen Wirkungsgrad von 85-90 % auf. Allerdings müssen sie auf einer Arbeitstemperatur von 300-350 °C gehalten werden, was zusätzliche Heizsysteme bedingt; damit ist der Anwendungsbereich eingeschränkter und es treten bedeutende Heizverluste von 10 – 30 % auf. Redox-Flow-Batterien haben einen etwas geringeren Wirkungsgrad von rund 85 %, weisen jedoch (anders als andere Batterien) keine Selbstentladung auf. (Alotto et al., 2013)

Pumpspeicherkraftwerke haben einen Zykluswirkungsgrad von bis zu 80 % - jedoch treten Verluste nur während Energiespeicherung und –entnahme auf, so dass sie sich besser zur langfristigen Energiespeicherung (saisonal) eignen. Ähnliche Vorteile liefert die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse. Dieser lässt sich entweder in Gasturbinen oder in Wasserstoff-Brennstoffzellen verstromen (Brennstoffzellen mit Leistungen im MW-Bereich sind jedoch mittelfristig nicht verfügbar). Die Speicherdauer und –kapazität ist hier praktisch unbegrenzt. Dafür ist der Gesamtwirkungsgrad im Vergleich sehr gering. (Fraunhofer ISE, 2009)

Doppelschichtkondensatoren weisen Zyklenwirkungsgrade von über 95 % auf.

Tabelle 3-38: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Lithium-Ionen Stromspeicher

Substitutionsebene	Effizienzverluste
<b>Technologische Substitution</b>	
Blei-Säure-Batterie	Schlechterer Zyklenwirkungsgrad
NiCd-Batterie	Schlechterer Zyklenwirkungsgrad
Natrium-Schwefel-Batterien	Vergleichbare Leistungsdichte, leicht geringerer Zyklenwirkungsgrad
Redox-Flow-Batterie	Leicht geringer Zyklenwirkungsgrad
<b>Funktionale Substitution</b>	
Wasserstoff-Brennstoffzellen (in Kombination mit Elektrolyse)	Deutlich schlechterer Zyklenwirkungsgrad, keine Verluste über die Zeit
Doppelschichtkondensatoren	Sehr hohe Leistungsdichte, besserer Zyklenwirkungsgrad
Pumpspeicherkraftwerke	Schlechterer Zyklenwirkungsgrad, keine Verluste über die Zeit

### 3.5.2.5 Mögliche Restriktionen

Die Kosten von Li-Ionen-Batterien liegen deutlich über denen von NaS-Batterien bei derzeit ca. 1.000 EUR/kWh auf Systemebene. Damit sind derzeit alternative Stromspeicher mit 500 bis 800 €/kWh noch deutlich günstiger. Perspektivisch könnte sich dies ändern, erwartet werden Kosten von unter 500 EUR/kWh. Restriktiv wirken sich Leistungsmerkmale und Sicherheitsaspekte aus. Natrium-Ionen-Akkumulatoren haben den Nachteil, dass die eingesetzten Natriumpolysulfide instabil sind. Redox-Flow-Batterien wurden bisher nur bis zum Pilotmaßstab entwickelt. Kanadische, englische und japanische Unternehmen sind hier führend. Nachteilig sind die hohen Kosten. Die Herstellung ist relativ aufwändig. Daher werden die meisten Systeme mit relativ geringer Leistung und hoher Speicherkapazität ausgelegt. Sie kommen daher für Anwendungen in Frage, bei denen eine gleichmäßige Leistung über eine längere Zeit verlangt wird (Mauch et al. 2009).

Wasserstoff-Brennstoffzellen sind nur für geringe Leistungen verfügbar – im MW-Bereich sind sie mittelfristig nicht zu erwarten. Zudem sind ihre Wirkungsgrade sehr gering.

Doppelschichtkondensatoren besitzen eine hohe Leistungs-, aber geringe Energiedichte, weswegen sie sich nur zur kurzzeitigen Energiespeicherung eignen. Der Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken ist durch geographische Gegebenheiten eingeschränkt.

Im Einzelnen wurden folgende Restriktionen identifiziert:

Tabelle 3-39: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Lithium-Ionen Stromspeicher

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Technologische Substitution</b>	
Blei-Säure-Batterie	Niedrige Energiedichte Relativ geringe Lebensdauer Verwendung von Blei (Gefahrgut, in verschiedenen Ländern verboten oder eingeschränkt) Bei fehlerhaftem Betrieb kann Knallgasbildung und damit Explosionsgefahr auftreten Modulare Begrenzung
NiCd-Batterie	Toxizität von Cadmium Modulare Begrenzung
Natrium-Schwefel-Batterie	Instabilität der Natriumpolysulfide Heizverluste je nach Typ 10 – 30 % Durch benötigte Heizung nur für große Anlagen geeignet
Redox-Flow-Batterie	Hohe Kosten
<b>Funktionale Substitution</b>	
Wasserstoff-Brennstoffzellen (in Kombination mit Elektrolyse)	Geringer Wirkungsgrad, hohe Kosten Brennstoffzellen nur für niedrigen Leistungsbereich verfügbar
Doppelschichtkondensatoren	Begrenzte Energiespeicherkapazitäten
Pumpspeicherkraftwerke	Begrenzte Kapazitäten

### 3.5.2.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Die betrachteten Technologien unterscheiden sich hinsichtlich Lebensdauer, Toxizität und Rezyklierbarkeit. Gegenüber Li-Ionen-Stromspeicher zeichnet sich die Redox-Flow-Technologie durch eine hohe Lebensdauer aus. Eine erprobte Variante ist die Vanadium-Redox-Batterie. Die Vanadium-Lösungen sind voll recycelbar. Natrium-Schwefel-Akkumulatoren besitzen eine Lebensdauer von über 15 Jahren. Bleiakumulatoren im stationären Einsatz erreichen eine Lebensdauer von bis zu 12 Jahren. Die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien ist stark abhängig vom Ladeverhalten und den Lagerungsbedingungen, kann aber auch heutzutage schon bis zu 20 Jahre betragen. (Wietschel, Ullrich, Markewitz, Schulte, & Genoese, 2015)

Ökologisch nachteilig ist die Verwendung von Blei und Cadmium in Blei-Akkumulatoren bzw. NiCd-Speicher. Beide Stoffe sind hoch toxisch. Sowohl Blei-Akkumulatoren als auch NiCd-Stromspeicher können aber technisch gut recycelt werden.

Tabelle 3-40: Ökologische Aspekte verschiedener chemischer Technologien (Substitutionsoptionen für Lithium-Ionen Stromspeicher)

Umweltaspekte	Li-Ionen	Blei-Säure	NiCd	Natrium-Schwefel	Redox flow
Lebensdauer	hoch	gering		hoch	hoch
Toxizität	gering	Blei	Cadmium		gering
Recyclierbarkeit	gering	hoch	hoch		hoch

Quelle: Wietschel 2015, IZT

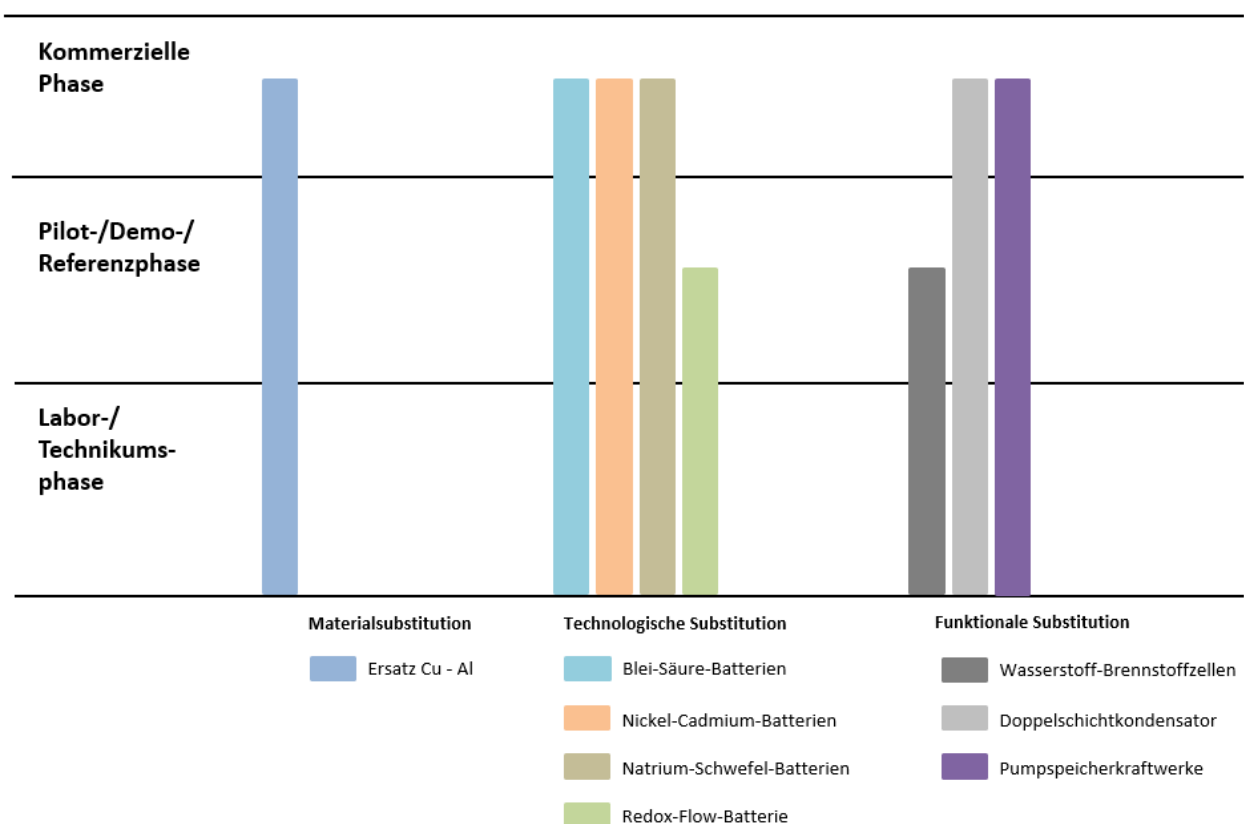
Pumpspeicherkraftwerke haben einen hohen Flächenbedarf; der Eingriff in die Natur geht immer mit einer Zerstörung von Lebensraum einher.

### 3.5.2.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Die hier betrachteten technologischen Substitutionsmöglichkeiten sind kommerziell im Einsatz. Die Einsatzfähigkeit von Redox-Flow-Batterien im stationären Bereich wurde demonstriert. Um auf dem Markt konkurrenzfähig zu sein, müssen vor allem die Kosten noch weiter gesenkt werden.

Auch Pumpspeicherkraftwerke und Doppelschichtkondensatoren sind marktreif. Wasserstoffbrennstoffzellen und Elektrolyse werden in einigen Anwendungen ebenfalls kommerziell eingesetzt, jedoch sind Brennstoffzellen im Leistungsbereich von MW auch mittelfristig nicht verfügbar.

Abbildung 3.9: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Lithium-Ionen-Stromspeicher



Quelle: IZT



### 3.5.2.8 Fazit und Ausblick

Li-Ionen Batterien in stationären Stromspeichern eignen sich insbesondere als kurzzeitiger Leistungspuffer. Sie werden derzeit vor allem mit vergleichsweise geringen Kapazitäten (wenige kWh) u.a. zur Pufferung von Photovoltaik-Strom und zur unterbrechungsfreien Stromversorgung angeboten. Redox-Flow-Batterien erscheinen als die erfolgversprechendste Alternative zu Li-Ionen-Batterien im Bereich der stationären Energiespeicher. Aufgrund der hohen Zyklenzahl und der Skalierbarkeit der Kapazität sind Vanadium-Batterien als Stromspeicher zur Netzeinbindung erneuerbarer Energie geeignet. Derzeit weisen sie jedoch noch hohe Kosten auf. Ihre Verbreitung hängt außerdem von Fortschritten bei der Energie- und Leistungsdichte ab. Das Forschungsfeld entwickelt sich insgesamt dynamisch. So werden derzeit zahlreiche weitere Speichertechniken auf ihre Eignung als stationärer Speicher untersucht. Teils sind diese Konzepte sehr alt, teils noch im Stadium der Grundlagenforschung. Langfristig deuten sich konkurrenzfähige Alternativen an, insbesondere Metall-Luft- (Lithium-Luft, Zink-Luft, Mg-Luft, Al-Luft etc.)-Systeme und Lithium-Schwefel-Zellen.

Die funktionalen Substitutionen stellen alle keine direkte Substitutionsmöglichkeit für stationäre Lithium-Ionen-Speicher dar; inwieweit sie den Verzicht auf diese ermöglichen könnten, müsste eine systemische Betrachtung erweisen.

### 3.5.2.9 Literatur

- Alotto et al, 2013: Redox flow batteries for the storage of renewable energy. P.Alotto, M.Guarnieri, F.Moro. 2013
- Battery University 2010: Can the Lead-acid Battery Compete in Modern Times?, [http://batteryuniversity.com/learn/archive/can the lead acid battery compete in modern times](http://batteryuniversity.com/learn/archive/can_the_lead_acid_battery_compete_in_modern_times)
- EU 2016: Materials Information System. Institute for energy and Transport (EIT). European Commission. 2016
- DKG 2014: Deutsche Keramische Gesellschaft, Zukunftspotenziale von Hochleistungskeramiken, [http://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/startseite/downloads/expertenstudie\\_05\\_14.pdf](http://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/startseite/downloads/expertenstudie_05_14.pdf)
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. 2014 (Hrsg.):Einsatz an stationären Lithium-Solarstromspeichern , [http://www.dguv.de/medien/inhalt/praevention/fachbereiche/fb-fhb/documents/li\\_solar.pdf](http://www.dguv.de/medien/inhalt/praevention/fachbereiche/fb-fhb/documents/li_solar.pdf)
- B.Diouf, R.Pode 2014: Potential of lithium-ion batteries in renewable energy.
- Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. Materials Today. 2016
- EASE o.J.: Electrochemical Energy Storage - Sodium-Sulphur (NaS) battery. European Association for Storage of Energy, o.J., [http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE\\_TD\\_NaS.pdf](http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_NaS.pdf)
- ESA o.J.: Sodium Sulfur (NAS) Batteries. Energy storage association. <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/sodium-sulfur-nas-batteries>
- EY 2013: The rising threat of substitution. Mining & Metals. Ernst & Young. 2013
- Fraunhofer ISE 2009: Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie - Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie, Abschlussbericht. Fraunhofer ISE, Fraunhofer AST, VKPartner.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2009, Stationärer und mobiler Einsatz, München, [https://www.ffe.de/download/Veroeffentlichungen/2009\\_VDIFulda\\_paper\\_mauch\\_mezger\\_staudacher.pdf](https://www.ffe.de/download/Veroeffentlichungen/2009_VDIFulda_paper_mauch_mezger_staudacher.pdf)
- IEC 2011: Electrical Energy Storage – White Paper. International Electrotechnical Commission. 2011
- IRENA. (2015). Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook.
- Kostka, J. 2015: Energiewende vor Ort: Boschs Erfahrungen mit Energiespeichern, [https://www.hs-karlsruhe.de/fileadmin/hska/EIT/Aktuelles/seminar\\_erneuerbare\\_energien/Sommer\\_2015/Folien/2015\\_06\\_17\\_FH\\_Karlsruhe\\_Bosch\\_Speicher\\_Kostka\\_Druckversion.pdf](https://www.hs-karlsruhe.de/fileadmin/hska/EIT/Aktuelles/seminar_erneuerbare_energien/Sommer_2015/Folien/2015_06_17_FH_Karlsruhe_Bosch_Speicher_Kostka_Druckversion.pdf)
- Lücke et al. 2013: Vergleich von Werkstoffen auf Basis von Cu und Al sowie Trends bei deren Anwendung in der Elektroenergie-technik. Lücke, N.; Schlegel, S.; Großmann, S. in: METALL, 11/2013
- Mauch, W.; Mezger, T.; Staudacher, T.: 2009, Anforderungen an elektrische Energiespeicher



Wietschel, M., Ullrich, S., Markewitz, P., Schulte, F., & Genoese, F. (2015). *Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*. Wiesbaden: 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](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf)

Experten:

M.Sc. Christian Clemm. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM

### 3.6 Technologiegruppe Solartechnologien

Die Technologiegruppe der Solartechnologien umfasst die Dünnschicht-Solarzellen (UT Nr. 87), Tandemzellen (UT Nr. 90) und die CSP-Technologie (UT Nr. 93).

#### 3.6.1 Dünnschicht-Solarzellen (UT Nr. 87)

Dünnschichtzellen bestehen aus photoaktiven Halbleitern, die als dünne Schichten auf ein Trägermaterial aufgedampft werden. Zu den kritischen Rohstoffen zählen Indium (Platz 7) und Gallium (Platz 9). Sie werden in Form von Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selen-Verbindungen, den so genannten CIGS- bzw. CIS-Zellen eingesetzt, wobei hier je nach Zelltyp S für Schwefel oder Selen stehen kann. Silizium, das im Ranking auf Platz 18 eingestuft wurde, findet sich in Dünnschichtzellen aus amorphem Silicium (a-Si:H) oder mikrokristallinem Silicium ( $\mu\text{c-Si:H}$ ). Substitutionsmöglichkeiten sind bis dato kein Thema, im Gegenteil werden siliziumbasierte Photovoltaik-Technologien als Alternative für Indium- und Gallium-basierte Zelltypen angesehen, weil bei Silizium aufgrund des hohen Anteils in der Erdkruste keine unmittelbare Verknappung zu erwarten ist (Schriebl, Brucker 2016). Im Folgenden werden die Substitutionspotentiale für Indium und Gallium ermittelt.

##### 3.6.1.1 Materialsubstitution

**Indium** wird als Halbleitermaterial in CIS/CIGS-Dünnschichtzellen eingesetzt. Der namensgebende Halbleiter  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (Kupfer-Indium/Gallium-Diselenid) und  $\text{CuInS}_2$  (Kupfer-Indium-Disulfid) wird auch als Absorber bezeichnet, da hier ein Großteil des eingestrahnten Lichts aufgenommen wird. Der spezifische Indiumbedarf liegt bei 55,5 t/GWp für CIS/CIGS-basierte Zellen. Ein Ersatz von Indium ist partiell durch Gallium (KfW, 2011) möglich. Gemäß PVS (o.J.) wird Indium wegen seiner Seltenheit zunehmend durch Gallium ersetzt, das allerdings ebenfalls selten ist. Da Gallium selbst zu den kritischen Stoffen zählt, bietet diese Möglichkeit keine wirkliche Verringerung der Kritikalität, sie würde nur verlagert. Indium ist damit im Halbleiter im Sinne dieses Projekts nicht substituierbar.

Indium wird außerdem in Form von Indiumzinnoxid (ITO, indium tin oxide) als transparentes leitfähiges Oxid (transparent conducting oxide TCO) genutzt. ITO ist ein halbleitender, im sichtbaren Licht weitgehend transparenter Stoff. Es ist ein Mischoxid, üblicherweise aus 90 % Indium(III)-oxid ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) und 10 % Zinn(IV)-oxid ( $\text{SnO}_2$ ). TCOs, die ITO nutzen werden in verschiedenen Solarzelltypen eingesetzt. Bei a-Si-Zellen liegt der spezifische Materialbedarf für Indium bei 4 t/GWp, für Cd-Te-Zellen bei 15,5 t/GWp. Eine Alternative für ITO sind Polymerfolien mit transparenter, leitfähiger Beschichtung auf Basis von Fluor- oder Aluminium-dotiertem Zinndioxid (FTO/ATO). Ein solches Material hat das Potential, ITO-beschichtete Folien zu substituieren (IWS o.J.). Ein anderer Ansatz wäre die Verwendung von Silber-Nanodrähten. Das Wuppertal-Institut (Wuppertal Institut, 2014) geht davon aus, dass bis 2025 TCOs für die Photovoltaik durch die Verwendung von fluordotiertem Zinnoxid (FTO) oder aluminiumdotiertem Zinkoxid (AZO) Indium-frei gefertigt werden.

**Gallium** wird als Halbleitermaterial in Kombination mit Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid bei CIGS Zellen und in Galliumarsenid-Zellen (GaAs) eingesetzt. Der spezifische Materialbedarf liegt bei CIGS Zellen bei 7,2 t Gallium/GWp. Gallium könnte partiell durch Indium ersetzt werden (KfW 2011). Da aber auch Indium ein kritischer Stoff ist, kann dies keinesfalls als geeignetes Substitut angesehen werden. Andere Alternativen sind nicht bekannt.

**Kupfer** wird als Stromleiter verwendet. In dieser Funktion könnte es durch Aluminium ersetzt werden. Es besitzt jedoch eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit. Da sich zudem Kupfer leicht rückgewinnen lässt und nicht übermäßig kritisch ist, wird eine Substitution in der Praxis nicht diskutiert.

### 3.6.1.2 Technologische Substitution

Als alternative Halbleitermaterialien kommen mikrokristallines Silizium ( $\mu\text{c-Si:H}$ ), amorphes Silizium ( $\text{a-Si}$ ), Cadmiumtellurid ( $\text{CdTe}$ ) und Kupfer-Zink-Zinnsulfid ( $\text{CZTS}$ ) in Betracht.

Amorphes Silizium ist ein gängiges Material für Dünnschichtzellen. Der Absorber ist indiumfrei. Bei amorphem Silizium ( $\text{a-Si:H}$ ) sind die Siliziumatome nicht regelmäßig, sondern in einem ungeordneten Netzwerk angeordnet, welches rund 10 % Wasserstoffatome enthält. Amorphe Siliziumzellen benötigen Indium lediglich für die ITO-Schicht auf den Zellen. Die  $\text{a-Si}$ -Dünnschichtphotovoltaik kommt daher mit 4 t/GWp Indium für ITO aus. Gallium wird nicht eingesetzt. Kritische Stoffe sind daher nicht oder im Fall von Indium in deutlich geringerem Maße als bei CIS/CIGS-Dünnschichtzellen enthalten.

Mikrokristallines Silizium ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) ist eine Mischung aus sehr kleinen Siliziumkristallen und amorphem Silizium. Mikrokristallines Silizium wird auch in Kombination mit amorphem Silizium als Tandemzelle eingesetzt. Als Basismaterial der p-i-n oder n-i-p Schichtfolgen dienen  $\text{a-Si:H}$  und  $\mu\text{c-Si:H}$ -Schichten mit einer Bandlücke von etwa 1,8 und 1,1 eV. Indium wird auch hier als ITO eingesetzt.

Eine weitere Alternative, die ohne Indium und Gallium auskommt, stellt die  $\text{CdTe}$ -Technologie dar; diese ist momentan Marktführer der Dünnschichttechnologien. Eine  $\text{CdTe}$  Solarzelle besteht typischerweise aus fünf Einzelschichten: einer ca. 8  $\mu\text{m}$  dicken  $\text{CdTe}$ -Absorberschicht, einer ca. 100 nm dicken  $\text{CdS}$ -Zwischenschicht sowie 20 bzw. 100 nm dicken Tellur- und Antimontellurid ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ )-Schichten.

Als Indium-freies Absorbermaterial kommt zudem Kupfer-Zink-Zinnsulfid ( $\text{CZTS}$  - copper, zinc, tin, sulfur) in Frage.

### 3.6.1.3 Funktionale Substitution

Es existieren eine Reihe verschiedener Solarzelltypen und Verfahren, die funktional als Alternative zur Dünnschichttechnologie zur Gewinnung von Strom aus der Sonnenenergie genutzt werden können. Die auf Silizium-Wafern basierte Dickschichttechnologie stellt den traditionellen Zelltyp dar, welcher heute ca. 85 % des weltweiten Photovoltaikmarktes ausmacht. Ausgangsprodukt für die Fertigung von kristallinen Solarzellen sind säulen- bzw. quaderförmige Ingots (Barren) aus Silizium, das mit Materialien wie Phosphor oder Aluminium angereichert wird, um die Leitfähigkeit zu verbessern. Monokristalline Solarzellen ( $\text{c-Si}$ ) bestehen aus nur einem einzigen Kristall, bei polykristallinen Zellen entstehen während des Gieß- oder Bridgeman-Verfahrens mehrere Kristalle. Dieser Zelltyp, der im Besonderen auf das sogenannte Solargrade-Silizium ( $\text{SoG-Si}$ ) als Ausgangsmaterial angewiesen ist, verfügt heute über weitgehend fortgeschrittene industrielle Herstellungsprozesse. Durch zahlreiche technische Neuerungen und Verbesserungen konnte in den letzten Jahren der Wirkungsgrad der Solarzellen kontinuierlich erhöht und die Energierücklaufzeit verbessert werden.

Neben etablierten Technologien befinden sich neue Photovoltaiktechnologien in Entwicklung. Zu ihnen gehören sehr unterschiedliche neue Technologien, die auf dem Markt noch keine so große Rolle spielen, darunter nano-kristalline Silizium- ( $\text{nc-Si}$ ), Farbstoff- (DSC), Polymer- (PSC) bzw. Organische (OPV), Konzentrator- (CSC), Multijunction- und Quantenpunkt- (QSC) Solarzellen. Sie stellen bisher keine Alternative zur Dünnschicht-PV dar, da sich die Anwendungsbereiche deutlich unterscheiden. So werden Konzentratorzellen mit Spiegelsystemen in zentralen Anlagen genutzt. Das Potential der organischen Photovoltaik liegt eher im Bereich flexibler Folien oder großflächiger

Fassadenbeschichtungen. Damit könnte eher ein neuer Anwendungsbereich erschlossen werden, weniger eine Substitution von indium- und/oder galliumhaltigen Dünnschicht-Solartechnologien.

Tabelle 3-41: Substitutionsansätze für Dünnschicht-Solarzellen

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsubstitution	Partieller Ersatz von Indium durch Gallium Partieller Ersatz von Gallium durch Indium Substitution von Indium aus ITOs: z.B. Polymerfolien mit transparenter, leitfähiger Beschichtung auf Basis von fluor-dotiertem Zinndioxid (FTO)
Technologische Substitution	Amorphes Silizium (a-Si:H) Mikrokristallines Silizium ( $\mu$ c-Si:H) CdTe-Solarzelle CZTS-Zelle (copper, zinc, tin, sulfur)
Funktionelle Substitution	Kristalline Silizium-Zellen (c-Si)

#### 3.6.1.4 Mögliche Effizienzverluste

Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung von Substitutionsmöglichkeiten für Materialien der Dünnschicht-Photovoltaik ist der Wirkungsgrad der Zellen.

Die klassischen Silizium-basierten Dickschichtzellen erreichen sowohl im Labor, als auch in der Praxis momentan die höchsten Wirkungsgrade (abgesehen von Tandemzellen). Allerdings sind für diese Technologie keine weitreichenden Effizienzsteigerungen mehr zu erwarten: Der maximale theoretische Wirkungsgrad liegt bei 29 %, langfristig wird ein Modulwirkungsgrad von etwa 26 % erwartet (Bine 2011). Auch CdTe-Zellen liegen schon nahe am theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad von 20 %. CI(G)S-Zellen könnten dagegen einen Wirkungsgrad von über 30 % erreichen; Laborwirkungsgrade liegen heutzutage bei rund 22 %. CZTS-Zellen erreichen nach Herstellerangaben Laborwirkungsgrade von 12,6 %. Auch für diesen Zelltyp sind noch deutliche Effizienzsteigerungen möglich.

Mögliche Effizienzverluste, die sich durch die Substitution kritischer Rohstoffe durch Alternativen ergeben, sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-42: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Dünnschicht-Solarzellen

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsubstitution</b>	
Partieller Ersatz von Indium durch Gallium	Keine
Partieller Ersatz von Gallium durch Indium	Geringere Effizienz
Substitution von Indium aus ITOs	Angestrebte relative Effizienzgewinne von 2 %
<b>Technologische Substitution</b>	
Amorphes Silizium (a-Si:H)	Deutliche Effizienzverluste
Mikrokristallines Silizium ( $\mu$ c-Si:H)	Keine Effizienzverluste
CdTe-Solarzelle	Keine Effizienzverluste
Indium-freie Absorbermaterialien	Deutliche Effizienzverluste

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
CZTS (copper, zinc, tin, sulfur)	
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Kristalline Zellen	Wirkungsgrad höher: 24,7 % (bei CIS: 12-19 %), Einbußen bei diffusem Licht, sehr hohe Leistung, stabil, hohe Lebensdauer

Quellen: INREP 2016

### 3.6.1.5 Mögliche Restriktionen

Die Substitutionsmöglichkeiten stoßen auf folgende Restriktionen:

Tabelle 3-43: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Dünnschicht-Solarzellen

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materials substitution</b>	
Partieller Ersatz von Indium durch Gallium	Höhere Kosten und höhere Versorgungskritikalität
Partieller Ersatz von Gallium durch Indium	Effizienzverluste
Substitution von Indium aus ITOs	Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von FTO benötigt Abscheidetemperatur > 350 °C Direkte Applikation auf Polymerfolien bis dato nicht machbar
<b>Technologische Substitution</b>	
Amorphes Silizium (a-Si:H)	Derzeit schlechter Wirkungsgrad
Mikrokristallines Silizium ( $\mu$ c-Si:H)	Derzeit schlechter Wirkungsgrad
CdTe-Solarzelle	Keine weiteren Verbesserungen des Wirkungsgrades möglich.
Indium-freie Absorbermaterialien CZTS (copper, zinc, tin, sulfur)	Geringerer Wirkungsgrad
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Kristalline Zellen	keine

In Anwendungen, in denen die verfügbare Fläche keine Restriktion darstellt, gewinnt der massenbezogene Wirkungsgrad an Bedeutung. Dieser ist für Dünnschichtzellen sehr hoch: a-Si-Zellen benötigen beispielsweise 37 g Silizium zur Erzeugung einer Leistung von 1 kWp (c-Si: 6000 g/kWp). Für begrenzte Flächen wie beispielsweise Hausdächer ist jedoch der flächenbezogene Wirkungsgrad bedeutender; daher ist davon auszugehen, dass kristalline Silizium-Zellen diesen Bereich auch in Zukunft dominieren werden.

### 3.6.1.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Auf der Ebene der Materials substitution sind keine besonderen ökologischen Vor- oder Nachteile durch Substitution von Indium und Gallium erkennbar. Auf der Ebene technologischer Substitutionen sind Cadmiumtellurid-Solarzellen ökologisch nachteilig. Cadmium ist ein toxisches Element, das nicht in die Natur oder in Lebensmittel gelangen darf; in Solarzellen eingesetzt liegt das Schwermetall in Form der chemisch stabilen Cadmiumtellurid-Verbindung vor. Ein konsequentes Recycling mit geschlossenen Stoffkreisläufen ist unabdingbar, um zu verhindern, dass cadmiumhaltige Photovoltaik-Module unsachgemäß entsorgt und in den lokalen Abfallstrom gelangen. Auch dann bestehen jedoch Bedenken im Hinblick auf Unfälle, wie beispielsweise Häuserbrände.

Alternative Dünnschichttechnologien auf Basis amorphem oder kristallinem Siliziums sind verglichen mit GIS/CIGS-Solarzellen (und mehr noch mit kristallinen Silizium-Zellen) dadurch gekennzeichnet, dass ihr Wirkungsgrad geringer ist, wodurch ggf. ein höherer Flächenbedarf entsteht. Bezüglich der funktionellen Substitution weisen kristalline Silizium-Zellen einen hohen Wirkungsgrad auf, sind aber deutlich materialintensiver.

Tabelle 3-44: Dünnschichttechnologien a-Si, CIGS und CdTe

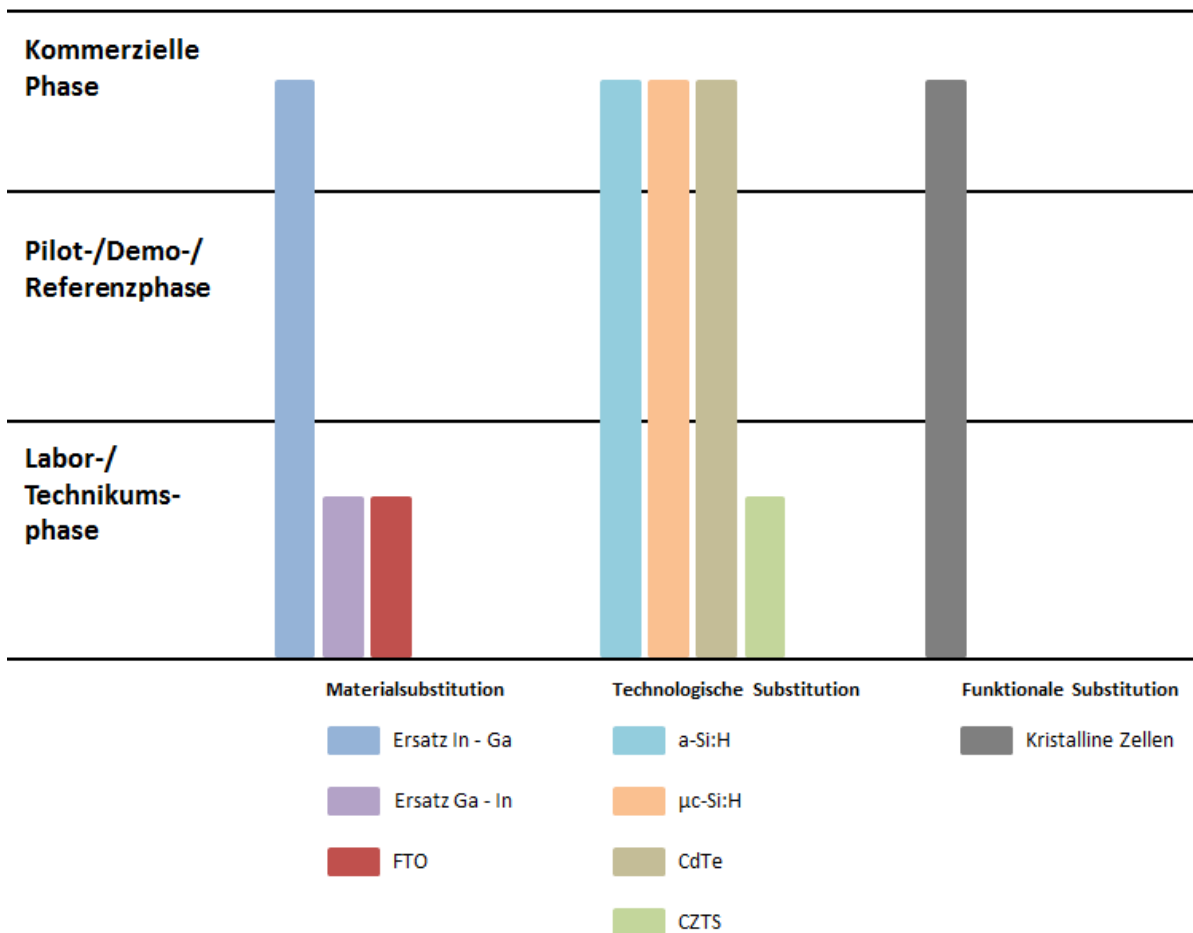
	CI(G)S	CdTe	a-Si	CZTS	Mono-Si
Laborwirkungsgrad	19,8 %	19,6 %	13,4 %	12,6 %	25 %
Potential für Effizienzsteigerungen	Hoch	Sehr gering	Hoch	Hoch	Gering
Lebensdauer		>20 Jahre	<20 Jahre		25-30 Jahre, stabil
Umweltaspekte	Auch bei schlechten Lichtverhältnissen und hohen Temperaturen hoher Wirkungsgrad	Cadmium ist toxisch	Auch bei schlechten Lichtverhältnissen und hohen Temperaturen hoher Wirkungsgrad		

Quelle: IZT

### 3.6.1.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Der technologische Reifegrad der verschiedenen Substitutionsansätze ist sehr unterschiedlich, wie folgende Abbildung zusammenfassend zeigt.

Abbildung 3.10: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Dünnschicht-Solarzellen



Quelle: IZT

Die Substitution von Gallium durch Indium in CIGS-Zellen ist möglich, geht jedoch noch mit deutlichen Einbußen bei den Wirkungsgraden einher. Auch die Entwicklung von Indium-freien TCOs steht noch am Anfang. Eine Demonstration der Technologie im Industriemaßstab steht noch aus.

Auf dem Markt sind konkurrierende Dünnschichttechnologien zu finden. Ausgereift sind CdTe-Zellen, für die keine weiteren Wirkungsgradsteigerungen mehr erwartet werden. Auch a-Si- und μc-Si-Zellen werden erfolgreich eingesetzt, weitere Effizienzsteigerungen zeichnen sich ab. Bei CZTS-Zellen ist hingegen noch nicht abzusehen, ob sie in Zukunft eine nennenswerte Rolle spielen werden.

Silizium-basierte Dickschichtzellen sind ausgereift. Es werden keine größeren Wirkungsgradsteigerungen mehr erwartet; beim Materialeinsatz zeichnen sich Effizienzsteigerungen ab.

### 3.6.1.8 Fazit und Ausblick

Bisher bestehen keine ausgereiften Möglichkeiten, Indium und Gallium auf Materialebene zu substituieren. Dies gilt sowohl für ITO, wo Indium als Leitmaterial eingesetzt wird, als auch für indiumhaltige Absorber. CZTS, das eine mögliche Alternative der Halbleiter darstellt, befindet sich in der Entwicklung. Das Potential dieser Technologielinie kann jedoch noch nicht genau abgesehen werden. Klarer ist das Substitutionspotential bei der Dünn- und Dickschichtphotovoltaik, die auf Silizium basiert. Beide Technologien sind etabliert. Die Aufgaben liegen hier u.a. in der Verbesserung der Wirkungsgrade bei der Dünnschicht-, bei der Dickschichttechnologie in der Verringerung der Materialintensität.

### 3.6.1.9 Literatur

Bine 2011: Photovoltaik – Innovationen, Verlustmechanismen begrenzen den Wirkungsgrad,

<http://www.bine.info/publikationen/themeninfos/publikation/photovoltaik-innovationen/verlustmechanismen-begrenzen-den-wirkungsgrad/>

INREP 2016: Towards Indium free TCOs, [http://www.inrep.eu/files/leaflet %20& %20poster/INREP\\_Leaflet\\_20160517.pdf](http://www.inrep.eu/files/leaflet%20%20poster/INREP_Leaflet_20160517.pdf)

IWS, o.J.: SubITO – Entwicklung eines Schichttransfer-Verfahrens für die Substitution von Zinn-dotiertem Indiumoxid (ITO) durch Fluor-dotiertes Zinndioxid (FTO) in leitfähigen, transparenten Polymerfolien,

[http://www.iws.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/chemische\\_oberflaechen\\_reaktionstechnik/chemische\\_oberflaechentechnologie/projekte/subito.html](http://www.iws.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/chemische_oberflaechen_reaktionstechnik/chemische_oberflaechentechnologie/projekte/subito.html)

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

PVS, o.J.: CIS/CIGS – Dünnschichtmodule auf dem Weg, <http://www.photovoltaiksolarstrom.de/photovoltaiklexikon/cis-cigs>,

Schriebl, Brucker 2016: Schriebl, E.; Brucker, M.: Bedarf an Metallen für eine globale Energiewende bis 2050 – Diskussion möglicher Versorgungsgrenzen, in: Andreas Exner, Martin Held, Klaus Kümmerer, Herausgeber: Kritische Metalle in der Großen Transformation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Wuppertal Institut, 2014: Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/KRESSE\\_Endbericht.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf)

### 3.6.2 Tandemzellen (UT Nr. 90)

In Tandemzellen können verschiedene Kombinationen von Halbleitern zum Einsatz kommen, die auch in der Dünnschicht-Photovoltaik Verwendung finden. Der Quasi-Industriestandard ist eine Dreifach-solarzelle aus GaInP/GaInAs/Ge, die hier als Referenzzelle angenommen wird (Fraunhofer ISE, 2015); aber auch Silizium-basierte Halbleiter können eingesetzt werden. Während letzteres als nicht sehr kritisch gesehen wird, sondern im Gegenteil eher eine langfristige Substitutionsmöglichkeit für andere Halbleitertypen darstellt, sind Indium (Platz 7) und Gallium (Platz 9) substitutionsrelevante Rohstoffe. Hinzu kommt Silber, das für die Beschichtung der Spiegel verwendet wird.

#### 3.6.2.1 Materialsubstitution

**Indium** kann als Halbleiter partiell durch **Gallium** ersetzt werden (KfW, 2011). Da Gallium jedoch ebenfalls zu den kritischen Rohstoffen zählt, wird die Problematik dadurch nur verlagert. Eine vollständige Substitution erscheint nicht möglich.

Indium wird außerdem in Form von Indiumzinnoxid (ITO, Indium Tin Oxide) als transparentes leitfähiges Oxid (Transparent Conducting Oxide TCO) genutzt. Eine Alternative für ITO sind Polymerfolien mit transparenter, leitfähiger Beschichtung auf Basis von Fluor- oder Aluminium-dotiertem Zinndioxid (FTO/ATO). Ein solches Material hat das Potential, ITO-beschichtete Folien zu substituieren. (IWS o.J.) Ein anderer Ansatz wäre die Verwendung von Silber-Nanodrähten. (Wuppertal Institut, 2014) geht davon aus, dass bis 2025 TCOs für die Photovoltaik durch die Verwendung von fluordotiertem Zinnoxid (FTO) oder aluminiumdotiertem Zinkoxid (AZO) Indium-frei gefertigt werden.

**Silber** wird für die Beschichtung der Spiegel eingesetzt. Prinzipiell ist die Herstellung der Spiegel aus eloxiertem Aluminium anstelle von Silber möglich.

**Kupfer** wird als Stromleiter verwendet. In dieser Funktion könnte es durch Aluminium ersetzt werden, das jedoch eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit besitzt. Da sich zudem Kupfer leicht zurückgewinnen lässt und nicht übermäßig kritisch ist, wird eine Substitution nicht diskutiert.



### 3.6.2.2 Technologische Substitution

Tandemzellen können aus verschiedensten Halbleitern zusammengesetzt werden. Alternativ können insbesondere Silizium-basierte Halbleiter eingesetzt werden, die so dotiert sind, dass sie verschiedene Bandbreiten der einfallenden Strahlung absorbieren. Verwendet wird häufig eine Kombination aus amorphem und mikrokristallinem Silizium. Indium wird auch hier als ITO verwendet. Eine andere Möglichkeit ist eine Tandemstruktur aus Silizium und Perowskit, einem häufig vorkommenden Mineral (Welt der Physik, 2016).

### 3.6.2.3 Funktionale Substitution

Neben der konzentrierenden Photovoltaik gibt es eine Reihe an Technologien zur Energiegewinnung aus Solarstrahlung. CPV-Anlagen (Tandemzellen in konzentrierender PV) sind generell zentrale Anlagen, die in sonnenreichen Regionen mit hoher Solarstrahlung errichtet werden.

**Solarthermische Kraftwerke (CSP)** bedienen ein sehr ähnliches Marktsegment, nutzen jedoch nicht den photovoltaischen Effekt, sondern erhitzen einen Wärmeträger, der einen Wärmekreislauf antreibt. Im Gegensatz zu CPV-Anlagen können sehr leicht Wärmespeicher integriert werden, die auch Schwankungen über Nacht ausgleichen können.

**Silizium-basierte Dickschicht-Photovoltaik (c-Si)** kann in Form von Solarfarmen eingesetzt werden, stellt aber keine direkte Substitutionsmöglichkeit für CPV dar.

Tabelle 3-45: Substitutionsansätze für Tandemzellen

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsubstitution	Substitution von Indium aus ITOs: z.B. Polymerfolien mit transparenter, leitfähiger Beschichtung auf Basis von fluor-dotiertem Zinndioxid (FTO) Substitution von Silber in den Spiegeln durch Aluminium
Technologische Substitution	Kombination aus a-Si und $\mu$ c-S Kombination aus Si und Perowskit
Funktionelle Substitution	Solarthermische Kraftwerke (CSP) Kristalline Silizium-Zellen (c-Si)

### 3.6.2.4 Mögliche Effizienzverluste

Die Substitution von Indium in ITOs ist auch für andere PV-Technologien von Bedeutung. Für die Anwendung in der Dünnschicht-Photovoltaik erwartet (INREP 2016) dadurch relative Effizienzgewinne von 2 %.

Die Substitution von Silber geht mit einem Wirkungsgradverlust einher, da die Reflektionseigenschaften der Spiegelsysteme herabgesetzt werden. Für CSP-Anlagen beziffern Phil et al. die Verringerung des Wirkungsgrades auf etwa 5 % (Pihl et al. 2012). In derselben Größenordnung dürften sich die Wirkungsverluste bei CPV-Anlagen bewegen.

Der Einsatz Silizium-basierter Halbleiter an Stelle der GaInP/GaInAs/Ge-Referenzzelle würde mit deutlichen Verlusten einhergehen. Der sich ergebende Wirkungsgrad hängt neben dem Halbleitermaterial jedoch von der Konzentration und der Auslegung der Zelle ab, so dass er hier nicht genau quantifiziert werden kann. Auch die Kombination einer Siliziumzelle mit einem Perowskit-Halbleiter bringt (gemessen an den Wirkungsgradrekorden anderer Tandemzellen von 46 %) nur eine geringe Steigerung des Wirkungsgrades; dafür ist dieser Zelltyp vergleichsweise sehr günstig.

Zwar weisen Tandemzellen eine sehr viel höhere Effizienz auf, sind jedoch auf Spiegelsysteme angewiesen, die den flächenbezogenen Systemwirkungsgrad deutlich senken. Auch der Vergleich mit



solarthermischen Kraftwerken gestaltet sich schwierig. Diese haben die Möglichkeit, sehr einfach thermische Energiespeicher zu integrieren, so dass Schwankungen im Tagesverlauf deutlich reduziert werden können. In der Praxis spielen CSP-Anlagen eine deutlich wichtigere Rolle als CPV-Anlagen.

Tabelle 3-46: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für Tandemzellen

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsstitution</b>	
Substitution von Indium aus ITOs	Angestrebte relative Effizienzgewinne von 2 %
Substitution von Silber in den Spiegeln durch Aluminium	5 %ige Abnahme der Kollektorfeld-Effizienz
<b>Technologische Substitution</b>	
Silizium (a-Si und $\mu$ c-Si)	Deutliche Effizienzverluste
Silizium und Perowskit	Deutliche Effizienzverluste
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Kristalline Zellen	-
Solarthermische Kraftwerke (CSP)	-

### 3.6.2.5 Mögliche Restriktionen

Die Substitution von Indium in ITOs hängt im Wesentlichen von technischen Fortschritten ab. Ähnliches gilt für die technologischen Substitutionsmöglichkeiten: Hier sind die erreichbaren Wirkungsgrade noch gering. Zudem haben Tandemzellen aus Silizium und Perowskit eine noch geringere Lebensdauer (Welt der Physik 2016).

Wie CPV-Anlagen auch sind CSP-Anlagen auf Regionen mit hoher Normalstrahlung beschränkt. In diesen Regionen werden auch Solarfarmen auf Basis der c-Si-Photovoltaik errichtet. CSP-Anlagen können ihren Wirkungsgrad noch weiter steigern, wenn die Nutzung der Abwärme möglich ist.

Tabelle 3-47: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für Tandemzellen

Substitutionsebene	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
Substitution von Indium aus ITOs	Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von FTO benötigt Abscheidetemperatur > 350 °C Direkte Applikation auf Polymerfolien bis dato nicht machbar
Ersatz von Silber durch Aluminium	Kosten
<b>Technologische Substitution</b>	
Silizium (a-Si und $\mu$ c-Si)	Geringerer Wirkungsgrad
Silizium und Perowskit	Geringerer Wirkungsgrad, niedrigere Lebensdauer
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Kristalline Zellen	-
Solarthermische Kraftwerke (CSP)	Kosten

### 3.6.2.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Perowskit-Halbleiter sind noch auf das Schwermetall Blei angewiesen. Forschungsbemühungen zielen auf die Entwicklung Blei-freier Perowskit-Halbleiter (Welt der Physik 2016). Sowohl CPV-, als auch CSP-Anlagen sind zentrale Anlagen mit einem hohen Flächenbedarf. Zudem müssen die Spiegelsysteme regelmäßig gereinigt werden und insbesondere CSP-Anlagen gekühlt werden; hierfür werden teilweise große Mengen an Wasser benötigt, was insbesondere in trockenen, sonnenreichen Regionen ein Problem darstellen kann.

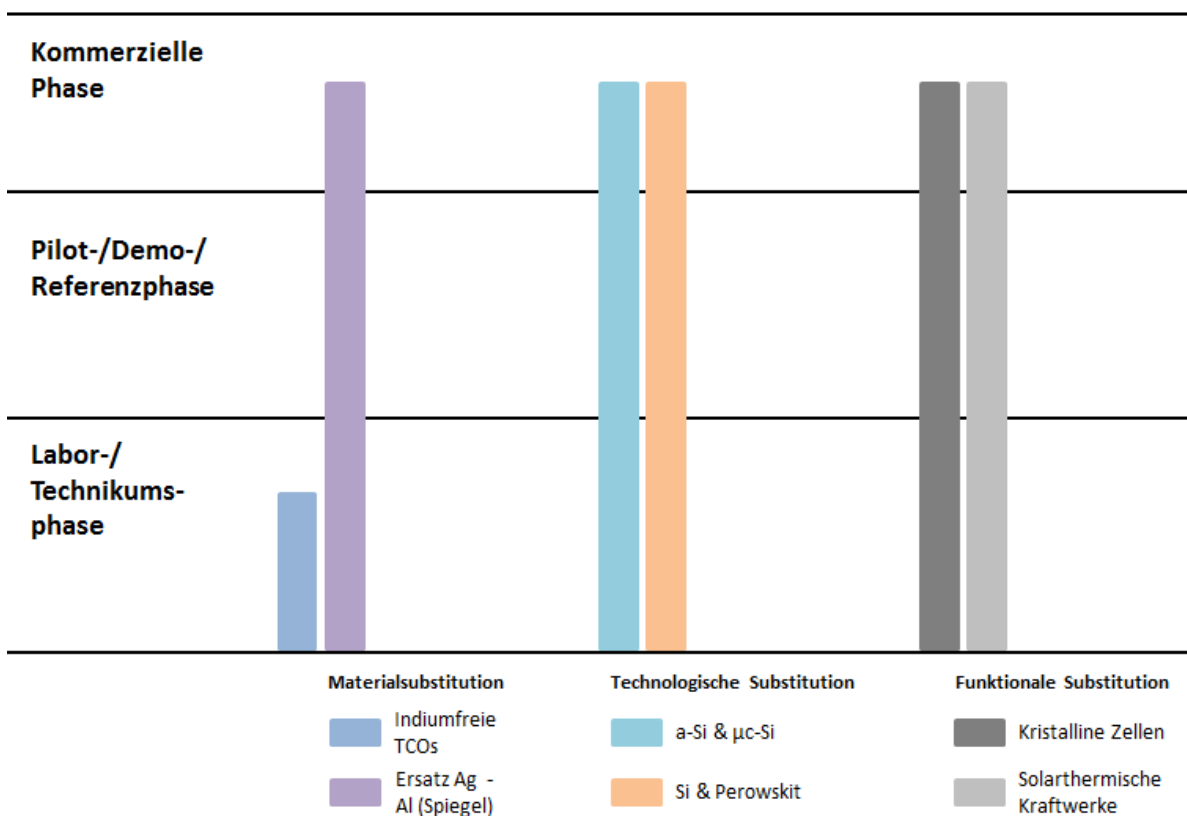
### 3.6.2.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Die Entwicklung von Indium-freien TCOs steht noch am Anfang. Eine Demonstration der Technologie im Industriemaßstab steht noch aus.

Halbleiter auf Basis von a-Si und  $\mu\text{c-Si}$  werden in der Dünnschicht-Photovoltaik schon eingesetzt. Die Nutzung in Tandemzellen ist technisch möglich, praktisch aber noch nicht konkurrenzfähig. Die Nutzung von Kombinationen aus Silizium und Perowskit befindet sich noch im Forschungsstadium.

Im Gegensatz dazu werden sowohl c-Si-basierte Solarfarmen als auch CSP-Anlagen seit langem kommerziell betrieben. Für diese Technologien sind keine entscheidenden Weiterentwicklungen zu erwarten.

Abbildung 3.11: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Tandemzellen



Quelle: Eigene Darstellung

### 3.6.2.8 Fazit und Ausblick

Der Einsatz von Tandemzellen in konzentrierenden Photovoltaikanlagen erscheint noch extrem unsicher. Mögliche Strategien wären die Nutzung einer GaInP/GaInAs/Ge-Zelle (bzw. ihrer Weiterentwicklung) mit sehr hohen Wirkungsgraden, die für einen wirtschaftlichen Betrieb auf einen hohen

Konzentrationsfaktor angewiesen ist. Im Gegensatz dazu könnten Silizium-basierte Tandemzellen oder Kombinationen aus Silizium- und Perowskit-Halbleitern auch schon mit einer geringeren Konzentration genutzt werden.

### 3.6.2.9 Literatur

Fraunhofer ISE 2015: Current Status of Concentrator Photovoltaic, Freiburg

INREP 2016: Towards Indium free TCOs, [http://www.inrep.eu/files/leaflet%20%20poster/INREP\\_Leaflet\\_20160517.pdf](http://www.inrep.eu/files/leaflet%20%20poster/INREP_Leaflet_20160517.pdf)

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

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

Pihl et al. 2012: Pihl, Erik; Kushnir, Duncan; Sanden, Björn; Johnsson, Filip, Material constraints for concentrating solar thermal power.

Welt der Physik 2016: Höherer Wirkungsgrad mit Silizium-Perowskit-Tandem, <http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/news/2016/hoeherer-wirkungsgrad-mit-silizium-perowskit-tandem/>

Wuppertal Institut, 2014: Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/KRESSE\\_Endbericht.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/KRESSE_Endbericht.pdf)

Experten:

Dr. Thomas Schlegl Fraunhofer ISE

Dr. Holger Althues, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden

### 3.6.3 CSP-Technologie (UT Nr. 93)

Unter den Concentrated Solar Power-Anlagen (CSP), die die Solarstrahlung mittels Spiegelsystemen zur Stromerzeugung bündeln, sind **Parabolrinnenkraftwerke** am weitesten verbreitet. 90 % der installierten Leistung entfällt auf Kraftwerke mit Parabolrinnentechnik (IEA 2014). Von den in der Kritikalitätsliste aufgeführten Stoffen werden folgende eingesetzt: Silber (Platz 12), Kupfer (Platz 17), Magnesium (Platz 19), Titan (Platz 20) und Mangan (Platz 21).

#### 3.6.3.1 Materialsubstitution

**Silber** wird für die Beschichtung der Reflektoren von Parabolrinnenkraftwerken verwendet. Pro GW Leistung beträgt der Silberbedarf 13 t (für eine Anlage in Spanien gemäß Phil 2012). Die Dicke der Silberschicht beträgt ca. 100 nm. Mittel- bis langfristig könnten die Schichten noch dünner werden, allerdings sind die Schichten mit 100 nm bereits sehr dünn, so dass das Potential gering erscheint (Marscheider et al. 2016). Eine Möglichkeit das Silber zu ersetzen, besteht in der Herstellung von Spiegeln aus eloxiertem Aluminium, die von einer Polymerschicht vor Korrosion geschützt werden (Pihl 2012, Marscheider 2016).

**Kupfer** wird in Stromkabeln, Erdungsnetzen, Motoren zum Pumpen von Flüssigkeiten und in den Generatoren und Hochspannungstransformatoren eingesetzt. Ein mögliches Substitut ist Aluminium, das jedoch eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer hat (EY 2013). Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Graphen, das eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit besitzt. Allerdings befindet sich die Entwicklung von Graphen erst in einem frühen Stadium der Forschung, so dass die Anwendung vorläufig nicht absehbar ist (Emol 2015). Da Kupfer leicht recycelt werden kann und in CSP-Anlagen nicht-dissipativ verwendet wird, wird der Substitution auch keine große Dringlichkeit zugesprochen und diese daher auch in der Praxis nicht verfolgt.

**Mangan** und **Magnesium** werden in Parabolrinnenkraftwerken als Stahllegierungselement zur Verbesserung des Korrosionsschutzes und der Temperaturbeständigkeit verwendet. In den Anlagen kommen diese in Dampfturbinen zur Anwendung. So bestehen Dampfturbinen aus Stahllegierungen mit einem hohen Anteil an Chrom sowie Molybdän, Mangan, Nickel, Vanadium (Pihl 2012) und anderen Materialien. Für Mangan existiert keine befriedigende Substitutionsmöglichkeit (EU 2016). Die Substitution von Magnesium ist anspruchsvoll und führt zu einer Verschlechterung der Korrosionseigenschaften (CRM InnoNet 2015).

**Titan** wird im Absorber verwendet. Parabolrinnen-Systeme verwenden Receiverrohre, die aus einer externen Glasröhre und einem inneren Metallrohr zusammengesetzt sind. Das Metallrohr ist mit Titanoxid beschichtet (EU 2016). Die Menge an Titan ist niedrig, so dass ihrer Substitution geringe Bedeutung zugerechnet wird.

### 3.6.3.2 Technologische Substitution

Außer Parabolrinnen-Kraftwerken gibt es auf dem Markt drei weitere CSP-Technologien, die als Alternative zu Parabolrinnen in Frage kommen: Fresnelkollektoren, Stirling-Dish-Systeme und Turmkraftwerke. Sie unterscheiden sich vor allem in der Gestaltung der Solarkollektoren.

Der prinzipielle Aufbau von **Fresnelkollektoren** ähnelt dem der Parabolrinnenkollektoren. Der Unterschied ist, dass die Spiegel in den realisierten linearen Fresnelkollektoren aus flachen Spiegelstreifen hergestellt werden, die eine geringe Krümmung durch mechanische Biegung erhalten. Das vereinfacht die Fertigung. Der optische Wirkungsgrad von Fresnelkollektoren ist jedoch geringer als der von Parabolrinnenkollektoren (World Bank 2011). Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, wird derzeit an neuen Receiversystemen, wie beispielsweise dem invertierten Hohlraumreceiver, und neuen Reflektorfeldgeometrien geforscht, die die Verschattung verringern (Barlev et al. 2011).

Stirling-Dish-Systeme bestehen aus einem parabolisch geformten Konzentrador (ähnlich einer Satellitenschüssel), die die Solarstrahlung auf einen Kollektor im Brennpunkt der Schüssel konzentrieren. Sie zeichnen sich durch einen hohen energetischen Wirkungsgrad aus. Neben den hohen Kosten ist eine Herausforderung, dass sich Speicher in diese Systeme nur schwer integrieren lassen (IRENA 2012).

**Turmkraftwerke** arbeiten bei hohen Temperaturen, so dass die größten Verluste durch Konvektion an der Receiveroberfläche entstehen. Daher werden Receiver mit einer großen inneren Oberflächenstruktur bevorzugt. Die hohen Investitionskosten für das Heliostatfeld stellen weiterhin ein Problem für Solarturm-Systeme dar, weshalb die Forschung sich mit kostengünstigeren und leichteren Materialien, wie beispielsweise PVC-Verbundstahl, beschäftigt (Barlev et al. 2011).

### 3.6.3.3 Funktionale Substitution

**Solarzellen auf Basis von Silizium (Si)** sind die dominierende Photovoltaik-Technologie. Sie werden sowohl in dezentralen Anlagen, als auch in großen Solarfeldern eingesetzt.

**Tandemzellen** enthalten mehrere Schichten transparenter Halbleiter, die aufgrund ihrer Dotierung selektiv verschiedene Bandbreiten der Solarstrahlung nutzen. Dadurch werden sehr hohe Wirkungsgrade erreicht. Da ihre Herstellung sehr teuer ist, werden sie nur in konzentrierenden PV-Anlagen verwendet (siehe auch Tandemzellen).

Als mögliche Konkurrenztechnologie erscheint die Silizium-Photovoltaik relevant, zumindest konnte festgestellt werden, dass infolge des Preisverfalls bei Photovoltaikmodulen Investitionen, die ursprünglich für solarthermische Anlagen vorgesehen waren, in PV-Solarparks umgeschichtet wurden. Silizium-PV weist jedoch teilweise andere Charakteristika auf, zu nennen ist insbesondere die fehlende intrinsische Möglichkeit der Energiespeicherung. Auch im Hinblick auf die in Frage kommenden Standorte unterscheiden sich diese Technologien – daher kann hier nur in Einzelfällen von einer Substitutionsmöglichkeit ausgegangen werden.

Auch konzentrierende PV-Anlagen bieten keine durchgängige Energieversorgung, zudem erscheint ihr zukünftiger Einsatz sehr unsicher. Daher sollen sie hier nicht als Substitutionsmöglichkeit gelistet werden. Für eine genauere Betrachtung dieser Technologielinie siehe UT 90: Tandemzellen in konzentrierender Photovoltaik (CPV).

Tabelle 3-48: Substitutionsansätze für die CSP-Technologie

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsstitution	Ersatz von Silber durch Aluminium
Technologische Substitution	Fresnelkollektoren Turmkraftwerke Stirling-Dish-Systeme

#### 3.6.3.4 Mögliche Effizienzverluste

Die Substitution von Silber geht mit einem Wirkungsgradverlust einher, da die Reflektionseigenschaften der Spiegelsysteme herabgesetzt werden. Pihl et al. (2012) beziffern die Verringerung des Wirkungsgrades auf etwa 5 % (bei Einsatz aluminiumbasierter Spiegel gegenüber silberbeschichteter Reflektoren).

Aluminium hat eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer. Es kommt deshalb für die Komponenten in CSP nicht in Frage.

Was technologische Substitutionsmöglichkeiten betrifft, so sind die Wirkungsgrade der einzelnen CSP-Technologien nur qualitativ vergleichbar, da sie von der Einsatzart und den Umgebungsbedingungen abhängen. Fresnelkollektoren haben generell schlechtere Wirkungsgrade als Parabolrinnen-Kraftwerke, da sie auf Grund ihrer einfacheren Geometrie das Sonnenlicht nicht so genau fokussieren. Turmkraftwerke weisen tendenziell höhere Gesamtwirkungsgrade auf, da sie häufig mit sehr hohen Konzentrationsfaktoren und damit höheren Temperaturen arbeiten. Diese erhöhen den Wirkungsgrad des Wärmekreislaufs, bedingen jedoch auch höhere Wärmeverluste am Kollektor. Stirling-Dish-Systeme haben für sich genommen einen generell höheren Wirkungsgrad (rund 25 %), jedoch lassen sich in diese Systeme schlecht Wärmespeicher integrieren, so dass sie mit weniger Volllaststunden betrieben werden.

Tabelle 3-49: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die CSP-Technologie

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsstitution</b>	
Ersatz von Silber durch Aluminium	5 %ige Abnahme der Kollektorfeld Effizienz
<b>Technologische Substitution</b>	
Fresnelkollektoren	Optische Effizienzverluste
Turmkraftwerke	Bei hohen Temperaturen größere Verluste
Stirling-Dish-Systeme	Höhere Effizienz

#### 3.6.3.5 Mögliche Restriktionen

Bezüglich der Erschließung der Substitutionspotentiale wurden folgende Restriktionen identifiziert:

Tabelle 3-50: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die CSP-Technologie

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
Ersatz von Silber durch Aluminium	Keine
<b>Technologische Substitution</b>	
Fresnelkollektoren	Derzeit schlechter Wirkungsgrad
Turmkraftwerke	Forschungsbedarf: Kostengünstigere und leichtere Materialien, Receiver für hohe Temperaturen
Stirling-Dish-Systeme	Hohe Kosten, keine Energiespeicherung

Obwohl solarthermische Kraftwerke bezogen auf die installierte Spitzenleistung vergleichsweise teuer sind, kann durch die integrierten Speicherkapazitäten die Auslastung und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage verbessert werden. (Solar-Thermal 2008) Eine Speicherung von Photovoltaik-Strom ist derzeit nur sehr kostenintensiv möglich. Moderne CSP-Kraftwerke liefern 24 Stunden am Tag Strom. Somit ist CSP eine grundlastfähige Technologie aus erneuerbaren Energien und kann aktiv dazu beitragen, Schwankungen im Stromnetz auszugleichen (Deutsche CSP 2012).

CSP-Anlagen benötigen jedoch (wie auch konzentrierende PV-Anlagen) eine hohe Normalstrahlung, da sich diffuses Licht nicht fokussieren lässt. Daher sind sie nur in der Sun Belt-Region (zwischen 40 Grad nördlich und südlich des Äquators) sinnvoll zu betreiben, was politische und wirtschaftliche Risiken bedingen kann. Darüber hinaus stellt der Wasserverbrauch der Anlagen eine Herausforderung dar.

#### 3.6.3.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

CSP-Technologien enthalten Gefahrstoffe (Wärmeträgeröle, Salzschnmelzen, Hydraulikflüssigkeiten, Kühl- und Schmierstoffe etc.), die Risiken darstellen, wenn sie in die Umwelt gelangen.

Insbesondere Turmkraftwerke, aber auch Parabolrinnenkraftwerke werden als zentrale Anlagen ausgelegt, was einen entsprechenden Flächenverbrauch nach sich zieht. Zudem werden für Kühlung und Reinigung der Anlagen teilweise große Mengen an Wasser benötigt, was insbesondere in trockenen, sonnenreichen Regionen ein Problem darstellen kann.

Tabelle 3-51: Übersicht der Substitutionsoptionen der CSP-Technologie

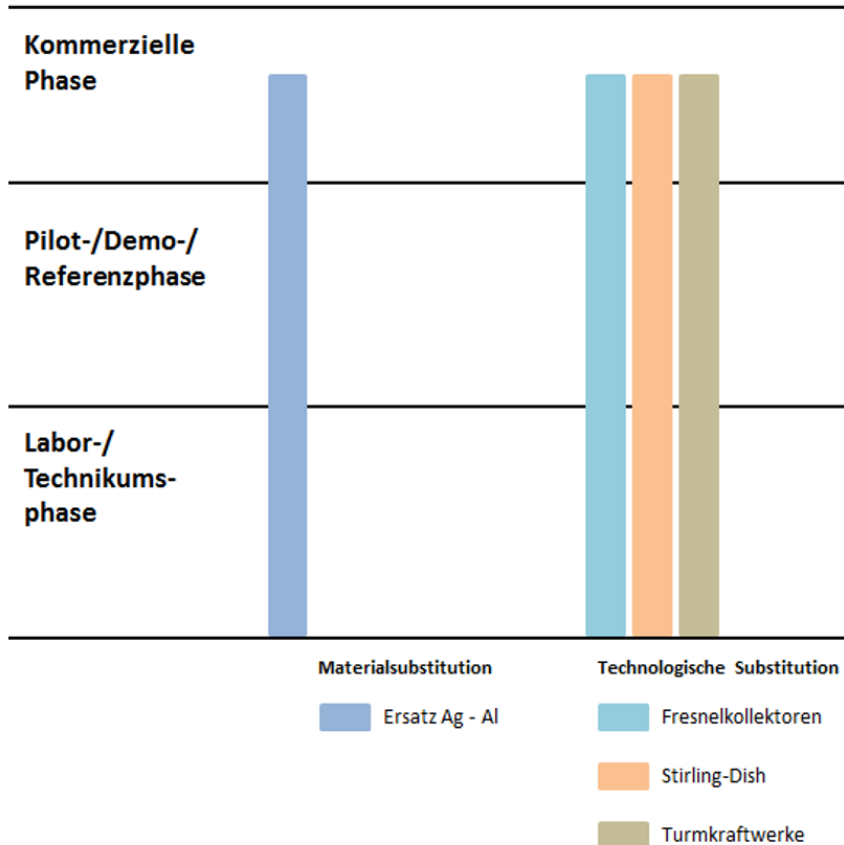
	Parabolrinnen-Kraftwerke	Fresnelkollektoren	Turmkraftwerke	Stirling Dish
Laborwirkungsg rad	16 %	13 %	20 %	25 %
Potential für Effizienzsteigerungen	Hoch	Medium	Medium	Medium
Lebensdauer	25 Jahre	25 Jahre	25 Jahre	25 Jahre
Umweltaspekte	Wärmeträgerflüssigkeiten Landnutzung Wasserbedarf	Wärmeträgerflüssigkeiten Wasserbedarf	Wärmeträgerflüssigkeiten Landnutzung Wasserbedarf	Wärmeträgerflüssigkeiten

Quelle: IRENA 2012

### 3.6.3.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Der technologische Reifegrad der verschiedenen Substitutionsansätze ist sehr unterschiedlich, wie folgende Abbildung zusammenfassend zeigt:

Abbildung 3.12: Technologiereife der Substitutionsoptionen für die CSP-Technologie



Quelle: IRENA 2012

Die Substitution von Silber durch Aluminium ist technologisch ausgereift und kommerziell verfügbar, allerdings mit einem Wirkungsverlust (5 %).

Die Entwicklung der Fresnelkollektoren ist am weitesten fortgeschritten. Die Wirkungsgrade sind jedoch noch geringer als die von Parabolrinnenkraftwerken. Generell gehen für CSP-Anlagen die Bestrebungen dahin, Öl als thermisches Transportmedium zu ersetzen, um die Dampferzeugung direkt in der Receiverröhre zu realisieren. Auf diesem Weg kann eine Kostenreduktion erreicht werden, die aufgrund des Phasenwechsels im Transportmedium technisch derzeit immer noch schwer umzusetzen ist (EU 2013).

### 3.6.3.8 Fazit und Ausblick

Bis dato lassen sich die untersuchten Rohstoffe nicht ohne Wirkungsverluste oder Einschränkungen der Materialeigenschaften substituieren. Wirkungsgradverluste müssten durch größere Spiegelflächen ausgeglichen werden, was wieder einen höheren Materialverbrauch nach sich ziehen würde. Auf Technologieebene unterscheiden sich die Materialbedarfe zwischen den Technologielinien kaum. Daher ist das Substitutionspotential auf dieser Ebene gering.



### 3.6.3.9 Literatur

Barlev et al. 2011: David Barlev, Ruxandra Vidu, Pieter Stroeve "Innovation in Concentrated solar Power", Solar Energy Materials and Solar Cells, May 12, 2011.

CRM InnoNet 2015: Substitution of critical raw materials. 2015

Deutsche CSP 2012: Positionspapier. Deutsche Industrienetzwerk Concentrated Solar Power.

Emol 2015: Grafeno: ¿La nueva amenaza para la industria del cobre a nivel mundial?,  
<http://www.emol.com/noticias/economia/2015/01/16/699542/grafeno-la-nueva-amenaza-para-la-industria-del-cobre-a-nivel-mundial.html>

EU 2013: Europäische Kommission, Technology assessment, Energy technologies and assessment. 2013

EU 2016: Materials Information system. Institute for energy and Transport (EIT). European Commission

EY 2013: The super-cycle hangover: the rising threat of substitution. Ernst & Young,  
[http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/The\\_rising\\_threat\\_of\\_substitution\\_-\\_mining\\_and\\_metals/\\$FILE/ey-threat-of-substitution-sep2013.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/The_rising_threat_of_substitution_-_mining_and_metals/$FILE/ey-threat-of-substitution-sep2013.pdf)

IEA 2014: Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy. Paris.

IRENA 2012: Renewable energy technologies, Volume 1: Concentrating solar power.  
[http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re\\_technologies\\_cost\\_analysis-csp.pdf](http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf)

Pihl et al. 2012: Pihl, Erik; Kushnir, Duncan; Sanden, Björn; Johnsson, Filip, Material constraints for concentrating solar thermal power.

Solar-Thermal 2008: Solar Thermal Energy – an Industry Report. eSolar, Abengoa, acciona, ausra. Brightsource Energy, Schott Solar,  
<http://www.solar-thermal.com/solar-thermal.pdf>

World Bank 2011: MENA Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power Projects.  
<http://siteresources.worldbank.org/INTMENA/Resources/CSP-Job-Study-Eng-Sum.pdf>

Experten

Dr.-Ing. Max Marwede. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM

Dr Frank Marscheider-Weidemann. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Mikel Sojo Armentia, Acciona Energia (Spanien), Leiter Innovationsmanagement

## 3.7 Sonstige Technologien

In die Gruppe der Sonstigen Technologien fallen die Kraftwerke GuD/Gas (UT Nr. 83), RFID (UT Nr. 5), die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode (UT Nr. 13b) sowie die weiße Leuchtdiode (UT Nr. 27).

### 3.7.1 Kraftwerke GuD/Gas (UT Nr. 83)

In Gas-und-Dampf-Kraftwerken wird Erdgas als fossiler Brennstoff mittels einer Kombination aus Gas- und Dampfturbinen in elektrische Energie umgewandelt; so werden hohe Wirkungsgrade erreicht. Kupfer wird in Stromkabeln, Erdungsnetzen, Motoren zum Pumpen von Flüssigkeiten und in den Generatoren und Hochspannungstransformatoren eingesetzt. Mangan wird als Legierungselement in Turbinen verwendet.

#### 3.7.1.1 Materialsubstitution

Ein alternativer Rohstoff für Kupfer ist die Verwendung von Aluminium als Leitermaterial. Aluminium hat eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer, wird jedoch auf Grund seines vergleichsweise niedrigen Preises in der Elektroenergie-technik als Substitut für Kupfer eingesetzt. Möglich ist dies insbesondere in Anwendungen, in denen das Gewicht des Stromleiters eine Rolle spielt und der benötigte Raum keine Beschränkung darstellt (Lücke et al., 2013). Beispielhaft ist dies



etwa in Transformatoren der Fall, aber auch bei Hochspannungs-Freileitungen (Kupferinstitut, o.J.). In Generatoren oder Motoren erscheint Kupfer alternativlos, da die Verwendung von Aluminium den Bauraum zu sehr vergrößern würde. Auch in Mittelspannungsleitungen wird Kupfer bevorzugt, hauptsächlich jedoch aus wirtschaftlichen Gründen.

Langfristig könnten Graphen als ein möglicher Ersatz für Kupfer in Frage kommen. Graphen weist eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit auf; sie ist rund 10-mal höher als die von Kupfer. Allerdings ist die Entwicklung von Graphen in einem frühen Stadium der Forschung, so dass die Anwendung in absehbarer Zeit nicht realistisch scheint (Emols 2015).

Mangan wird als Desoxidationsmittel produktionsbedingt fast allen Stählen zugesetzt. Es bindet Schwefel und senkt die Rotbruch-Empfindlichkeit. Prinzipiell gibt es eine Reihe an Legierungsstählen, die für den Hochtemperatureinsatz optimiert wurden; einige beinhalten kein Mangan, dafür jedoch andere kritische Elemente. Da die Zusammensetzung einsatz- und unternehmensspezifisch ist, kann die Bandbreite der potenziell einsetzbaren Legierungen hier nicht aufgefächert werden.

### 3.7.1.2 Technologische Substitution

Legierungselemente, wie Mangan, könnten auf technologischer Ebene durch alternative Werkstoffe substituiert werden. So könnte Keramik in Turbinen von GuD/Gas-Kraftwerken 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. Für Brennkammern von Gasturbinen sind Keramik-Matrix-Komposite (CMC) in Entwicklung, die aus SiC-Fasern und SiC-Matrices (Kurzbezeichnung SiC/SiC) sowie einer Oxidationsschutzschicht bestehen. Diese faserverstärkten Keramiken zeichnen sich durch besondere Festigkeit sowie Kriech- und Temperatur-wechselbeständigkeit aus. Ein alternativer Werkstoff ist beispielsweise Mullit, ein Aluminiumsilikat mit der Stöchiometrie  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (VDI 2014). Auch Turbinenschaufeln könnten in Zukunft aus Vollkeramik hergestellt werden, die sich faserverstärken ließen. Visionär ist die Nutzung sogenannter Kohlenstoff-Kohlenstoff-Komposite, bei denen Kohlenstofffasern in eine ebenfalls aus Kohlenstoff bestehende Matrix eingebettet werden. Diese könnten Einsatztemperaturen von über 2.000 °C standhalten.

### 3.7.1.3 Funktionale Substitution

Teilweise werden Kohlekraftwerke als Konkurrenztechnologien zu GuD-Kraftwerken betrachtet. Mit der Entwicklung von Technologien zur  $\text{CO}_2$ -Abscheidung wurden Kohlekraftwerke zwischenzeitlich als mittelfristiger Baustein eines umweltfreundlichen Energiesystems diskutiert. Diese Technologien senken jedoch den Wirkungsgrad und können nicht alle umweltschädlichen Auswirkungen von Kohlekraftwerken vermeiden. Daher sollen diese hier nicht als Substitutionsmöglichkeit betrachtet werden.

Tabelle 3-52: Substitutionsansätze für Kraftwerke GuD/Gas

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsubstitution	Kupfer durch Aluminium
Technologische Substitution	Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (etwa aus Aluminiumoxid) Kohlenstoff-Kohlenstoff-Komposite

### 3.7.1.4 Mögliche Effizienzverluste

Die Verluste in einem Stromleiter sind proportional zu seinem Widerstand – der spezifische Widerstand Aluminiums liegt über 1,5-mal höher als der Kupfers. Dies kann jedoch durch größere Leiterquerschnitte ausgeglichen werden.

Keramische Materialien bieten eine längere Lebensdauer bei niedrigeren Lebenszykluskosten und einer höheren Effizienz, was zu einer kostengünstigen Umwandlung von Kraftstoff in elektrischen Strom führt. (Zafar 2015) Das geringere Gewicht von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Kompositen im Vergleich zu Stahllegierungen ermöglicht bei ihrem Einsatz in Gasturbinen Effizienzsteigerungen von 15 %. (CRM InnoNet 2015) Zudem weisen sie eine hohe thermische Effizienz und ausgezeichnete mechanische Eigenschaften bei höheren Temperaturen auf. (Arabab 2015) Werden dadurch höhere Arbeitstemperaturen ermöglicht, steigert auch dies den Systemwirkungsgrad.

Tabelle 3-53: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die Kraftwerke GuD/Gas

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsubstitution</b>	
Kupfer durch Aluminium	Höherer Widerstand (lässt sich durch höheren Querschnitt ausgleichen)
<b>Technologische Substitution</b>	
Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix	Höherer Wirkungsgrad (bei Einsatz in den Turbinen)
Kohlenstoff-Kohlenstoff-Komposite	Höherer Wirkungsgrad (bei Einsatz in den Turbinen)

### 3.7.1.5 Mögliche Restriktionen

Wie oben dargestellt, hat Aluminium einen höheren spezifischen Widerstand als Kupfer. Daher ist der Einsatz von Aluminium als Stromleiter nur in Anwendungen denkbar, in denen der Querschnitt des Leiters problemlos gesteigert werden kann. Vorteilhaft für die Verwendung in Hochspannungs-Freileitungen ist dagegen das geringe Gewicht des Aluminiums.

Einer Umsetzung von keramischen Faserverbundwerkstoffen in GuD/Gas-Kraftwerken steht entgegen, dass das erreichte Temperaturniveau noch keine Vorteile gegenüber den herkömmlichen, mit einem Luftfilm gekühlten metallischen Brennkammern bietet (Sommers et al., 2010). Die Arbeitstemperaturen in GuD-Kraftwerken sollten möglichst hoch liegen, da so die Wirkungsgrade gesteigert werden können. So werden schon heute Turbinenschaufeln in einer Umgebung eingesetzt, deren Temperaturen über den eigentlich für diese Werkstoffe zulässigen Maximaltemperaturen liegen. Dies ist nur durch den Einsatz von Kühlungstechniken möglich. Zudem sind insbesondere Turbinenschaufeln sehr hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Außerdem sind die Kosten für die Herstellung des Verbundwerkstoffsystems aus SiC-Fasern, SiC-Matrix und einem speziellem Beschichtungssystem noch sehr hoch.

Tabelle 3-54: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die Kraftwerke GuD/Gas

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsubstitution</b>	
Kupfer durch Aluminium	Höherer Widerstand muss durch höheren Leiterquerschnitt ausgeglichen werden
<b>Technologische Substitution</b>	
Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit	Erreichtes Temperaturniveau bietet keine Vorteile

keramischer Matrix	Kosten
Kohlenstoff-Kohlenstoff-Komposite	Erreichtes Temperaturniveau bietet keine Vorteile Kosten

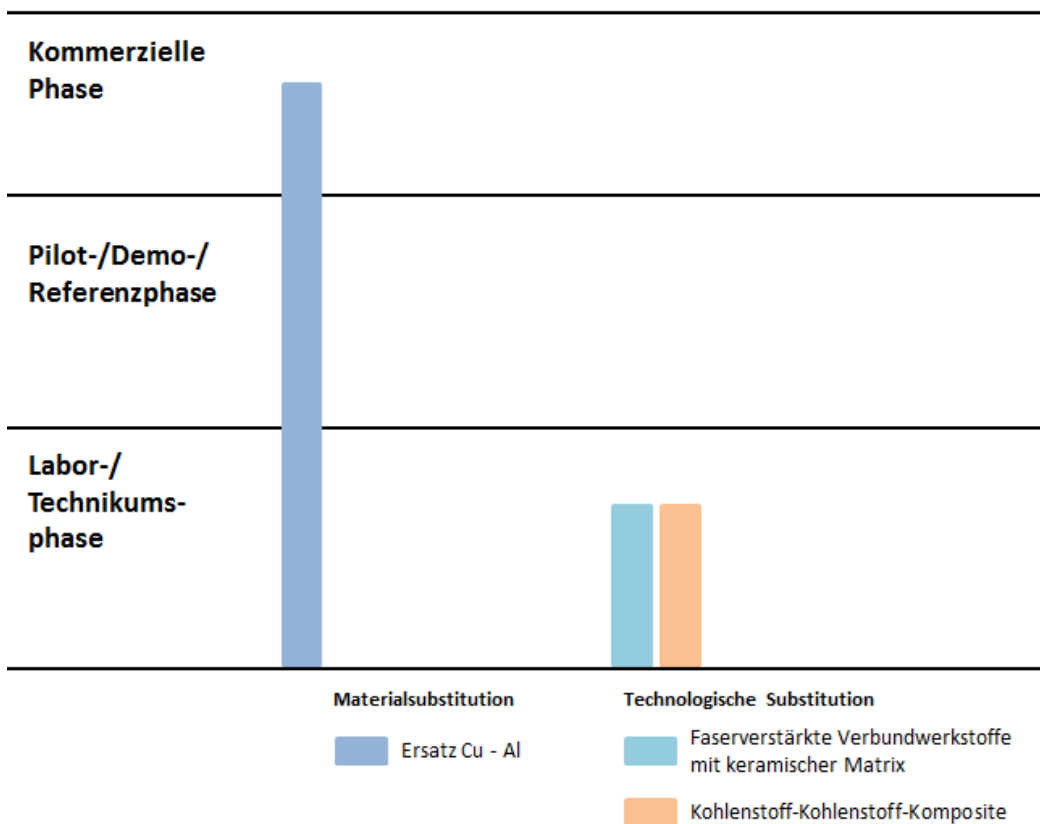
### 3.7.1.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Ökologische Vor- bzw. Nachteile sind nicht festzustellen. Bei Komponenten aus faserverstärkten Verbundwerkstoffen mit keramischer Matrix handelt es sich um hochwertige, langlebige Komponenten mit einer Lebenserwartung von mindestens 10 bis 30 Jahren. Das Recycling ist aufgrund der Verbundstruktur schwierig. Bestehende Recyclingverfahren sind Solvolyse und Pyrolyse. Die Toxizität von Graphen wurde bislang noch nicht tiefergehend untersucht, ebenso wenig die möglichen Auswirkungen auf die Umwelt. Erste Veröffentlichungen zu Graphen lassen erwarten, dass Graphen im Grundwasser eine hohe Mobilität aufweist und sich daher schnell verbreiten könnten. (Lanphere et al., 2014)

### 3.7.1.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

In Brennkammern kommen schon heute vereinzelt Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz. Die mechanischen Belastungen in Turbinenschaufeln liegen jedoch deutlich höher. Damit hier zukünftig faserverstärkte Keramiken oder auch Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbundwerkstoffe zum Einsatz kommen, sind technologische Fortschritte sowohl bei den Werkstoffen als auch den Kühlungskonzepten nötig.

Abbildung 3.13: Technologiereife der Substitutionsoptionen für Kraftwerke GuD/Gas



Quelle: IZT

### 3.7.1.8 Fazit und Ausblick

GuD-Kraftwerke werden auch längerfristig ein wichtiger Bestandteil eines umweltfreundlichen Energiesystems sein und sind somit nicht substituierbar. Auch der Einsatz von Kupfer lässt sich im Hinblick auf die gute elektrische Leitfähigkeit nicht vermeiden, eine vollständige Substitution wird in der Praxis nicht diskutiert.

Substitutionsmöglichkeiten ergeben sich auf Materialebene für die eingesetzten Legierungselemente. Welche Materialien hier zum Einsatz kommen können, hängt jedoch von der Arbeitstemperatur und dem genauen Einsatzzweck ab und kann daher nicht genau bestimmt werden. Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen könnte diese Problematik umgehen, ist jedoch von weiteren Technologieentwicklungen (insbesondere der Materialwissenschaften) abhängig.

### 3.7.1.9 Quellen

Arabab 2015: Research in Carbon-Carbon Composites, Saifeldein Arabab, 2015

CRM\_InnoNet 2015: Substitution of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Substitution Pro-files, 2015

Emol 2015: Grafeno: ¿La nueva amenaza para la industria del cobre a nivel mundial?, <http://www.emol.com/noticias/economia/2015/01/16/699542/grafeno-la-nueva-amenaza-para-la-industria-del-cobre-a-nivel-mundial.html>

Kupferinstitut o.J.: Elektrische Leiterwerkstoffe im praktischen Einsatz, <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/anwendung/e-energie/leiterwerkstoffe.html>

Lanphere et al. 2014: Stability and Transport of Graphene Oxide Nanoparticles in Groundwater and Surface Water. Lanphere Jacob D., Rogers Brandon, Luth Corey, Bolster Carl H., Walker Sharon L.. Environmental Engineering Science, July 2014, 31(7)

Lücke et al. 2013: Vergleich von Werkstoffen auf Basis von Cu und Al sowie Trends bei deren Anwendung in der Elektroenergie-technik. Lücke, N.; Schlegel, S.; Großmann, S. in: METALL, 11/2013

Sommers et al. 2010: Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems. A. Sommers, Q. Wang, X. Han, C. T'Joel, Y. Parkd, A. Jacobi, 2010

VDI 2014: Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung, [http://www.vditz.de/fileadmin/media/news/documents/Studie\\_Werkstoffinnovationen\\_fuer\\_nachhaltige\\_Mobiliaet\\_und\\_Energie\\_versorgung.pdf](http://www.vditz.de/fileadmin/media/news/documents/Studie_Werkstoffinnovationen_fuer_nachhaltige_Mobiliaet_und_Energie_versorgung.pdf)

Zafar 2015: How Combined-Cycle power plants Produce Efficient Electricity?, Sultan Zafar, <https://www.linkedin.com/pulse/how-combined-cycle-power-plants-produce-efficient-sultan-zafar>

## 3.7.2 RFID (UT Nr. 5)

Die RFID-Technologie besteht aus zwei Komponenten, einerseits dem passiven Transponder und andererseits dem aktiven Lesegerät, welches vom Transponder berührungslos Daten auslesen (oder auch schreiben) kann. Ein Transponder besteht im Wesentlichen nur aus einem Mikrochip und einer winzigen metallischen Antenne.

Es gibt zahlreiche technischen Varianten von Transpondern, die sich hinsichtlich der Bauformen und Größe der Antennen, der Chips und der Art des Trägermaterials unterscheiden. Außerdem hängt die Bauform vom Frequenzbereich der Funkkoppelung mit dem Lesegerät ab. Die Größe der Lesegeräte hingegen wird von der gewünschten Reichweite/Geometrie des Auslesebereichs sowie der erforderlichen Mobilität bzw. Integration in die Infrastruktur der Umgebung bestimmt.

Marktübliche RFID Transponder enthalten gedruckte oder geätzte Kupfer-basierte Antennen auf Polymer- oder Papiersubstraten. Kostengünstige, aber weniger robuste Varianten enthalten Aluminium als Antennenmaterial. Hingegen werden hochwertige Transponder mit silberhaltigem Antennenmaterial hergestellt. In diesem Fall werden die Antennen mit Hilfe additiver Herstellungsverfahren (Drucktechnologien) auf ein Polymersubstrat gedruckt. Dies geschieht mittels

Inkjet- oder Screenprinting von elektrisch leitfähiger Tinte. Diese leitfähigen Inks erhalten Silber in Form von Nanopartikeln, welche nach dem Drucken durch photothermische Aushärtung in eine leitfähige Dickschicht (thick film) umgewandelt werden (Koptioug et al. 2003; Babar et al. 2012).

#### 3.7.2.1 Materielle Substitution

Die materielle Beschaffenheit der Transponder richtet sich nach den funktionalen Anforderungen des jeweiligen Anwendungszwecks. Die auf dem Markt existierenden Transpondertypen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe und Leistungsfähigkeit erheblich voneinander. Kommerzielle RFID-Typen decken ein weites Spektrum technisch und ökonomisch sinnvoller Materialzusammensetzungen ab. So existieren zwar zahlreiche Varianten zur Substitution der Antennenmaterialien (z.B. Aluminium statt Kupfer), aber die jeweils erforderlichen funktionellen Eigenschaften der RFID Transponder lassen in der Regel keine große Designfreiheit hinsichtlich der Materialauswahl zu. Bei Anwendungen für den Massenmarkt ist außerdem die Optimierung der Transponderpreise ein kritischer Erfolgsfaktor für die kommerzielle Tragfähigkeit der jeweiligen RFID Systeme. Bei RFID-Transpondern für die Kennzeichnung der Verpackungen von Einzelhandelsgütern werden die Hersteller deshalb in der Regel ein technologisch mögliches Minimum an Material- und Herstellungskosten anstreben. Dies bedeutet, dass solche Transpondertypen (Smart Labels) im gegenwärtigen Umfeld technologischer Möglichkeiten nur ein sehr geringes Potential zur Materialeinsparung aufweisen.

Vor diesem Hintergrund sind der materiellen Substitution auf Transponderebene enge Grenzen gesetzt. Zukünftige technologische Innovationen im Bereich der Polymerelektronik werden möglicherweise den Einsatz siliziumbasierter Chips auf RFID-Tags obsolet machen. Hingegen ist ein Ersatz der Metalle durch leitfähige Polymere in den Antennen bis auf weiteres unwahrscheinlich, weil letztere eine im Vergleich zu Kupfer und Silber zu geringe Leitfähigkeit aufweisen.

#### 3.7.2.2 Technologische Substitution

Die Nutzung der RFID Technologie für die Automatisierung der Stoffstromtrennung im Abfallrecycling dient primär der berührungslosen Identifikation von wertstoffhaltigen Objekten im Abfallstrom. Zu diesem Zweck müssen diese Objekte (z.B. Verpackungen) schon bei der Herstellung oder während der Vertriebsphase mit RFID Transpondern ausgerüstet werden, welche sich dann im Recyclingprozess anhand ihrer eindeutigen Identifikationsnummer im Abfallstrom lokalisieren lassen, um das so gekennzeichnete Wertstoffobjekt gezielt heraus zu sortieren.

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

#### 3.7.2.3 Funktionale Substitution

Die Notwendigkeit einer Identifikation wertstoffhaltiger Objekte im Abfallstrom lässt sich umgehen, wenn diese gar nicht erst in den Abfall gelangen. Vermeidung von Abfallentstehung bzw. Abfalltrennung an der Quelle können dazu beitragen, die Ziele der Kreislaufwirtschaft zu erreichen, ohne ein zusätzliches technisches System zu installieren, welches seinerseits auf energie- und ressourcenintensiven Komponenten beruht. Beispielsweise könnte die Ausweitung des existierenden

Pfandsystems für PET-Flaschen auf andere Kunststoffverpackungen die gleiche Funktion (Identifikation und Getrenntsammlung wertstoffhaltiger Objekte) übernehmen. In diesem Fall wird die Identifikation und Separierung der Wertstoffe durch ökonomische Anreize (Pfand) geschaffen.

#### 3.7.2.4 Mögliche Effizienzverluste

Der Einsatz von RFID Transpondern ermöglicht die Identifikation von Kunststoffverpackungen, die sich mit anderen verfahrenstechnischen Methoden bisher nicht optimal erfassen lassen. Beispielsweise sind schwarze Kunststoffe oder Komposite bisher ein Problem für die automatisierte Wertstoff-trennung. Allerdings bietet auch die RFID-Technologie keine 100-prozentigen Erkennungsraten, weil die Funktion der Transponder am Ende des Produktlebenswegs von Verpackungen nicht immer gegeben ist. Um dies zu gewährleisten, müssten die Transponder unauffällig und gleichzeitig hinreichend robust in die Verpackung integriert werden. Abgesehen von Datenschutzbedenken existieren ökonomische Barrieren, weil die Herstellung hinreichend robuster RFID-Tags den Einsatz hochwertigerer Materialien (z.B. Silber) und/oder größere Materialmengen erfordert. Eine einfache Substitution auf Materialebene (z.B. Kupfer – Aluminium) führt deshalb entweder zu ökonomischen oder technischen Nachteilen. Beispielsweise haben polymerbasierte sowie auch Silber-Ink gedruckte RFIDs zu kurze Koppelungsdistanzen und unzureichende Auslesegeschwindigkeiten für den Einsatz in automatisierten Abfalltrennungsanlagen. Um diese Nachteile zu beheben, müsste die Dimension und Dicke der Antennen auf den Transpondern vergrößert werden, was den Materialeinsatz steigern würde. Zudem erhöht sich der Energieverbrauch der Lesegeräte durch eine notwendige deutliche Verstärkung der Feldstärke für die elektromagnetische Koppelung mit den RFID-Transpondern.

Tabelle 3-55: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die RFID

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsubstitution</b>	
Kupfer durch Aluminium	Geringere elektrische Leitfähigkeit, lässt sich ggf. durch höheren Leiterquerschnitt ausgleichen
Kupfer durch Silber	Höheres Treibhausgaspotential der Silbergewinnung
<b>Technologische Substitution</b>	
Händische Sortierung	Unter Berücksichtigung von Kostenaspekten: weniger präzise Stofftrennung und geringerer Materialdurchsatz im Sortiergut
Mechanische Verfahrenstechnik	Ungenügende Erkennung bestimmter Materialien
Erkennung mittels optischer Sensoren + Software	Ungenügende Erkennung beschädigter oder verschmutzter Objekte
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Abfallvermeidung	Keine
Pfandsysteme	Keine

#### 3.7.2.5 Mögliche Restriktionen

Die existierenden technischen und ökonomischen Restriktionen (RFID-Lesedistanz und Geschwindigkeit) waren bislang prohibitiv für die Nutzung für Trennverfahren in Recyclingsystemen mit gefordertem hohem Stoffdurchsatz.

Tabelle 3-56: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die RFID

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsubstitution</b>	
Kupfer durch Aluminium	Aluminium hat technische Nachteile (geringere Flexibilität und weniger robust)
Kupfer durch Silber	Höhere Kosten. Ressourcenknappheit bei Silber
<b>Technologische Substitution</b>	
Händische Sortierung	Höhere Personalkosten
Mechanische Verfahrenstechnik	Keine
Erkennung mittels optischer Sensoren + Software	Hohe Investitionskosten und Betriebskosten für high-tech Sensorik. Verschmutzung des Sortierguts ist Störfaktor
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Abfallvermeidung	Keine
Pfandsysteme	Keine

### 3.7.2.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Die technischen Varianten der RFID Systeme unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung und dem Energieverbrauch in der Betriebsphase. Als Faustregel für die Beurteilung der ökologischen Auswirkungen kann angenommen werden, dass Anwendungen von RFID Tags für abfallwirtschaftliche Belange den Einsatz höherwertigerer Materialien (z.B. Silber) und höheren Energieeinsatz bei Lesegeräten erfordert (zur gleichzeitigen Highspeed-Erkennung mehrerer Tags im Sortierstrom).

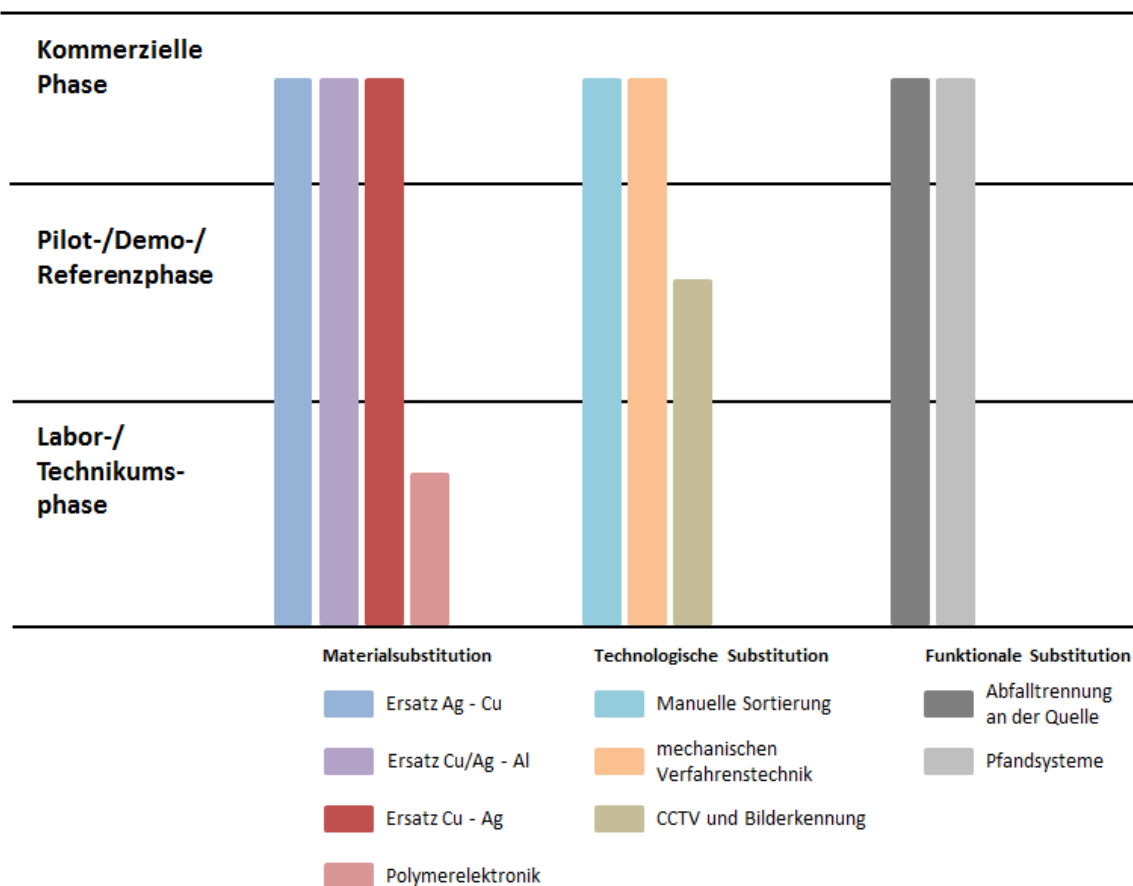
Die RFID-Technik würde theoretisch die automatische Erkennung und Abtrennung von Wertstofffraktionen aus dem Abfallstrom ermöglichen. Dies betrifft vor allem solche Kunststoffe, die mit bisherigen Verfahren schlecht oder gar nicht erkannt werden. Damit lassen sich höhere Recyclingraten für diese Kunststoffe erreichen. Allerdings benötigt das System zusätzliche Materialien (Kupfer, Silber, Silizium, Kunststofffolie) für die Herstellung der Transponder. Diese müssen in einem effizient betriebenen Recyclingsystem notwendigerweise auf alle recyclebaren Verpackungen aufgebracht werden. Als Massenprodukt werden die Transponder ihrerseits zu einem Recyclingproblem, da diese Materialien im Kunststoffrecyclingprozess abgeschieden werden müssen.

### 3.7.2.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Die folgende Abbildung fasst die Einschätzungen in Hinblick auf die Technologiereife der verschiedenen Substitutionsmöglichkeiten zusammen.



Abbildung 3.14: Technologiereife der Substitutionsoptionen für RFID



Quelle: Eigene Darstellung

Die Nutzung der RFID Technologie für die Wertstofftrennung in der Abfallwirtschaft wird seit über einer Dekade immer wieder diskutiert, hat sich aber bisher nicht durchsetzen können. Hauptgründe sind die immer noch zu hohen Kosten der Transponder für den ökonomisch sinnvollen Einsatz auf Verpackungen von Waren im Niedrigpreissektor. Die Einführung eines solchen Techniksystems kann nicht punktuell oder regional erfolgen, sondern erfordert eine branchenübergreifende konzertierte Umsetzungsstrategie entlang der gesamten Logistikkette im Einzelhandel und Recyclingindustrie. Außerdem müssen die Datenschutzinteressen der Konsumenten gewahrt werden, um die notwendige Akzeptanz der Technologie zu gewährleisten. Neben der Lösung der technischen Barrieren bedarf es auch einer weitgehenden Standardisierung der RFID Systeme um eine Doppelnutzung (Einzelhandelslogistik, Wertstofftrennung) zu ermöglichen. Die Schaffung der erforderlichen Kompatibilität der verschiedenen existierenden RFID Anwendungen ist bislang nicht absehbar.

### 3.7.2.8 Fazit

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

Vor diesem Hintergrund kann eine Kombination konventioneller Methoden als Substitution für die RFID Technologie eine erfolgversprechendere Strategie zur Effizienzsteigerung sein. Maßnahmen zur



Abfallvermeidung durch Ökodesign von Verpackungsmaterialien können dazu beitragen, die Unzulänglichkeiten konventioneller Technologien zur Wertstofftrennung zu umschiffen. Beispielsweise ließe sich die Effizienz der Wertstofftrennung durch eine Vereinheitlichung der Verpackungsmaterialien auf wenige und gut identifizierbare Kunststoffsorten steigern. Noch höhere Effizienzpotentiale liegen in der Abfalltrennung an der Quelle. Eine Ausweitung existierender Pfand- und Rücknahmesysteme auf weitere Verpackungstypen könnte die nachträgliche Identifikation und Abtrennung von Wertstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen von vornherein obsolet machen.

#### 3.7.2.9 Literatur

Babar, A.A.; J. Virtanen; V. A. Bhagavati; L. Ukkonen; A. Z. Elsherbeni; P. Kallio; L. Sydänheimo (2012) Inkjet-Printable UHF RFID Tag Antenna on a Flexible Ceramic-Polymer Composite Substrate.

Koptioug, A.; Peter Jonsson; Johan Sidén; Torbjörn Olsson; Mikael Gulliksson (2003) On the behavior of printed RFID tag antennas, using conductive paint, Mid Sweden University

### 3.7.3 Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode (UT Nr. 13b)

Die bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse eingesetzte Sauerstoffverzehrkatode (SVK) besteht aus komplexen Verbundmaterialien und enthält silberbasierte Katalysatoren, die in einer Polytetrafluorethylen (PTFE)-Matrix eingebettet sind. Bezüglich ihrer werkstofflichen Zusammensetzung besteht eine SVK in erster Linie aus Silber und Nickel: Der Silbergehalt der Elektrode liegt bei ca. 70 % und der Nickelgehalt beträgt ca. 25 %; die Polymerkomponente (v.a. PTFE) hat einen Anteil von nur ca. 5 % (Bulan 2015).

Die Sauerstoffverzehrkatode stellt die derzeit innovativste Produktionsmethode zur Chlor-Alkali-Elektrolyse dar. Gegenüber dem bisherigen Membranverfahren können bei der Chlorherstellung 30 % der elektrischen Energie eingespart werden. Neben einer Anlage in Deutschland ist eine weitere Anlage in China seit 2015 Jahr in Betrieb. Da der Markt sehr konservativ ist und die Lebensdauer der Anlagen vergleichsweise groß, verläuft hier eine Marktdurchdringung neuer Technologien vergleichsweise langsam (Bulan 2016a).

Bei den genannten 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 nahezu vollständig zurückgewonnen werden können (Bulan 2015). Es wurde hierfür ein geeignetes Trennverfahren für Silber/PTFE und das Nickelnetzgewebe entwickelt. Die Trennung von Silber und PTFE gelingt durch Auflösung des Silbers und Überführung in Silbernitrat, das bei der Katalysator-Herstellung wieder eingesetzt werden kann.

Eine Dissipation der verwendeten Metalle ist während des Betriebs ebenso wie in der Nachgebrauchsphase nicht zu befürchten. Insofern besteht auch kein relevanter Ressourcenverbrauch, sondern lediglich eine temporäre „Ressourcenfixierung“. Folglich besteht im Vergleich zu vielen anderen Umwelt-technologien ein deutlich geringerer Bedarf, nach Substitutionsmöglichkeiten zu suchen.

#### 3.7.3.1 Materielle Substitution

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

### 3.7.3.2 Technologische Substitution

Die Chlor-Alkali-Elektrolyse mit Sauerstoffverzehrkatode ist aktuell das innovativste Verfahren mit einem gegenüber dem Membranverfahren um 30 % reduzierten Verbrauch an elektrischer Energie.

Im Deacon-Verfahren erfolgt eine Umsetzung von Salzsäure mit Sauerstoff zu Chlor und Wasser. Die Nutzung von Salzsäure als Edukt der Chlorsynthese gilt als wirtschaftlich sinnvoll, da bei vielen technischen Produktionsschritten, die den Einsatz von Chlor erforderlich machen, Salzsäure als Kuppelprodukt anfällt. Beispielsweise wird für die Synthese von Isocyanaten (als wichtigem Ausgangsmaterial für Polyurethane) Phosgen benötigt, welches unter Einsatz von Chlor hergestellt wird. Als Nebenprodukt entsteht HCl, das mittels des Deacon-Verfahrens zu Chlor rezykliert werden kann. Während anfänglich die Reaktion mit Kupferchlorid ( $\text{CuCl}_2$ ) als Katalysator durchgeführt wurde, wird nach dem gegenwärtigen Stand der Technik Rutheniumdioxid ( $\text{RuO}_2$ ) als Katalysator eingesetzt, welches auf einem Träger aus Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) aufgebracht ist. Kommerzialisiert wurde dieses Verfahren seit 2003 von der japanischen Firma Sumitomo Chemicals, die dank der verwendeten Rutheniumdioxid-Katalysatoren einen effizienten und stabilen Deacon-Prozess entwickelt hat. Das Sumitomo-Chlor-Verfahren übertrifft die Chlor-Alkali-Elektrolyse in der Reinheit des gewonnenen Chlors und weist zudem einen „deutlich niedrigeren“ Energieverbrauch auf. (Trieu 2011). Allerdings werden von den jährlich produzierten 80 Mio. t Chlor lediglich max. 1 Mio. t durch Salzsäure-Elektrolyse bzw. HCl-Gasphasenoxiddation (Deacon-Prozess) hergestellt. Ausreichende Mengen Salzsäure zur Substitution stehen nicht zur Verfügung. Auch die als Kuppelprodukt anfallenden ~80 Mio t Natronlauge, die für viele Prozesse (z.B. Seifen-Herstellung, Aluminium-Herstellung, Lebensmittelindustrie, usw.) notwendig ist, wird durch das Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren nicht produziert (Bulan 2016b).

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei einer Substitution der Chlor-Alkali-Elektrolyse durch das Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren Silber derzeit letztlich durch ein noch kritischeres Metall (Ruthenium) substituiert wird. Andererseits wurden in einem BMBF-Projekt auch edelmetallfreie Alternativen für die Ruthenium-Katalysatoren entwickelt; diese bestehen aus Cer- und Aluminiumoxiden (Sawaryn 2011).

### 3.7.3.3 Funktionale Substitution

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

Die folgende Tabelle fasst die verschiedenen Substitutionsansätze nochmals zusammen:

Tabelle 3-57: Substitutionsansätze für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode

Substitutionsebenen	Ansätze
Materialsubstitution	(Substitution von Silber durch Silber(I)- oder Silber(II)-Oxiden)
Technologische Substitution	Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren
Funktionelle Substitution	Substitution der Produkte der Chlorchemie

### 3.7.3.4 Mögliche Effizienzverluste

Bei der Materialsstitution, d.h. der Substitution von Silber durch Silber(I)- oder Silber(II)-Oxiden sind Effizienzverluste nicht bekannt. Tatsächlich sind bereits Mischungen aus elementarem Silber, Silber(I)- oder Silber(II)-Oxiden beschrieben (Bulan et al. 2010).

Beim Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren sind keine Effizienzverluste bekannt. Stattdessen geht Trieu (2011) von einem „deutlich niedrigeren“ Energieverbrauch als bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse aus, wobei keine Quantifizierung erfolgt. Zudem wird eine höhere Reinheit des synthetisierten Chlors beschrieben. Allerdings wird keine Natronlauge als Koppelprodukt geliefert.

Aufgrund der bereits erwähnten Vielschichtigkeit des Marktsegments der Chlorchemie können in Hinblick auf die Effizienzverluste bei einer möglichen Substitution der Produkte der Chlorchemie keine belastbaren Aussagen getroffen werden.

Tabelle 3-58: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkathode

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsstitution</b>	
Substitution von Silber durch Silber(I)- oder Silber(II)-Oxide	Nicht relevant.
<b>Technologische Substitution</b>	
Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren	Keine Effizienzverluste bekannt; stattdessen deutlich niedrigerer Energieverbrauch als bei Chlor-Alkali-Elektrolyse, zudem höhere Reinheit des synthetisierten Chlors. Keine NaOH-Produktion.
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Substitution der Produkte der Chlorchemie	Aufgrund der der Vielschichtigkeit des Marktsegments der Chlorchemie keine belastbaren Aussagen möglich.

### 3.7.3.5 Mögliche Restriktionen

Die Restriktionen der verschiedenen Substitutionsansätze werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-59: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
Substitution von Silber durch Silber(I)- oder Silber(II)-Oxide	Keine bekannt.
<b>Technologische Substitution</b>	
Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren	<p>Korrosionsprobleme an den metallischen Oberflächen des Reaktorgefäßes;  Verdampfen des bisher verwendeten Kupfer-Katalysators bei den hohen Reaktionstemperaturen und in dessen Folge Verkleben im Reaktor bzw. Austrag aus dem Reaktor (Problem durch Sumitomo-Verfahren gelöst);  In diesem Prozess wird (im Gegensatz zur Chlor-Alkali-Elektrolyse) keine Natronlauge mehr hergestellt, daher liegt hier keine vollständige Substitution vor.  Außerdem können von den jährlich produzierten 80 Mio. t Chlor derzeit lediglich max. 1 Mio. t durch Salzsäure-Elektrolyse bzw. HCl-Gasphasenoxiddation (Deacon-Prozess) hergestellt werden. Es wird bezweifelt, ob ausreichende Mengen Salzsäure zur Substitution zur Verfügung stehen (Bulan 2016b).</p>
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Substitution der Produkte der Chlorchemie	<p>Erhebliche direkte bzw. indirekte Abhängigkeit zahlreicher Subsektoren der chemischen Industrie von den Produkten der Chlorchemie;  Zwar könnten einzelne Anwendungsbereiche, z.B. Polyvinylchlorid, durch andere Kunststoffe, welche kein Chlor enthalten, ersetzt werden; dies umfasst aber nur einen Anteil von ca. einem Drittel der Anwendungsbereiche für Chlor (Bulan 2016a).</p>

### 3.7.3.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologien

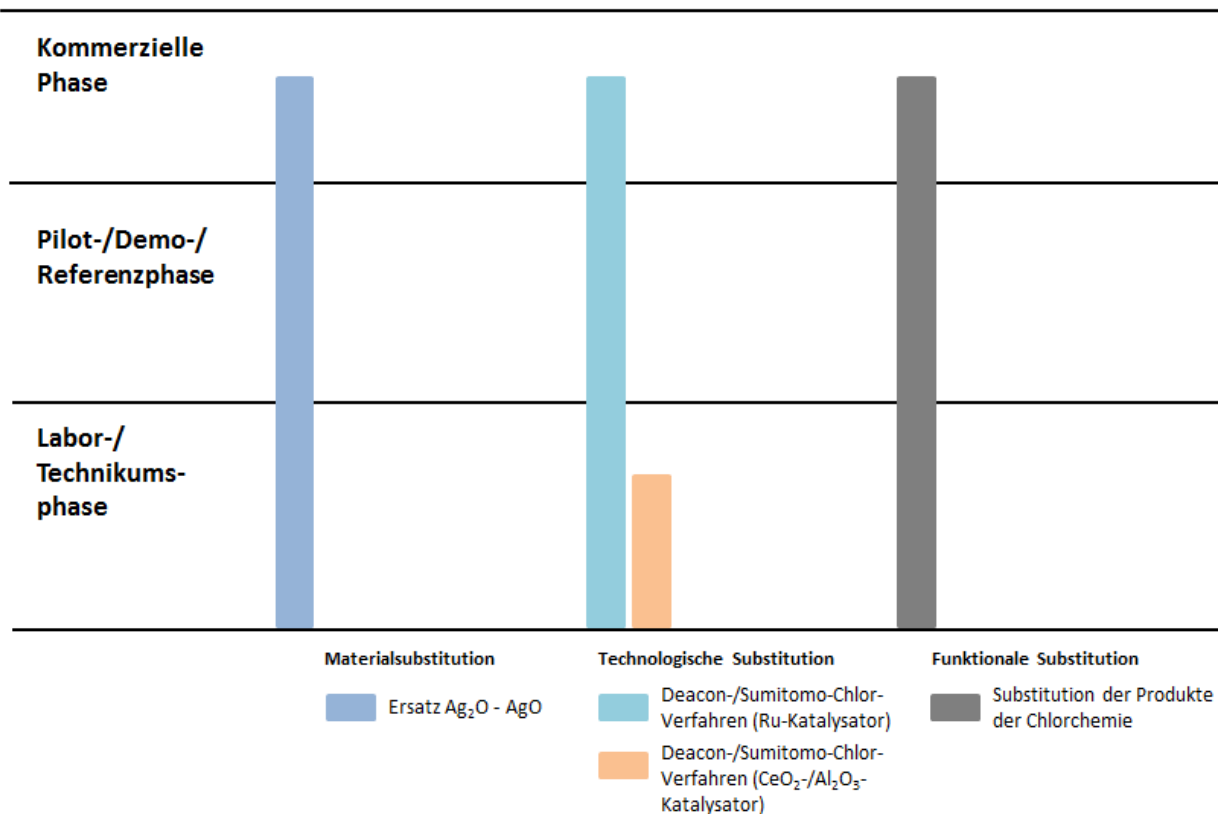
Sawaryn (2011) beziffert für Deutschland das gesamte Energieeinsparpotential auf ca. 400 Mio. kWh/a, falls die Chlor-Alkali-Elektrolyse komplett durch das Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren substituiert wird. Dies wäre mit einer jährlichen Einsparung von Treibhausgasen in Höhe von 0,3 Mio. t CO<sub>2</sub> verbunden.

Die ökologischen Vorteile einer Substitution der Produkte der Chlorchemie äußern sich u.a. darin, dass es im Falle eines Brandes bzw. einer unregelmäßigen Abfallentsorgung nicht zu einer Freisetzung schädlicher, chlorhaltiger Verbrennungsprodukte (wie Chlorwasserstoff oder Dioxinen) kommen kann.

### 3.7.3.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

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

Abbildung 3.15: Technologiereife der Substitutionsoptionen für die Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkathode



Quelle: Eigene Darstellung

### 3.7.3.8 Fazit und Ausblick

Für die Sauerstoffverzehrkathode bestehen sowohl materialbezogene als auch technologische Alternativen, die zudem bereits kommerzialisiert sind. Allerdings bieten diese Alternativen keine effektiven Substitutionsmöglichkeiten, da die verwendeten Katalysatormaterialien entweder (wie bei der Materials substitution) auf der gleichen Rohstoffbasis beruhen bzw. (wie bei der technologischen Substitution) mit dem Einsatz von Ruthenium z.T. auf noch kritischere Rohstoffe als Silber und Nickel zurückgreifen müssen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass das Deacon- bzw. Sumitomo-Chlor-Verfahren im Gegensatz zur Chlor-Alkali-Elektrolyse keine Natronlauge hergestellt wird und folglich keine vollständige Substitution gegeben ist. Außerdem können von den jährlich produzierten 80 Mio. t Chlor derzeit lediglich max. 1 Mio. t durch Salzsäure-Elektrolyse hergestellt werden. In Hinblick auf die Praktikabilität der funktionellen Substitution (Substitution der Produkte der Chlorchemie) können im Rahmen dieser Studie aufgrund des umfangreichen Produktportfolios keine abschließenden Aussagen getroffen werden.

Zudem ist, wie bereits eingangs erwähnt, grundsätzlich zu berücksichtigen, dass bei der Sauerstoffverzehrkathode aufgrund der großen Einheiten und der guten Recycelbarkeit der verwendeten Katalysatoren kein nennenswertes Dissipationsrisiko besteht und folglich im Vergleich zu anderen Umwelttechnologien der Substitutionsbedarf deutlich geringer ausgeprägt ist.

### 3.7.3.9 Literatur

- |             |   |
|-------------|---|
| Bulan 2015  | Bulan, A.; Schriftliche Mitteilung vom 14.08.2015 |
| Bulan 2016a | Bulan, A.; Mündliche Mitteilung vom 13.10.2016    |
| Bulan 2016b | Bulan, A.; Mündliche Mitteilung vom 10.11.2016    |

Bulan et al. 2010    Bulan, A.; Kintrup, J.; Weis, M.; Sauerstoffverzehrkathode und Verfahren zu ihrer Herstellung, Patent, Anmeldenummer DE 102010042729, 2010

Sawaryn 2011        Sawaryn, B.; Effizienzsteigerung bei der Chlorherstellung, Präsentation des BMBF-Projekts 033R018A, Oktober 2011, online verfügbar unter: [http://www.r-zwei-innovation.de/media/V18\\_Status2011.pdf](http://www.r-zwei-innovation.de/media/V18_Status2011.pdf) (abgerufen am 25.08.2016)

Trieu 2011            Trieu, V.; Elektrochemische Synthese von Dimensionsstabilen Anoden für die Chlorelektrolyse; Dissertation, Saarbrücken 2011, online verfügbar unter: <http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/4369/pdf/Datei.pdf> (abgerufen am 25.08.2016)

Experten:

Andreas Bulan        Covestro AG (ehemals Bayer MaterialScience)

### 3.7.4        Weiße Leuchtdioden (UT Nr. 27)

Die Lichterzeugung mittels Festkörpertechnologie basiert auf einem Halbleitereffekt (Elektrolumineszenz). 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. Diese Technologie wird als phosphorconverted white LEDs (pc-wLEDs) bezeichnet. Dabei wird in monochromatischen blauen LEDs zunächst ein blaues Licht emittiert, welche mit speziellen Phosphoreszenzstoffen beschichtet sind. Diese Phosphorschicht wandelt einen Teil des blauen Lichts in langwelligeres gelbes Licht um. Gelb gilt als Komplementärfarbe zu blau und ergibt eine als weiß empfundene Farbmischung.

Letzteres Prinzip hat sich für die technische Anwendung im Beleuchtungssektor als vorteilhaft erwiesen. Erstens sind die pc-wLEDs kostengünstig herstellbar. Zweitens erweisen sich die Leuchtmittel als äußerst langlebig und relativ unempfindlich gegenüber Alterung und Spannungsschwankungen (bei dreifarbigem LED Leuchtmitteln ist die Farbtemperatur durch Spannungsschwankungen und Alterung langfristig instabil). Substitutionspotentiale werden deshalb vorrangig durch Innovation bei Phosphoreszenzstoffen zu suchen sein.

Die Lichterzeugung mittels Elektrolumineszenz geschieht in zwei Schritten: Zunächst wird monochromatisches blaues Licht durch Rekombination von Elektronen mit Ladungslöchern an den p-n-Grenzflächen von Galliumnitrid- oder Indiumgalliumnitrid-Kristallen erzeugt. Im zweiten Schritt erfolgt eine Umwandlung (Lumineszenzkonversion) eines Teils des blauen Lichts in Komplementärfarben (Gelb) durch Anregung von speziellen Phosphoreszenzstoffen. Letztere bestehen aus einer Mischung aus Oxiden von Seltenerdelementen.

### 3.7.4.1 Materialsubstitution

#### Gallium und Indium

Blaue LED-Chips (dyes) bestehen aus Galliumnitrid- oder Indiumgalliumnitrid-Halbleiterkristallen (III/V-Halbleiter)<sup>4</sup>. Angerer et al (2009) geben für diese Substanzen einen Gesamtverbrauch von 0,17 mg Indium und 0,53 mg Gallium pro 1 mm<sup>2</sup> LED-Chip an. Buchert et al (2012) beziffern die Dicke des Chips (dye) auf 10 µm und 250 µm, je nach Herstellungstechnologie<sup>5</sup>. Daraus ergibt sich ein berechneter Materialverbrauch von 0,029 mg (Typ A) bzw. 0,17 mg (Typ B) für Indium und 0,0325 mg (Typ A) bzw. 0,53 mg (Typ B) für Gallium.

Theoretisch existieren materielle Substitutionspotentiale für Gallium oder Indium durch andere Halbleiter oder durch konjugierte Polymere. Aus physikalischen Gründen (Bandlücke) lässt sich blaues Licht jedoch nicht einfach mit anderen Halbleitermaterialien wie Silizium erzeugen. Ein technisch nutzbares Potential zur materiellen Substitution von Gallium und Indium ist deshalb aus heutiger Sicht nicht erkennbar.

#### Germanium

Nach Angaben von Moss et al. (2013) enthalten High-Power wLED-Chips (dyes) das Halbleitermaterial Germanium. Dieses Material ermöglicht eine besonders hohe Lichtausbeute und wird bislang nur in speziellen Anwendungen eingesetzt. Eine materielle Substitutionsmöglichkeit ist bis dato unbekannt.

#### Seltenerdelemente (SEE)

Die Erzeugung von Komplementärfarben zur Erzeugung von weißem Licht mittels Lumineszenzkonversion erfolgt bei heutigen pc-WLEDs üblicherweise mittels Phosphoreszenzstoffen, die aus einem Gemisch von Aluminiumoxid und Oxiden von Seltenerdelementen (Yttrium-Aluminium-Granat - YAG) bestehen. Die Feinabstimmung der Farbtemperatur des blau-gelben Mischspektrums erfolgt durch Dotierung der YAG-Leuchtstoffschicht mit Oxiden von Seltenen Erden (z.B. Cer, Gadolinium, Europium). Die Menge der verwendeten Phosphoreszenzstoffe und Dotierungssubstanzen per LED hängt von deren Größe, Leistung, Lichtfarbe und dem jeweiligen Hersteller ab.

Materielle Substitutionspotentiale für Seltenerdelemente eröffnen sich theoretisch durch die Nutzung von Nanomaterialien in Form von **Quantum Dots (QD)**. Diese Nanoobjekte bestehen aus nanokristallinen Cadmiumselenid (CdSe), welche in einer Hülle (shell) aus Zink- oder Cadmiumsulfid eingehüllt sind. Häufig werden Quantum Dots zudem mit einer organischen Oberflächenbeschichtung (Liganden) ausgerüstet, um eine gleichförmige Größenverteilung und Dispersion in einem organischen Binder (Polymermatrix) zu gewährleisten. Jedes QD-basierte LED-Element enthält 0,3 – 9 µg Cadmium (abhängig von der Größe der LED) bzw. ca. 30 µg Cadmium per Lampe. Quantum Dots zeichnen sich durch eine sehr gute Feinabstimmbarkeit der optischen Eigenschaften aus und ermöglichen die Herstellung von Leuchtmitteln mit hohem Farbwiedergabeindex. Cadmiumhaltige QDs haben zudem eine gute Photostabilität und thermische Stabilität. Allerdings stellt die Nutzung von Cadmiumselenid ein Problem dar, weil Cadmium toxisch ist. Die Substanz fällt unter die RoHS Verordnung 2011/65/EU der EU-Kommission und ihr Einsatz in Produkten ist limitiert. Die Toxizität des Cadmiums kann vor allem beim Recycling und Entsorgung der Leuchtmittel zu negativen Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit führen. Bis dato befinden sich noch keine CdSe-QD-basierten LED Leuchtmittel auf dem europäischen Markt. Die Erteilung einer Ausnahmegenehmigung von der RoHS Verordnung für die Produktgruppe QD-LED Leuchtmittel wird gegenwärtig nicht empfohlen (Gensch et al. 2016). Eine

---

<sup>4</sup> Diese bestehen aus Elementen der 3. und 5. Gruppe des Periodensystems.

<sup>5</sup> Es werden exemplarisch zwei Designvarianten für die Dyes in LEDs beschrieben: Typ A: 10 µm Dicke bei 1 mm<sup>2</sup> Fläche; Typ B: 250 µm Dicke bei 1 mm<sup>2</sup> Fläche.



Materials substitution der wenig toxischen Seltenerdelemente durch toxisches Cadmium führt lediglich zu einer Problemverlagerung und ist daher nicht als zukunftssichere Strategie anzusehen.

Als Alternative dazu wurden cadmium-freie Q-Dots auf Basis von Kupfer-Indium Sulfid/Zink Sulfid (CuInS/ZnS) oder Indium Phosphid (InP/ZnS) für die Anwendung in LED Leuchtmitteln entwickelt und vom Entwickler (Nanoco) an Leuchtmittelhersteller lizenziert (LED professional Review, 2015). Diese cadmium-freie Q-Dots sind konform zu den Anforderungen der RoHS Verordnung. Allerdings ist deren Quantenausbeute bei der Lumineszenzkonversion geringer als bei cadmiumhaltigen QDs. Deshalb sind cadmium-freie Q-Dots bisher vorrangig für das Marktsegment der LED-basierten Hintergrundbeleuchtung für TV Flachdisplays (Flüssigkristall Displays) kommerzialisiert worden (Reinhard, 2016). Im Marktsegment der leistungstärkeren LED-Leuchtmittel sind bislang, abgesehen von einigen Demonstrationsbeispielen, noch keine Produkte in kommerziell nennenswertem Umfang am Markt erhältlich.

Ein anderer vielversprechender Lösungsansatz zur Substitution von Seltenerdelementen in pc-wLEDs existiert in Form sogenannter lumineszierender **Metall-Organischer Frameworks (MOF)**. Diese Chromophore bestehen aus komplexen organischen Molekülen, z.B. Tetrakis(4-carboxy-phenyl)ethylene, die sich um ein Zentrum aus Metallatomen, z.B. Zink oder Kupferjodid gruppieren. MOF demonstrieren einen ähnlichen Performancegrad bei der Lumineszenzkonversion wie herkömmliche YAG Schichten. Eine interne Quantenausbeute von bis zu 95 % ist vergleichbar mit derjenigen handelsüblicher Leuchtstoffe.

Die Emissionsspektren sind beinahe identisch und damit kompatibel zu der am Markt befindlichen LED-Technologie. MOF lassen sich mittels hydrochemischer Verfahren bei relativ milden Prozessparametern herstellen, d.h. durch Mixen und Rühren der Ausgangsstoffe bei Raumtemperatur. Dies unterscheidet die MOF von herkömmlichen oxydischen Phosphoreszenzstoffen, welche bei hohen Temperaturen hergestellt werden und einen entsprechend hohen kumulierten Energieaufwand (KEA) haben. Die Synthese dieser Leuchtstoffe ist deshalb kostengünstiger und lässt sich leicht skalieren.

Zhang et al. (2014) und Liu et al. (2015) beschreiben die Entwicklung eines SEE-freien anorganisch-organischen Hybrid-Phosphors basierend auf MOF mit Kupfer(I) Jodid (CuI). Diese Verbindungen kombinieren starke Lumineszenz mit deutlich verbesserter thermischer Stabilität. Diese ergibt sich durch die anorganischen CuI-Module innerhalb des MOF. Dennoch eignen sich diese MOFs nicht für den Einsatz mit dem gleichen Konstruktionsprinzip konventioneller pc-wLEDs, weil die Hitzeentwicklung auf dem Halbleiterchip zur Zersetzung der MOF führt.

Allerdings befindet sich der Innovationsprozess für diese alternativen Phosphoreszenzstoffe noch im Laborstadium (TRL 1-2). Bevor eine Markteinführung in Frage kommt, müssen die Synthese- und Verarbeitungstechnologien zunächst weiter entwickelt, getestet und hochskaliert werden.

Zusammenfassend lassen sich die bisher bekannten Ersatzmaterialien für pc-wLED wie folgt beurteilen:

- ▶ Eine erfolgreiche Substitution von III/V-Halbleitern durch andere Halbleiter ist aus physikalischen, technischen und ökonomischen Gründen bislang nicht absehbar;
- ▶ Konjugierte Polymere können in Form von OLEDs als Substitut in Frage kommen. Allerdings haben diese Materialien eine schlechte Verarbeitbarkeit, niedrigere Effizienz und geringere Lebensdauer als konventionelle wLEDs;
- ▶ Quantum Dots enthalten das Schwermetall Cadmium, was dessen Anwendung in Massenprodukten limitiert (ROHS-Verordnung). Außerdem ist die Quantenausbeute der QD normalerweise gering und deshalb weniger energieeffizient als SEE-basierte Phosphors;
- ▶ Metall-organische Frameworks haben z.Zt. noch einen niedrigen Reifegrad (TRL) und sind noch nicht für den Dauereinsatz getestet. Zudem haben diese Ersatzstoffe möglicherweise eine

vergleichsweise kurze Haltbarkeit und unzureichende Temperaturstabilität (Lustig et al. 2016).

#### 3.7.4.2 Technologische Substitution

Die technologischen Substitutionspotentiale für wLEDs existieren zumeist im Zusammenhang mit den zuvor erläuterten alternativen Leuchtstoffen. Deren Anwendung wird ein punktuell technisches Re-Design der konventionellen pc-wLEDs erfordern. Beispielsweise sollte die Hitzebelastung der MOF-Leuchtmittel gering sein. Die entsprechende Phosphorschicht muss deshalb mit einem gewissen Abstand zur Chip-Oberfläche angebracht werden, anstatt direkt auf der Chip-Oberfläche (wie heute üblich). Dies zieht eine ganze Reihe zu lösender Probleme nach sich, u.a. die Gleichmäßigkeit (Richtungsisotropie) der abgestrahlten Farbmischung und Leuchtstärke.

Weißer OLEDs werden gemeinhin als potenzielle Nachfolgetechnologie zu wLEDs betrachtet (Kalyania & Dhoble 2012). Die Technologie basiert auf dem Prinzip der polymeren Elektrolumineszenz in konjugierten (halbleitenden) Polymeren. wOLEDs enthalten im Gegensatz zu wLEDs keine Phosphor auf Basis von Seltenerdelementen. Zudem entfällt die Notwendigkeit von Kühlkörpern, weil sich wOLEDs im Betrieb weniger erhitzen als wLED. Das Substitutionspotential von OLED-basierten Leuchtmitteln wird nicht nur von technischen Faktoren beeinflusst, sondern auch vom Produkt-Design und Konsummustern. Insbesondere die Nutzungsdauer der Lichtquellen und deren Ersatzraten bestimmen den Gesamtmaterialverbrauch. Bislang konnten sich starre, auf Glassubstrat basierende weiße OLEDs wegen ihres hohen Preises noch nicht in nennenswertem Umfang am Markt verbreiten. Hingegen wird der Technologie der flexiblen OLEDs ein großes Marktpotential prognostiziert, wenn es gelingt, diese mittels Rolle-zu-Rolle-Produktionstechnologie kostengünstig auf Foliensubstrat herzustellen. In diesem Fall wird das Prinzip der „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. Zudem konnte die Herstellung hocheffizienter und langlebiger OLED Leuchtmittel bei geringen Kosten bisher noch nicht verwirklicht werden.

#### 3.7.4.3 Funktionale Substitution

Eine realistische Substitutionsmöglichkeit für Beleuchtung ist gegenwärtig nicht bekannt.

#### 3.7.4.4 Mögliche Effizienzverluste

Der Gesamtwirkungsgrad der wLED bemisst sich am Produkt der Wirkungsgrade aller am Prozess der Lichtentstehung beteiligten Komponenten. Neben der direkten internen Quanteneffizienz des Halbleiters (diese liegt bei nahezu 100 %) sind die folgenden Aspekte von Bedeutung für die Berechnung des Gesamtwirkungsgrads:

- ▶ Interne Absorption und Auskopplungsrate des Lichts aus dem Halbleitermaterial (richtungsabhängig);
- ▶ Absorption von Lichtquanten in der Phosphorschicht und dem Verkapselungsmaterial;
- ▶ Interne Reflexionen an Schichtgrenzen und Reflexionen beim Lichtaustritt (abhängig vom Brechungsindex der verwendeten Materialien);
- ▶ Wirkungsgrade der externen Vorschalt elektronik;
- ▶ Effektivität der Kühlkörper.

Eine Substitution des SEE-basierten Phosphors durch MOF-basierten Phosphor beeinflusst nur eine der oben genannten Konversionsschritte. Nach bisherigem Kenntnisstand an Labormustern liegt die Effizienz der Phosphoreszenz bei MOF in der gleichen Größenordnung wie SEE. Allerdings sind hier noch keine konkreten Aussagen möglich, weil es für die Gesamteffizienz der wLED-Leuchtmittel letztlich auf die Feinabstimmung aller technischen Komponenten der Lumineszenzkonversion

ankommt. Hierbei spielt auch die Farbwiedergabe und Lebensdauer der wLEDs eine Rolle. Die MOF-basierte wLED-Technologie wird sich zukünftig am Markt gegenüber den konventionellen wLEDs nur dann durchsetzen können, wenn sie hinsichtlich Preis, Energieeffizienz, Farbwiedergabeindex und Lebensdauer zumindest gleichwertig sind. Moderne wLED-Leuchtmittel für den Einsatz im Haushalt erreichen eine Lichtausbeute von 50-80 lm/W; Qualitätsprodukte bis 110 lm/W. Einzelne Hochleistungs-wLEDs erreichen bis 250 lm/W (Dohlus, 2015).

Tabelle 3-60: Mögliche Effizienzverluste der Substitutionsalternativen für weiße Leuchtdioden

Substitutionsebenen	Effizienzverluste
<b>Materialsstitution</b>	
MOF	Geringere Lebensdauer
Q-Dots	Keine
Cadmium-freie Q-Dots	Keine
<b>Technologische Substitution</b>	
Weißer OLEDs	Bisher geringere Energieeffizienz und Lebensdauer als wLEDs; Enthalten Platinmetalle; Neukonfiguration der Luminaire
Foliebasierte flexible wOLEDs	Mögliche Reboundeffekte bei low-cost Massenproduktion
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Nicht anwendbar	

#### 3.7.4.5 Mögliche Restriktionen

Die Anwendung von Phosphoreszenzstoffen basierend auf QD oder MOF würde keine (oder nur unwesentliche) funktionelle Restriktionen in der Nutzungsphase bedingen. Allerdings bleibt abzuwarten, ob die alternativen Leuchtmittel eine akzeptable Farbwiedergabe (Color Rendering Index) und Lebensdauer haben werden. Zumindest die MOF-Technologie ist gegenwärtig noch weit von der Haltbarkeit der SEE-basierten wLEDs entfernt. Während die Lebensdauer der Letzteren mit bis zu 20.000 Stunden angegeben wird, liegt die Lebensdauer der MOF-Phosphoreszenzstoffe im Bereich von wenigen hundert Stunden. Dies ist für eine Markteinführung bei Weitem nicht ausreichend.

Bei der Nutzung von wOLEDs für Beleuchtungszwecke wird eine Systemumstellung der Beleuchtungssysteme unumgänglich. Im Gegensatz zu punktförmigen wLED-Lampen oder bandförmigen wLEDs werden die OLEDs als flächige Lichtquellen zum Einsatz kommen. Dies erfordert einen Neukonzeption und evtl. Austausch bestehender Luminares, Lampenfassungen, Treiber, Umformer, etc. Eine Integration der flächigen OLEDs in bestehende Architekturen im Innen- und Außenbereich erfordert deshalb technische Designlösungen zur Gewährleistung der Kompatibilität zu bestehenden Installationen.

Tabelle 3-61: Mögliche Restriktionen der Substitutionsalternativen für weiße Leuchtdioden

Substitutionsebenen	Restriktionen
<b>Materialsstitution</b>	
MOF	Noch frühes Entwicklungsstadium, viel zu geringere Haltbarkeit
Q-Dots	Cadmiumhaltig, limitierte Zulassung unter RoHS

Substitutionsebenen	Restriktionen
Cadmium-freie Q-Dots	Noch nicht am Markt, für LED Leuchtmittel verfügbar
<b>Technologische Substitution</b>	
Weißer LEDs	Hohe Kosten, inkompatibler Formfaktor zu existierenden Luminares
Foliebasierte flexible wOLEDs	Noch nicht marktreif.
<b>Funktionelle Substitution</b>	
Nicht anwendbar	

#### 3.7.4.6 Ökologische Vorteile bzw. Nachteile gegenüber der derzeitigen Technologie

Die Vorteile der alternativen Phosphoreszenzstoffe gegenüber den bisher verwendeten SEE-Oxiden liegen in deren Unabhängigkeit gegenüber sich verknappenden Ressourcen. Da MOFs voraussichtlich ohne Verwendung von als kritisch eingeschätzten Rohmaterialien (CRM), wie z.B. Seltenen Erden auskommen, besteht ein realistisches Potential zur Schonung natürlicher Ressourcen. Eine vermiedene Steigerung der Nachfrage nach CRM trägt zum Schutz der durch Erweiterung der Ressourcenförderung bedrohten Ökosysteme (z.B. Tiefseeboden) bei.

MOF-basierte Phosphoreszenzstoffe zeichnen sich im Vergleich zu Quantum Dots eine durch ihr geringes Toxizitätspotential (Vermeidung von Cadmium) und einem relativ geringen Energieaufwand in der Herstellungsphase aus. Eine detaillierte Bewertung der Umweltauswirkungen von MOF unter dem Blickwinkel der Lebenszyklusanalyse von wLED-Produkten liegt jedoch noch nicht vor.

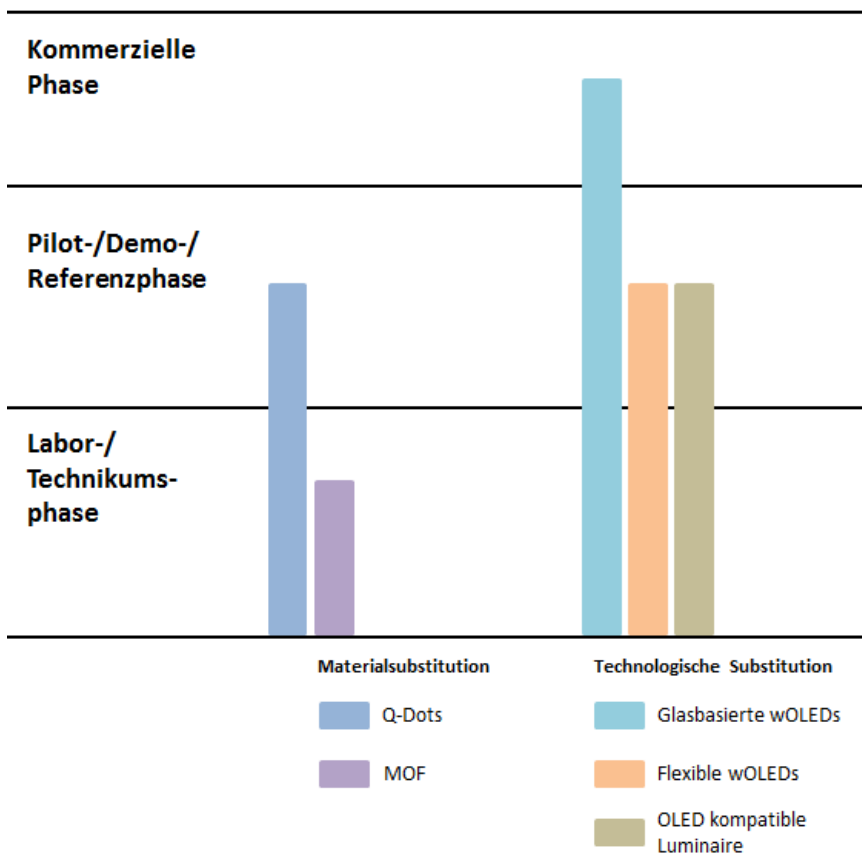
Zudem enthalten MOFs im Gegensatz zu wOLEDs keine als kritisch eingeschätzten Rohmaterialien (CRM), wie z.B. Platinmetalle. Zudem sind MOF-basierte wLED-Lampen kompatibel zu existierenden Beleuchtungssystemen und erfordern deshalb keine Umrüstung oder Neukonzeption bestehender Beleuchtungssysteme.

Es existiert ein gewisses Risiko für das Auftreten von Reboundeffekten wenn wLED-Beleuchtungssysteme bei erfolgreicher Materialsubstitution sehr preisgünstig werden. In dem Fall könnte ein absoluter Zuwachs an Beleuchtung (z.B. Orte, wie Autobahnen, die bisher nicht beleuchtet sind) die Ressourceneinsparungen aufwiegen. Allerdings sind die durch MOF substituierbaren SEE bisher kein entscheidender Kostenfaktor in der wLED-Produktion, so dass diesbezügliche Kosteneinspareffekte zunächst keinen ausschlaggebenden Impuls für besagte Reboundeffekte erwarten lassen.

#### 3.7.4.7 Entwicklungsstadien der Substitutionsalternativen

Die folgende Abbildung fasst die Einschätzungen in Hinblick auf die Technologiereife der verschiedenen Substitutionsmöglichkeiten zusammen.

Abbildung 3.16: Technologiereife der Substitutionsoptionen für weiße Leuchtdioden



Quelle: Eigene Darstellung

Phosphoreszenzstoffe, basierend auf Quantum Dots sind bereits erprobt und am Markt erhältlich (TRL 9-10). Allerdings steht bei herkömmlichen cadmiumhaltigen Q-Dots der Schwermetallgehalt einer weiteren Markteinführung im Wege. Mit Hinblick auf die mögliche zukünftige Nichtgewährung von Ausnahmeregelungen unter ROHS für die Verwendung von Cadmium-haltigen QDs zögern Hersteller von Leuchtmitteln in die Weiterentwicklung dieser Technologie zu investieren. Cadmium-freie Q-Dots werden bereits von einigen Displayherstellern für LED Hintergrundbeleuchtung eingesetzt. Im Marktsegment für Beleuchtung existieren Demonstrationsanwendungen (TRL 8) für Spezialanwendungen (z.B. Gewächshausbeleuchtung) (Wilson, K. 2016).

MOF-basierte Phosphoreszenzstoffe befinden sich noch im Laborstadium (TRL 1-2). Wesentliche Entwicklungsarbeit ist noch zu leisten, um die Haltbarkeit der MOF in der Betriebsphase der wLEDs massiv zu verlängern. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Technologie in der Praxis. Die Lebensdauer und Ausfallrate von SEE-basierten wLEDs bei annähernd gleichbleibender Farbwiedergabe gilt hierfür als Maßstab (ca. 50.000 Stunden bei L70/B10 gekennzeichneten Lampen)<sup>6</sup>. Eine Marktreife innerhalb der nächsten 10 Jahre erscheint aus heutiger Sicht unwahrscheinlich.

Die wOLED Technologie befindet sich technologischer Ausprägung in fortgeschrittener Technologiereife. Glasbasierte wOLED-Paneele sind bereits kommerziell erhältlich, allerdings zu sehr hohem Preis. Gegenwärtig ist diese Technologie aus Kostengründen noch nicht konkurrenzfähig.

<sup>6</sup> Dabei ist zu bedenken, dass auch die heute am Markt befindlichen wLED Leuchtmittel eine erhebliche Bandbreite der Qualität aufweisen. Billige wLED Lampen degenerieren in kürzerer Zeit und haben eine höhere Ausfallrate.

Hingegen sind die Folie-basierten wOLEDs gegenwärtig noch in der mittleren Entwicklungsreife (TRL 5-6). Namhafte Forschungsinstitute und Hersteller experimentieren mit der Rolle-zu-Rolle-Herstellung kostengünstiger wOLEDs auf Polymerbasis. Allerdings sind hierbei noch wesentliche technologische Barrieren zu überwinden (z.B. Entwicklung flexibler Barrierschichten gegen O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O Diffusion). Eine Marktreife innerhalb der nächsten 5 Jahre erscheint aus heutiger Sicht unwahrscheinlich.

#### 3.7.4.8 Fazit

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

#### 3.7.4.9 Literatur

- Angerer, G. et al. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel D. (2012) Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. Hrsg: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW)
- Dohlus R. (2015) Lichtquellen. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 01.01.2015 - 214 Seiten
- Gensch C-O., Baron Y., Blepp M. (2016) Assistance to the Commission on Technological Socio-Economic and Cost-Benefit Assessment Related to Exemptions from the Substance Restrictions in Electrical and Electronic Equipment: Pack 10 Final Report. Report for the European Commission-prepared by Oeko-Institut e.V., Institute for Applied Ecology.
- Ilic O., Bermel P., Chen G., Joannopoulos J.D., Celanovic I., Soljačić M. (2016) Tailoring high-temperature radiation and the resurrection of the incandescent source. *Nature Nanotechnology* 11, 320–324. DOI: 10.1038/NNANO.2015.309
- Kalyania, T., Dhobleb S.J. (2012) Organic light emitting diodes: Energy saving lighting technology—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2696–2723.
- LED professional Review (2015) Cadmium-Free Quantum Dot Technology in LED Lighting. Online verfügbar: <https://www.led-professional.com/technology/light-generation/cadmium-free-quantum-dot-technology-in-led-lighting>
- Liu, W., Yang Fang, George Z. Wei, Simon J. Teat, Kecai Xiong, Zhichao Hu, William P. Lustig, Jing Li (2015) A Family of Highly Efficient CuI-Based Lighting Phosphors Prepared by a Systematic, Bottom-up Synthetic Approach. *J. Am. Chem. Soc.* DOI: 10.1021/jacs.5b04840
- Lustig, W.P., Wang, F., Teat, S.J., Hu, Z., Gong, Q., Li, J. (2016) Chromophore-Based Luminescent Metal–Organic Frameworks as Lighting Phosphors. *Inorg. Chem.*, DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b00897
- 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
- Reinhard, S. (2016) Cadmium-Free Quantum Dots Offer Vibrant Color for Liquid Crystal Displays. *Photonics Spectra*. Online verfügbar: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=58504>
- Wilson, K. (2016) Nanoco to Showcase Innovative Cadmium-Free Quantum-Dot Enabled LED Lighting for Agriculture at Indoor Ag-Con Event in Las Vegas. Online verfügbar:

<http://www.businesswire.com/news/home/20160328005311/en/Nanoco-Showcase-Innovative-Cadmium-Free-Quantum-Dot-Enabled-LED>

Zhang, X., Liu, W., Wei, Z.G., Banerjee, D., Hu, Z., Li, J. (2014) Systematic Approach in De-signing Rare-Earth-Free Hybrid Semiconductor Phosphors for General Lighting Applications. J. Am. Chem. Soc.. doi.org/10.1021/ja507927a



## 4 Fazit / Zusammenfassung

Nach dem Substitutionspotentialscreening in Arbeitspaket 4 und der Diskussion mit Validierung durch die Expertinnen und Experten des Fachgesprächs können die 20 untersuchten Umwelttechnologien in vier Gruppen geclustert werden. Zum einen in die Gruppe A) der Umwelttechnologien, für die bereits heute Substitutionsalternativen auf den Markt vorhanden sind und kritische Metalle substituiert werden. Eng an diese Gruppe angelehnt ist das Cluster B). In diese Gruppe fallen Umwelttechnologien, die marktreife Alternativen besitzen mit deutlicher Reduzierung des Einsatzes der als kritisch identifizierten Metalle. In Gruppe C) werden Umwelttechnologien eingestuft, die Substitutionsoptionen besitzen, die noch nicht im Markt etabliert sind, aber großes Potential für eine absehbare Marktreife besitzen. Diese Technologien sind ökonomisch noch nicht wettbewerbsfähig oder die Entwicklung ist noch nicht vollständig ausgereift. Gruppe D) besteht aus Umwelttechnologien, für die keine Substitutionsmöglichkeiten im Rahmen des Projektes identifiziert werden konnten.

In der folgenden Clusterung werden für die Gruppen A) und B) die vielversprechendsten Substitutionsmöglichkeiten mitangegeben.

A) Umwelttechnologien mit bereits heute im Markt vorhandenen Substitutionsmöglichkeiten:

- ▶ Bleifreie Lote (UT Nr. 56): Silber-Sintern
- ▶ Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren (UT Nr. 43): Elektromobilität
- ▶ Permanentmagnete in vollelektrischen Pkw (UT Nr. 38): ASM, EESM
- ▶ Hochleistungs-Permanentmagnete: Übrige Anwendungen (UT Nr. 60): Reluktanzmotor - allerdings nur bei bestimmten Anwendungen als Substitut möglich
- ▶ Dünnschicht-Solarzellen (UT Nr. 87): Kristalline Zellen
- ▶ Tandemzellen (UT Nr. 90): CSP-Anlagen und Silizium-Photovoltaik-Farmen
- ▶ CSP-Technologie (UT Nr. 93): Kristalline Zellen
- ▶ RFID (UT Nr. 5): optische Trennverfahren mit Computerunterstützung
- ▶ Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode (UT Nr. 13b)

B) Umwelttechnologien mit deutlicher Materialeinsparung / Reduzierung des Gehalts an kritischen Metallen:

- ▶ Pedelec-Batterien (UT Nr. 35): Reduzierter Li-Einsatz
- ▶ HEV (UT Nr. 37): Reduzierter SEE-Einsatz (ohne HREE)
- ▶ PHEV (UT Nr. 38): Reduzierter SEE-Einsatz
- ▶ Lithium-Ionen Stromspeicher (UT Nr. 100)
- ▶ Lithium-Ionen Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98)

C) Umwelttechnologien mit Substitutionsoptionen, die absehbar Marktreife erreichen können. Diese Technologien sind ökonomisch noch nicht wettbewerbsfähig oder die technologischen Bedingungen sind nicht ausreichend:

- ▶ Permanentmagnet-Generatoren für WKA (UT Nr. 106): HTS benötigt noch technologischen Fortschritt
- ▶ Weiße LED (UT Nr. 27): OLEDs preislich noch nicht wettbewerbsfähig

D) Umwelttechnologien ohne absehbare Substitutionsalternativen:

- ▶ Grüne Rechenzentren (UT Nr. 24)
- ▶ Industriekatalysatoren (UT Nr. 53)
- ▶ Pedelec-Motoren (UT Nr. 35)

- ▶ Synchron-Generatoren in WKA (UT Nr. 107)
- ▶ Asynchron-Generatoren in WKA (UT Nr. 108)
- ▶ Kraftwerke GuD/Gas (UT Nr. 83)

## 5 Anhang

Teilnehmerliste des Fachgesprächs am 13.10.2016

Dr.	Dieter	Schmid	Volkswagen AG
Dr.	Marko	Gernuks	Volkswagen AG
	n.n.	n.n.	Umicore AG & Co. KG
Dr.	Jörg	Zimmermann	IWKS (Fraunhofer ISC)
Dr.	Roland	Hord	IWKS (Fraunhofer ISC)
	Gregor	Dietz	SEW Eurodrive
Dr.	Hannelore	Katzke	Projektträger Jülich
Prof. Dr.	Tobias	Elwert	TU Clausthal
	Andreas	Bulan	Covestro AG
Dr.-Ing.	Otmar	Deubzer	United Nations University
Dr.-Ing.	Hans	Walter	Fraunhofer IZM
Dr.	Frank	Marscheider-Weidemann	Fraunhofer ISI
	Marc	Wilkens	proRZ
Dr.	Ralph	Hintemann	Borderstep gGmbH
Dr.	Torsten	Brandenburg	DERA
	Christiane	Heiß	BMUB
	Christiane	Schnepel	UBA
	Marina	Köhn	UBA
	Christian	Liesegang	UBA
Dr.	Matthias	Buchert	Öko-Institut
Dr.	Siegfried	Behrendt	IZT
	Adrian	Röben	IZT
	Janire	Clavell	IZT
Dr.	Winfried	Bulach	Öko-Institut
	Stefanie	Degreif	Öko-Institut
	Martin	Möller	Öko-Institut
	Andreas	Köhler	Öko-Institut
	Felix	Müller	UBA