

TEXTE

03/2019

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

Arbeitsbericht 6: Substitutions-Roadmap

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl [FKZ 3714 93 316 0]  
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

# **Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien**

## **Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen**

### **Arbeitsbericht 6: Substitutions-Roadmap**

Dr. Matthias Buchert, Stefanie Degreif, Dr. Winfried Bulach  
Öko-Institut e. V., Darmstadt

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

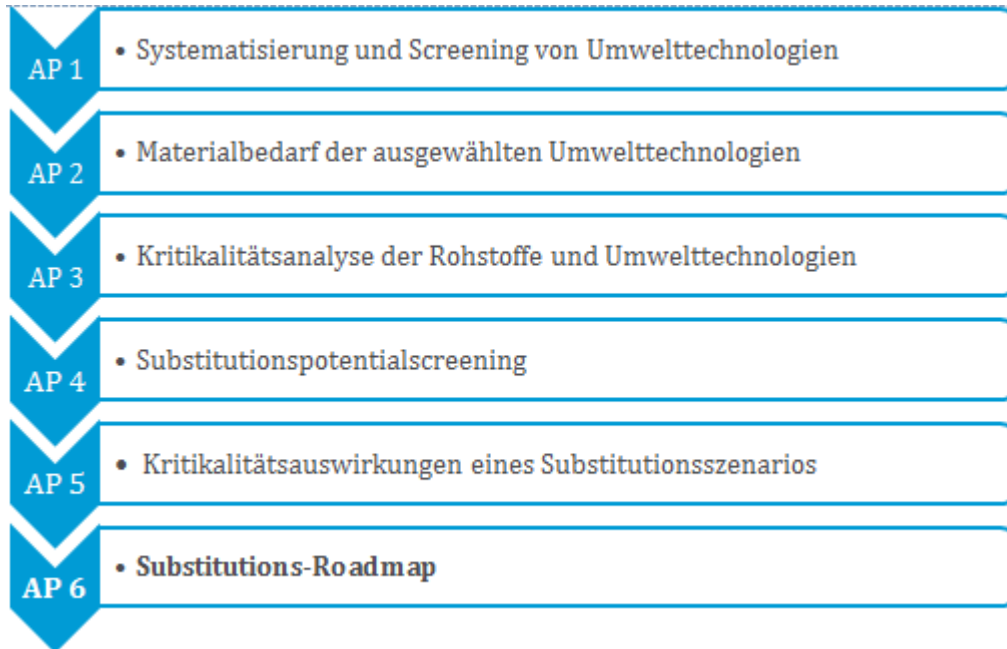
Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Abschlussdatum [29.09.2017]

### Einordnung des Arbeitsberichtes 6:

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 6 ist der letzte Arbeitsbericht im Rahmen des Projektes. Er stellt die Substitutions-Roadmap der einzelnen 14 ausgewählten Umwelttechnologien vor.

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

## Übersicht der 40 prioritären Umwelttechnologien\*

| UT Nr. | UT Name                                                       |
|--------|---------------------------------------------------------------|
| 2      | Kompressoren                                                  |
| 5      | RFID                                                          |
| 8      | Aerogele                                                      |
| 12     | Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle               |
| 13b    | Membranelektrolyse Chlor-Alkali mit Sauerstoffverzehrkatode   |
| 16     | Celitement                                                    |
| 24     | Grüne Rechenzentren                                           |
| 26     | OLED                                                          |
| 27     | weiße LED                                                     |
| 33     | Automatische Stofftrennverfahren                              |
| 35     | Pedelecs                                                      |
| 37     | Hybridmotoren                                                 |
| 38     | Elektroantriebsmotoren                                        |
| 39     | Karosserie                                                    |
| 40     | Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke                             |
| 41     | Leichtbau - Titan und Sc-Airframe                             |
| 43     | Fahrzeug-Abgas-Katalysator                                    |
| 48     | Dezentrale Wasseraufbereitung                                 |
| 49b    | Wassereffizienztechnologien                                   |
| 50+51  | Membrantechnik                                                |
| 52     | Phosphorrückgewinnung                                         |
| 53     | Industriekatalysatoren                                        |
| 56     | Bleifreie Lote                                                |
| 60     | Hochleistungs-Permanentmagnete: übrige Anwendungen            |
| 67     | Nanobeschichtung von Oberflächen                              |
| 68     | Precision Farming                                             |
| 70     | Me-Schlackenaufbereitung                                      |
| 83     | Kraftwerke – GuD/Gas                                          |
| 87     | Dünnschicht-Solarzellen                                       |
| 90     | Tandemzellen                                                  |
| 91     | Si-Dickschichtzellen                                          |
| 93     | CSP-Technologie                                               |
| 98     | Li-Ionen Batterien für PHEV                                   |
| 100    | Lithium-Ionen-Stromspeicher                                   |
| 105    | Speicherkraftwerke - Pumpspeicherkraftwerk                    |
| 106    | Permanentmagnet-Generator (synchron) - high-speed (Windkraft) |
| 107    | Synchron-Generatoren                                          |

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

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

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildungsverzeichnis .....                                             | 9  |
| Tabellenverzeichnis .....                                               | 10 |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                             | 11 |
| 1 Einleitung und Vorgehen .....                                         | 12 |
| 1.1 Was soll die Roadmap leisten? .....                                 | 12 |
| 1.2 Struktur und Schritte zur Erstellung der Roadmap.....               | 12 |
| 2 Roadmap-Entwürfe für die ausgewählten Umwelttechnologien.....         | 14 |
| 2.1 Motoren .....                                                       | 14 |
| 2.1.1 Hybridmotoren (UT Nr. 37) .....                                   | 14 |
| 2.1.2 Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38) .....                          | 17 |
| 2.1.2.1 Elektroantriebsmotor im BEV .....                               | 17 |
| 2.1.2.2 Elektroantriebsmotor im PHEV .....                              | 19 |
| 2.1.3 Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie (UT Nr. 60) ..... | 22 |
| 2.2 Solarenergie .....                                                  | 25 |
| 2.2.1 Dünnschicht-PV (UT Nr. 87) .....                                  | 25 |
| 2.2.2 Tandemzellen (UT Nr. 90) .....                                    | 26 |
| 2.2.3 Concentrating Solar Power (CSP) (UT Nr. 93) .....                 | 28 |
| 2.3 Beleuchtung .....                                                   | 29 |
| 2.3.1 Weiße LED (UT Nr. 27).....                                        | 29 |
| 2.4 Weitere Technologien .....                                          | 33 |
| 2.4.1 RFID für Wertstofftrennung (UT Nr. 05) .....                      | 33 |
| 2.4.2 Membranelektrolyse (UT Nr. 13) .....                              | 34 |
| 2.4.3 Fahrzeug-Abgas-Katalysator (UT Nr. 43).....                       | 36 |
| 2.4.4 Bleifreie Lote (UT Nr. 56).....                                   | 38 |
| 2.4.5 Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98).....            | 41 |
| 2.4.6 Lithium-Ionen-Speicher (UT Nr. 100) .....                         | 45 |
| 2.4.7 Permanentmagnetgeneratoren in WKA (UT Nr. 106).....               | 50 |
| 3 Zusammenfassung nach Priorität der Substitutionsalternativen .....    | 54 |

## Abbildungsverzeichnis

|                 |                                                                                                                                                          |    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-1:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Hybridmotoren mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....                                   | 16 |
| Abbildung 2-2:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Elektroantriebsmotoren (BEV und PHEV) mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....           | 22 |
| Abbildung 2-3:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie mit Unterscheidung der Handlungsfelder ..... | 24 |
| Abbildung 2-4:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Dünnschicht-PV mit Unterscheidung der Handlungsfelder.....                                   | 26 |
| Abbildung 2-5:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Tandemzellen mit Unterscheidung der Handlungsfelder.....                                     | 28 |
| Abbildung 2-6:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der CSP mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....                                             | 29 |
| Abbildung 2-7:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der weißen LED mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....                                      | 32 |
| Abbildung 2-8:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der RFID mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....                                            | 34 |
| Abbildung 2-9:  | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Membranelektrolyse mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....                              | 35 |
| Abbildung 2-10: | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....                    | 37 |
| Abbildung 2-11: | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der bleifreien Lote mit Unterscheidung der Handlungsfelder.....                                  | 41 |
| Abbildung 2-12: | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....           | 45 |
| Abbildung 2-13: | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Lithium-Ionen-Speicher mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....                          | 49 |
| Abbildung 2-14: | Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Permanentmagnetgeneratoren in WKA mit Unterscheidung der Handlungsfelder .....               | 52 |
| Abbildung 3-1:  | Übersicht der Substitutionsoptionen der ersten Priorität .....                                                                                           | 55 |
| Abbildung 3-2:  | Übersicht der Substitutionsoptionen der zweiten Priorität .....                                                                                          | 56 |
| Abbildung 3-3:  | Übersicht der Substitutionsoptionen der dritten Priorität.....                                                                                           | 57 |

## Tabellenverzeichnis

|               |                                                                                                                |    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2-1:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Hybridmotoren (UT Nr. 37) .....                                  | 14 |
| Tabelle 2-2:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der BEV-Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38).....                      | 18 |
| Tabelle 2-3:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der PHEV-Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38).....                     | 20 |
| Tabelle 2-4:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie (UT Nr. 60)..... | 23 |
| Tabelle 2-5:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Dünnschicht-PV (UT Nr. 87).....                                | 25 |
| Tabelle 2-6:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Tandemzellen (UT Nr. 90) .....                                 | 27 |
| Tabelle 2-7:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der CSP (UT Nr. 93) .....                                          | 28 |
| Tabelle 2-8:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der weißen LED (UT Nr. 27) .....                                   | 30 |
| Tabelle 2-9:  | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der RFID (UT Nr. 05).....                                          | 33 |
| Tabelle 2-10: | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Membranelektrolyse (UT Nr. 13).....                            | 35 |
| Tabelle 2-11: | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren (UT Nr. 43) .....                 | 36 |
| Tabelle 2-12: | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der bleifreien Lote (UT Nr. 56).....                               | 39 |
| Tabelle 2-13: | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98) .....        | 42 |
| Tabelle 2-14: | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Lithium-Ionen-Speicher (UT Nr. 100).....                       | 45 |
| Tabelle 2-15: | Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Permanentmagnetgeneratoren in WKA (UT Nr. 106) .....           | 50 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                |                                                                                                                                       |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AiF</b>     | Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen                                                                             |
| <b>ASM</b>     | Asynchronmotor                                                                                                                        |
| <b>BEV</b>     | Vollelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)                                                                                  |
| <b>BMBF</b>    | Bundesministerium für Bildung und Forschung                                                                                           |
| <b>BMVI</b>    | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur                                                                              |
| <b>BMWi</b>    | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie                                                                                          |
| <b>CBA</b>     | Cost-benefit analysis                                                                                                                 |
| <b>CEN</b>     | Europäisches Komitee für Normung                                                                                                      |
| <b>CRM</b>     | Critical Raw Material                                                                                                                 |
| <b>DIN</b>     | Deutsches Institut für Normung                                                                                                        |
| <b>EESM</b>    | Extern erregter Synchronmotor                                                                                                         |
| <b>EGS</b>     | Ecosystem Goods and Services                                                                                                          |
| <b>EIP</b>     | European Innovation Partnership                                                                                                       |
| <b>EIT</b>     | European Institute of Innovation & Technology                                                                                         |
| <b>ERECON</b>  | European Rare Earths Competency Network                                                                                               |
| <b>EU</b>      | Europäische Union                                                                                                                     |
| <b>FP9</b>     | 9. Forschungsrahmenprog                                                                                                               |
| <b>FhG</b>     | Fraunhofer Gesellschaft                                                                                                               |
| <b>F&amp;E</b> | Forschung und Entwicklung                                                                                                             |
| <b>HELCOM</b>  | Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area). |
| <b>IGF</b>     | Industrielle Gemeinschaftsforschung                                                                                                   |
| <b>JRC</b>     | Joint Research Center                                                                                                                 |
| <b>LED</b>     | Light-emitting diode, Leuchtdiode                                                                                                     |
| <b>OLED</b>    | Organic light emitting diode, organische Leuchtdiode                                                                                  |
| <b>PHEV</b>    | Plug-in Hybrid Pkw                                                                                                                    |
| <b>RFID</b>    | Radio Frequency Identification                                                                                                        |
| <b>SEE</b>     | Seltene Erden Elemente                                                                                                                |
| <b>SRM</b>     | Geschalteter Reluktanzmotor                                                                                                           |
| <b>TCO</b>     | Transparent conducting oxide                                                                                                          |
| <b>VDA</b>     | Verband der Automobilindustrie e.V.                                                                                                   |
| <b>VDI ZRE</b> | VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH                                                                                                  |
| <b>VDMA</b>    | Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.                                                                                      |
| <b>ZVEI</b>    | Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.                                                                           |

## 1 Einleitung und Vorgehen

Nach Geschka et al.<sup>1</sup> gibt es keine einheitliche Definition des Begriffs „Roadmap“. Eine Roadmap stellt Wege im Zeitverlauf dar und bildet dabei übersichtlich Entwicklungslinien und Ereignisse in ihrer zeitlichen Struktur ab.

### 1.1 Was soll die Roadmap leisten?

Die Roadmap soll sichtbar machen, wo Handlungsbedarf besteht und worin dieser besteht, um die identifizierten Substitutionspotentiale erschließen zu können. Dazu soll der Handlungsbedarf in konkrete Maßnahmen übersetzt werden, für die gezielte Anstrengungen der Akteure im Innovationssystem sowohl auf Seiten der Politik (z. B. im Rahmen der Forschungs-, Innovations- und Diffusionsförderung) und der Forschungseinrichtungen (z. B. Fraunhofer-Gesellschaft, Industrielle Gemeinschaftsforschung AIF, Hochschulen, Großforschungseinrichtungen etc.) als auch auf Seiten der Wirtschaft und Verbände erforderlich sind. Dabei sind die Grundbedingungen des deutschen und internationalen Innovationssystems zu berücksichtigen. Dies dient vor allem dem Zweck, darin Anknüpfungspunkte für eine Substitutionsstrategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien aufzuzeigen. Basis für die Ermessung des technologie- bzw. substitutionsspezifischen Handlungsbedarfs liefern die Ergebnisse insbesondere aus AP 4 und AP 5. Bei der Ausarbeitung der Roadmap sollen außerdem nationale, europäische und internationale Aktivitäten von Politik und Wirtschaft, die Fragen zur Substitution von kritischen Rohstoffen aufgreifen, berücksichtigt werden. Hierzu zählen insbesondere die Rohstoffstrategie der Bundesregierung, das Ressourceneffizienzprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und die Forschungsaktivitäten zu wirtschaftsstrategischen Rohstoffen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Hervorzuheben ist auf europäischer Ebene u. a. die European Innovation Partnership (EIP) mit der Untergruppe zu Rohstoffen. Ein Arbeitsfeld dieser Gruppe ist auch die Erschließung von Substitutionspotentialen. Weiterhin hat das Europäische Parlament ein Dokument zur „Sustainability of Critical Raw Materials“ erstellt. Das „Critical Raw Materials Innovation Network“ (CRM\_InnoNet) wiederum zielt darauf, ein Netzwerk zu schaffen, das Innovationen auf dem Gebiet der Substitution kritischer Rohstoffe vorantreibt. Ein Ergebnis von CRM InnoNet sind „Roadmaps for the Substitution of Critical Raw Materials“ für verschiedene Zukunftstechnologien. Auf Antrag des Europäischen Parlaments hat die EU-Kommission die Schaffung des europäischen Kompetenznetzes „Seltene Erden“ (ERECON) veranlasst, welches auch Empfehlungen zur Substitution Seltener Erden gibt. Weiterhin hat die EU mit dem EIT Raw Materials das weltweit größte Konsortium im Rohstoffsektor initiiert. Das EIT Raw Materials vereint dabei mehr als 120 Partner aus führender Industrie, Universitäten und Forschungseinrichtungen aus mehr als 20 EU-Ländern entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Exploration, Bergbau, Mineralaufbereitung bis hin zu Substitution, Recycling und Kreislaufwirtschaft.

### 1.2 Struktur und Schritte zur Erstellung der Roadmap

Für verschiedene Handlungsfelder soll ein Katalog von Einzelmaßnahmen (technologiespezifisch als auch übergreifend) ausgearbeitet werden, für deren Umsetzung Zeitpunkte und Zeiträume (kurz-, mittel und langfristig) sowie Akteure im Innovationssystem spezifiziert werden. Zentrale Handlungsfelder für die Erschließung der identifizierten Substitutionspotentiale sind die Technologieentwicklung, die Markteinführung und die Marktdurchdringung mit Schaffung von geeigneten Formaten für Qualifizierung, Austausch und Monitoring von Substitutionsmöglichkeiten.

---

<sup>1</sup> Geschka et al. 2017: Geschka, H; Schauffele, J; Zimmer, C.: Explorative Technologie-Roadmaps – Eine Methodik zur Erkundung technologischer Entwicklungslinien und Potenziale. In M. Möhrle, R. Isenmann (Hrsg.), Technologie-Roadmapping, VDI-Buch, DOI 10.1007/978-3-662-52709-2\_6

Neben Forschungs-, Innovations- und Diffusionsförderung sind politisch-regulative Anreize (besonders im Bereich der funktionalen Substitution) relevant und deshalb zu prüfen. Ebenso werden Substitutionspotentiale aufgezeigt, für die noch keine Maßnahmen erkennbar sind.

In folgenden Einzelschritten wurden die Roadmaps (eine Roadmap je Umwelttechnologie) erstellt:

- ▶ Schritt 1:  
Ermittlung des Handlungsbedarfs zur Erschließung der in AP 5 aufgezeigten Substitutionspotentiale (für jede Umwelttechnologie und Substitutionsoption)
- ▶ Schritt 2:  
Identifikation von möglichen Maßnahmen für jede Substitutionsoption (sofern Handlungsbedarf besteht)
- ▶ Schritt 3:  
Priorisierung von Maßnahmen nach Größe des Substitutionspotentials. Priorisierung der Substitutionsoptionen mittels Annahmen zum Marktanteil in 2025 (AP5):  
1. Priorität: > 15 %; 2. Priorität: > 5-15 %; 3. Priorität: ≤ 5 %
- ▶ Schritt 4:  
Konkretisierung der Angaben zu den Substitutionsoptionen hinsichtlich des Handlungsbedarfs der Maßnahmen, Akteure und des Zeithorizonts
- ▶ Schritt 5:  
Bündelung und Visualisierung der Maßnahmen in Form eines „Fahrplans“ zur Erschließung der Substitutionspotentiale.

Am Ende dieses Dokumentes wird in Kapitel 3 eine Gesamtübersicht aller Maßnahmen (über alle Umwelttechnologien) nach Prioritäten dargestellt.

## 2 Roadmap-Entwürfe für die ausgewählten Umwelttechnologien

In diesem Kapitel wird für jede der 14 ausgewählten Umwelttechnologien ein Roadmap-Entwurf zur Erreichung der Substitutionsziele im Substitutionsszenario (siehe AP 5) dargestellt. Die Umwelttechnologien sind dabei in Technologiegruppen eingeteilt.

Die Unterkapitel zu den Roadmap-Entwürfen sind analog aufgebaut. Nach einer kurzen Einführung werden die Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionspotentiale zunächst tabellarisch dargestellt. Die Angabe der Priorität 1, 2, 3 bezieht sich auf den angenommenen Marktanteil der Substitutionsoption in 2025 (1. Priorität: > 15 %; 2. Priorität: > 5-15 %; 3. Priorität: ≤ 5 %). Weiterhin werden Ziele der Maßnahme, Akteure und der Zeithorizont ausgewiesen. Nach der Begründung und Erläuterung der Annahmen schließt das Roadmap-Kapitel zu den jeweiligen Technologien mit einer Übersicht der Maßnahmen nach Handlungsfeldern (Technologieentwicklung, Markteinführung, Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch, rechtlich-regulatorischer Rahmen) und einem Fazit.

### 2.1 Motoren

#### 2.1.1 Hybridmotoren (UT Nr. 37)

Es wird angenommen, dass die Umwelttechnologie der Hybridmotoren in Fahrzeugen (UT Nr. 37) in 2025 auf zwei Substitutionsoptionen zurückgreifen kann. In 2025 wird angenommen, dass 5 % der Hybridmotoren (SEE-Synchronmotoren) durch Asynchronmotoren (ASM) – die sich bereits heute in der Pilotphase für Hybridmotoren und im Markt bei BEV<sup>2</sup>-Motoren befinden - ersetzt werden. Weiterhin sind im Substitutionsszenario in 2025 50% der Hybridmotoren mit Synchronmotoren mit reduziertem SEE-Gehalt (ohne schwere Seltene Erden) substituiert. Der Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt (ohne schwere Seltene Erden) ist bereits heute im Markt vertreten (z. B. Honda Freed).

Es wird davon ausgegangen, dass es in 2050 einen Mix an verschiedenen Motorentypen geben wird. In 2050 sind neben dem ASM (15 % Marktanteil) und dem Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt (50 % Marktanteil) auch der ASM mit hohem rpm<sup>3</sup> (5 %), der EESM<sup>4</sup> (5 %), sonstige Permanentmagnet-Motoren (5 %) und der SRM<sup>5</sup> (5 %) auf dem Markt vertreten.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Hybridmotoren aufgelistet.

Da die Unsicherheiten bis 2050 noch größer sind, wird sich in der Ausarbeitung auf den Zeithorizont bis 2025 konzentriert. In kursiver Schrift sind Maßnahmen für die Erreichung der Substitutionen 2050 dargestellt.

Tabelle 2-1: Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Hybridmotoren (UT Nr. 37)

| Subst. Nr. | Substitutions-option | Priorität | Ziel der Maßnahmen             | Maßnahmen               | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeithorizont |
|------------|----------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|--------------|
| 37-1       | ASM                  | 3         | Steigerung der Leistungsdichte | Technologie-entwicklung | <b>Motoren-hersteller,</b>                 | 2017-2023    |

<sup>2</sup> BEV = battery electric vehicle = vollelektrisches Fahrzeug

<sup>3</sup> Asynchronmotor mit hoher Umdrehung pro Minute (revolution per minute)

<sup>4</sup> Extern erregter Synchronmotor

<sup>5</sup> Geschalteter Reluktanzmotor

| Subst. Nr. | Substitutions-option                          | Priorität                    | Ziel der Maßnahmen                            | Maßnahmen                | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt)                                                                                     | Zeithorizont |
|------------|-----------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 37-2       | Reduzierter SEE-Gehalt                        | 1                            |                                               | hinsichtlich Optimierung | <b>Motorenentwickler, BMBF,</b> Forschungsinstitute<br>EU: Horizon                                                             |              |
|            |                                               |                              | Marktdurchdringung                            | Informationsangebot      | <b>Motorenhersteller,</b> Bundesregierung, (BMUB, BMWi), VDMA, VDA, ZVEI, VDI<br>ZRE<br>EU: JRC, Horizon, EIT                  | 2022-2030    |
|            |                                               |                              | Marktdurchdringung                            | Informationsangebot      | <b>Motorenhersteller, Magnethersteller,</b> Bundesregierung (BMUB, BMWi), VDMA, VDA, ZVEI, VDI<br>ZRE<br>EU: JRC, Horizon, EIT | 2017-2025    |
| 37-3       | ASM hoher rpm, EESM, Sonstige PM-Magnete, SRM | 3 (kein Marktanteil in 2025) | Technologieentwicklung und Marktdurchdringung |                          |                                                                                                                                | Ab 2017      |

#### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 37:

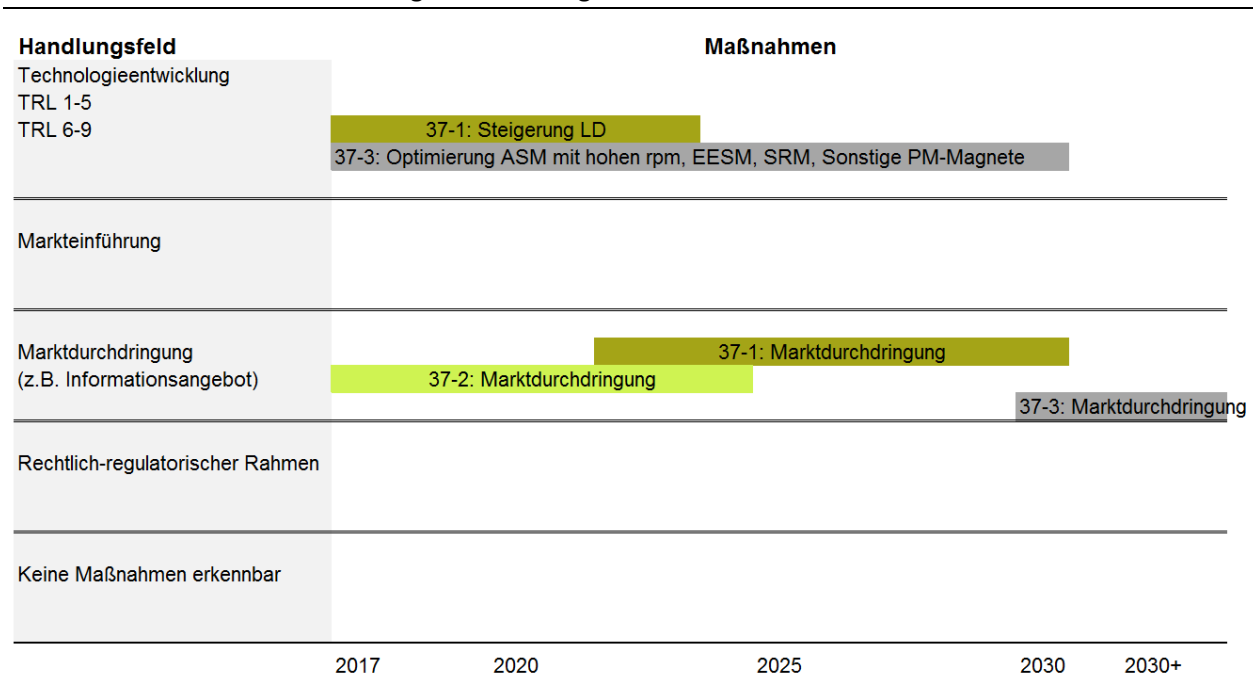
37-1: Die Substitution des Synchronmotors durch einen ASM ist mit Priorität 3 eingestuft, da ein Marktanteil von 5 % angenommen wird. Für eine Substitution müssen zunächst die noch heute bestehenden technischen Nachteile (niedrigere Leistungsdichte) behoben werden, um wettbewerbsfähig zu sein. Derzeit befindet sich der ASM für den Hybridmotor im Pilotstadium, so dass diese Technologieoptimierung direkt angestoßen und bis 2023 erreicht werden sollte. Entscheidende Akteure sind dabei Motorenentwickler und -hersteller selbst, aber auch die Bundesregierung (BMBF), die Forschungsprogramme anstoßen sollte. Weitere Akteure sind Forschungsinstitute. Neben Forschungsprogrammen in Deutschland sind auch F&E-Anstrengungen in der EU z. B. im Rahmen von Forschungsrahmenprogrammen („Horizon“) anzustoßen. Die globale Marktdurchdringung des ASM (Annahme 5 % in 2025; 15 % in 2050) sollte von 2022 bis 2030 durch bewusstseinsbildende und

vertrauensschaffende Maßnahmen mit einem umfassenden Informationsangebot unterstützt werden. Hier besitzen v.a. die Motorenhersteller selbst ein Interesse, ihr Produkt auf dem Markt zu etablieren. Nichtsdestotrotz sollten auch Anstrengungen der Bundesregierung (z. B. BMUB, BMWi), von Netzwerken und Verbänden (z. B. VDMA, VDA, ZVEI, VDI ZRE) und der EU (z. B. JRC, Horizon) in Richtung Informationsangebote zur Substitution des Synchronmotors durch den ASM auf den Weg gebracht werden.

37-2: Der Einsatz von Synchronmotoren mit einem geringeren SEE-Gehalt soll ebenfalls weiter forciert werden (Annahme 50 % in 2025 und 2050). Die Implementierung dieser Substitution besitzt die höchste Prioritätsstufe 1. Dieser Synchronmotor ohne schwere Seltene Erden ist bereits heute auf dem Markt vertreten (z. B. Honda Freed). Eine weitere Marktdurchdringung sollte durch bewusstseinsbildende und vertrauensschaffende Maßnahmen unterstützt werden. Diese Maßnahmen sollten bereits heute beginnen und durch die Wirtschaft selbst, aber auch mit Unterstützung der Bundesregierung (z. B. BMUB, BMWi), von Netzwerken und Verbänden (z. B. VDMA, VDA, ZVEI und VDI ZRE) vollzogen werden. Auch die EU (z. B. JRC, Horizon, EIT Raw Materials) sollte die Erstellung und Verteilung von Informationen unterstützen. Die Marktdurchdringung sollte bis 2025 national wie auch international unterstützt werden.

37-3: Bis 2050 wird davon ausgegangen, dass ein Mix an Motorentypen in Hybridmotoren auf dem Markt vertreten ist. Für die Marktreife sind weitere Anstrengungen in F&E (bis 2030) sowie der Marktdurchdringung (ab 2030) erforderlich.

Abbildung 2-1: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Hybridmotoren mit Unterscheidung der Handlungsfelder



Quelle: Öko-Institut e.V.

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

**Fazit:**

Für die Implementierung von Substitutionsoptionen des Hybridmotors (Permanentmagnet-Synchronmotor mit Seltenen Erden) auf dem Markt bestehen Handlungsbedarfe zum einen in der Technologieoptimierung und zum anderen in der Marktdurchdringung.

Bei der Technologieoptimierung des ASM muss bis 2023 eine Steigerung der Leistungsdichte angestrebt werden, um wettbewerbsfähig zu sein. Für die Technologieentwicklung der anderen Motorentypen (EESM, SRM etc.) sind Anstrengungen in F&E notwendig (37-3).

Alle Substitutionsoptionen (37-1, 37-2, 37-3) müssen in ihrer Marktdurchdringung durch bewusstseinsbildende und vertrauensfördernde Maßnahmen wie Informationsangebote an Unternehmen unterstützt werden. Zum einen haben Motoren- bzw. Magnethersteller ein Eigeninteresse an der Marktdurchdringung und sind entscheidende Akteure als Informationsquelle. Zum anderen können bestehende Netzwerke und Verbände in Deutschland, wie z. B. VDI ZRE, VDMA, ZVEI, aber auch Europaweit (z. B. das EIT Raw Materials) eine Marktoffensive unterstützen. Ebenso können Programme der Bundesregierung (BMUB, BMWi) oder in der EU im Rahmen des JRC oder des „Horizon“-Programms entscheidend sein, um vertrauensbildende Informationen gezielt zu entwickeln und zu streuen.

### **2.1.2 Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38)**

Die Umwelttechnologie der Elektroantriebsmotoren in BEV- und PHEV-Fahrzeugen (UT Nr. 38) kann bereits heute auf erste Substitutionen im Markt zurückgreifen. Für eine passgenaue Betrachtung der Maßnahmen werden die Elektroantriebsmotoren für BEV und PHEV zunächst separat voneinander dargestellt und in der Übersicht der Maßnahmen und dem Fazit wieder zusammengefasst.

#### **2.1.2.1 Elektroantriebsmotor im BEV**

Bis 2025 wird angenommen, dass 10 % der Elektroantriebsmotoren in BEV durch Asynchronmotoren (ASM) – die schon heute im Tesla S auf dem Markt verbreitet sind – ersetzt werden. Weitere 10 % der SEE-Permanentmagnet-Motoren werden im Substitutionsszenario in 2025 vom EESM substituiert, der heute z. B. im Renault ZOE auf dem Markt vertreten ist. Weitere 50 % werden in 2025 durch Motoren mit reduziertem SEE-Gehalt (heute bereits im BMW i3 verbaut) ersetzt.

In 2050 wird ein noch breiterer Mix an Motorentypen auf dem Markt erwartet. Neben dem ASM (15 %), dem EESM (20 %) und dem Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt (35 %) wird ebenso angenommen, dass auch die Motortypen ASM mit hohem rpm (5 %), SRM (5 %) und sonstigen Permanentmagneten (5 %) im Markt vertreten sind.

Die Unsicherheiten nehmen bis 2050 weiter zu. Daher wird sich in der Ausarbeitung auf den Zeithorizont bis 2025 konzentriert. In kursiver Schrift sind Maßnahmen für die Erreichung der Substitutionen 2050 dargestellt.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Elektroantriebsmotoren im BEV aufgelistet.

Tabelle 2-2: Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der BEV-Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38)

| Subst. Nr. | Substitutionsoption                         | Priorität                    | Ziel der Maßnahmen                            | Maßnahmen                    | Akteure<br>(wichtigster Akteur fett gedruckt)                                                         | Zeithorizont |
|------------|---------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 38BEV-1    | ASM                                         | 2                            | Marktdurchdringung                            | Informationsangebot          | Motorenhersteller, VDMA, VDA, ZVEI, VDI-ZRE, Bundesregierung (BMUB, BMWi)<br>EU: JRC, Horizon, EIT    | 2017-2025    |
| 38BEV-2    | EESM                                        | 2                            | Marktdurchdringung                            | Informationsangebot          | Motorenhersteller, VDMA, VDA, ZVEI, VDI-ZRE, Bundesregierung (BMUB, BMWi)<br>EU: JRC, Horizon, EIT    | 2017-2025    |
| 38BEV-3    | Reduzierter SEE-Gehalt                      | 1                            | Marktdurchdringung                            | Informationsangebot          | Motoren-, Magnethersteller, VDMA, VDA, VDI-ZRE, Bundesregierung (BMUB, BMWi)<br>EU: JRC, Horizon, EIT | 2017-2025    |
| 38BEV-4    | ASM mit hohen rpm, SRM, Sonstige PM-Magnete | 3 (kein Marktanteil in 2025) | Technologieentwicklung und Marktdurchdringung | F&E und Informationsangebote |                                                                                                       | Ab 2017      |

## **Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 38 BEV:**

38BEV-1, 38BEV-2, 38BEV-3: Die Technologieoptionen des ASM, des EESM und des Synchronmotors mit reduziertem SEE-Gehalt sind bereits heute in einzelnen BEV-Modellen auf dem Markt vertreten. Für eine globale Marktdurchdringung (Annahme Marktanteil in 2025 ASM und EESM 10 %, red. SEE-Gehalt 50 % / in 2050 ASM 15 %, EESM 20 %, red. SEE-Gehalt 35 %) müssen Informationsangebote und bewusstseinsbildende Maßnahmen zu den Substitutionsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden. Die höchste Priorität (1) liegt dabei in der Substitution durch Motoren mit reduziertem SEE-Gehalt, da ein Marktanteil von 50 % in 2025 angenommen wird. EESM und ASM besitzen mit einem Marktanteil von jeweils 10 % in 2025 eine Einstufung der Priorität von 2. Die Durchführung der Maßnahmen sollte sofort in die Wege geleitet werden und durch die Motoren- bzw. Magnethersteller und zugehörige Verbände selbst, aber auch von der Bundesregierung (BMUB, BMWi) unterstützt werden. Die Sensibilisierung der Fahrzeughersteller bezüglich der Kritikalität der Rohstoffe und möglichen Substitutionen kann dabei durch Programme der Bundesregierung (BMWi, BMUB Elektromobilität), aber auch in Europa durch die Europäische Kommission (EIT Raw Materials, JRC, Horizon-Programm) angetrieben werden.

38BEV-4: Bis 2050 wird davon ausgegangen, dass ein Mix an Motorentypen in vollelektrischen Pkw auf dem Markt vertreten ist. Für die Marktreife sind weitere Anstrengungen in F&E (bis 2030) sowie der Marktdurchdringung (ab 2030) erforderlich.

### **2.1.2.2 Elektroantriebsmotor im PHEV**

Bis 2025 wird angenommen, dass 5 % der Elektroantriebsmotoren in PHEV durch den Asynchronmotor (ASM) – der sich für PHEV derzeit im Pilotstadium befindet und im BEV im Markt vertreten ist – ersetzt werden. Weitere 50 % werden durch Motoren mit reduziertem SEE-Gehalt (ohne schwere Seltene Erden) ersetzt. Diese materialeffizienten SEE-Synchronmotoren werden bereits heute z. B. im Honda eingesetzt.

In 2050 wird von einem Mix verschiedener Motorentypen ausgegangen. Neben dem ASM (15 %) und dem Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt (50 %) wird auch eine Marktdurchdringung vom ASM mit hohen rpm (5 %), dem EES (5 %), dem SRM (5 %) und sonstigen PM-Motoren (5 %) angenommen.

Die Unsicherheiten nehmen bis 2050 weiter zu. Daher wird sich in der Ausarbeitung auf den Zeithorizont bis 2025 konzentriert. In kursiver Schrift sind Maßnahmen für die Erreichung der Substitutionen 2050 dargestellt.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Elektroantriebsmotoren im PHEV aufgelistet.

Tabelle 2-3: Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der PHEV-Elektroantriebsmotoren (UT Nr. 38)

| Subst. Nr. | Substitutionsoption                           | Priorität                    | Ziel der Maßnahmen                            | Maßnahmen                                       | Akteure<br>(wichtigster Akteur fett gedruckt)                                                                        | Zeithorizont |
|------------|-----------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 38PHEV-1   | ASM                                           | 3                            | Steigerung der Leistungsdichte                | Technologieentwicklung hinsichtlich Optimierung | Motorenhersteller, Motorenentwickler, BMBF, Forschungsinstitute<br>EU: Horizon                                       | 2017-2023    |
|            |                                               |                              | Marktdurchdringung                            | Informationsangebot                             | Motorenhersteller, VDMA, Bundesregierung, (BMUB, BMWi), VDA, ZVEI, VDI ZRE<br>EU: JRC, Horizon, EIT                  | 2022-2030    |
| 38PHEV-2   | Reduzierter SEE-Gehalt                        | 1                            | Marktdurchdringung                            | Informationsangebot                             | Motorenhersteller, Magnethersteller, Bundesregierung (BMUB, BMWi), VDMA, VDA, ZVEI, VDI ZRE<br>EU: JRC, Horizon, EIT | 2017-2025    |
| 38PHEV-3   | ASM hoher rpm, EESM, Sonstige PM-Magnete, SRM | 3 (kein Marktanteil in 2025) | Technologieentwicklung und Marktdurchdringung |                                                 |                                                                                                                      | Ab 2017      |

#### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 38 PHEV:

38PHEV-1: Die Substitution des Synchronmotors durch einen ASM ist mit der Priorität 3 eingestuft, da ein Marktanteil von 5 % angenommen wird. Für eine Substitution des NdFeB-Permanentmagneten durch einen ASM, der sich derzeit noch im Pilotstadium befindet, muss zunächst die Leistungsdichte des ASM weiter erhöht werden. Diese Technologieentwicklung sollte direkt angestoßen werden und

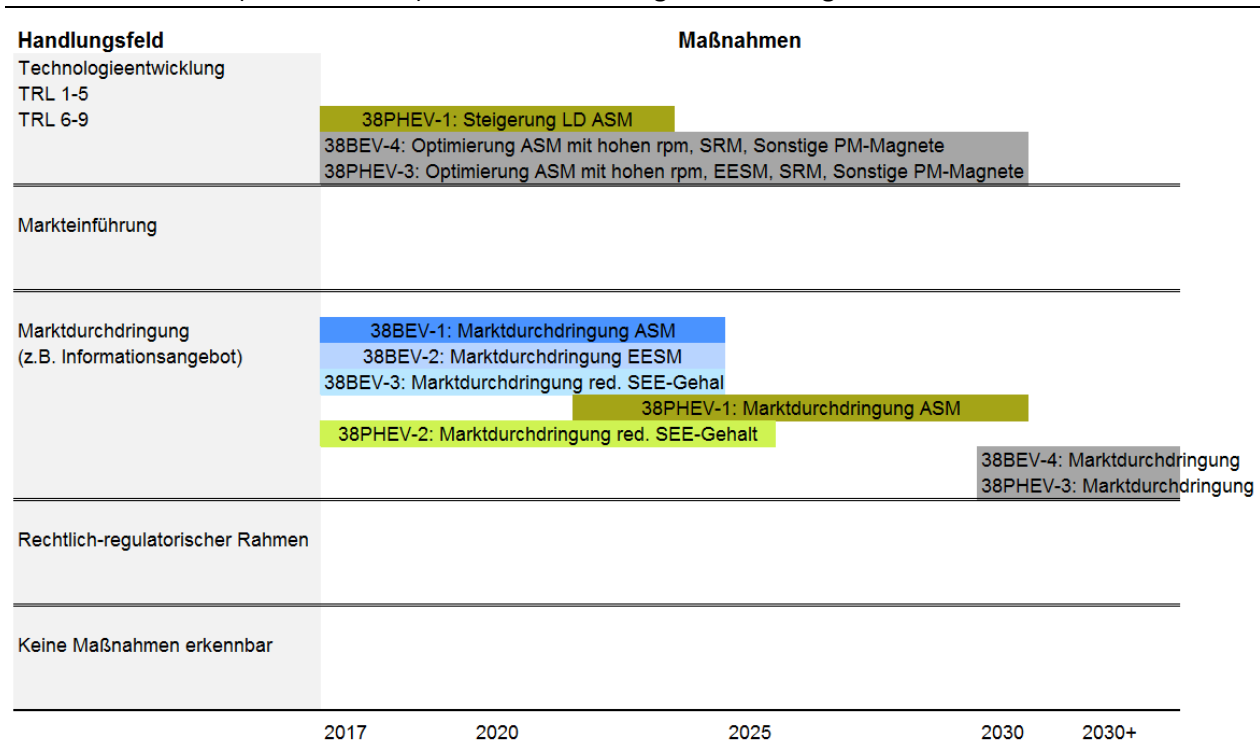
bis 2023 erreicht sein. Entscheidende Akteure sind dabei Motorenentwickler und -hersteller selbst, aber auch die Bundesregierung (BMBF), die Forschungsprogramme anstoßen sollte. Weitere Akteure sind Forschungsinstitute. Neben Forschungsprogrammen in Deutschland sind auch F&E-Anstrengungen in der EU z. B. im Rahmen von Forschungsrahmenprogrammen („Horizon“) anzustoßen. Die globale Marktdurchdringung des ASM (Annahme 5 % in 2025; 15 % in 2050) sollte von 2022 bis 2030 durch bewusstseinsbildende und vertrauensschaffende Maßnahmen mit einem umfassenden Informationsangebot unterstützt werden. Hier besitzen v.a. die Motorenhersteller selbst ein Interesse daran ihr Produkt auf dem Markt zu etablieren. Nichtsdestotrotz sollten auch Anstrengungen der Bundesregierung (z. B. BMUB, BMWi), von Netzwerken und Verbänden (z. B. VDMA, VDA, ZVEI, VDI ZRE) und der EU (z. B. JRC, Horizon) in Richtung Informationsangebote zur Substitution des Synchronmotors durch ASM auf den Weg gebracht werden.

38PHEV-2: Der Einsatz von Synchronmotoren mit einem geringeren SEE-Gehalt sollte ebenfalls weiter forciert werden (Annahme 50 % in 2025 und 23 % in 2050). Die Implementierung dieser Substitution ist sehr hoch eingestuft (Priorität 1). Dieser Synchronmotor mit geringerem SEE-Gehalt ist bereit heute auf dem Markt vertreten (z. B. im Honda). Eine weitere Marktdurchdringung sollte durch bewusstseinsbildende und vertrauensschaffende Maßnahmen unterstützt werden. Diese Maßnahmen sollten bereits heute beginnen und durch die Wirtschaft selbst, durch Verbände und Netzwerke (z. B. VDMA, VDA, ZVEI, VDI ZRE) aber auch mit Unterstützung der Bundesregierung (z. B. BMUB, BMWi) vollzogen werden. Auch die EU (z. B. JRC, Horizon, EIT Raw Materials) sollte die Erstellung und Verteilung von Informationen unterstützen.

38PHEV-3: Bis 2050 wird davon ausgegangen, dass ein Mix an Motorentypen in Plug-in-Hybriden auf dem Markt vertreten ist. Für die Marktreife sind weitere Anstrengungen in F&E (bis 2030) sowie der Marktdurchdringung (ab 2030) erforderlich.

In folgender Abbildung sind die Maßnahmen hin zum Erreichen der Substitutionsoptionen für BEV und PHEV gemeinsam dargestellt.

Abbildung 2-2: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Elektroantriebsmotoren (BEV und PHEV) mit Unterscheidung der Handlungsfelder



Quelle: Öko-Institut e.V.

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

### Fazit BEV und PHEV:

Für die Implementierung von Substitutionsoptionen des Elektroantriebsmotors in vollelektrischen Fahrzeugen (BEV) bis 2025 bestehen Handlungsbedarfe in der Marktdurchdringung. Die Substitute ASM, EESM und reduzierter SEE-Gehalt sind bereits heute im Markt vertreten. Hier bedarf es einer umfassenden Informationsoffensive, die Vertrauen schafft und das Bewusstsein sensibilisiert.

Für den PHEV sind die Substitutionsmöglichkeiten differenziert zu betrachten. Der ASM ist noch nicht im Markt vertreten. Hier bedarf es noch weiterer F&E-Anstrengungen bis 2023, um wettbewerbsfähig zu sein. Anschließend ist eine Marktdurchdringung zu unterstützen. Der Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt ist bereits heute im Markt vertreten. Daher ist eine sofortige Informationsoffensive die entscheidende Maßnahme. Diese Maßnahme sollte bis 2025 forciert werden.

Die grau markierten Maßnahmen beziehen sich auf Maßnahmen, die erst nach 2025 wirken. Da Entwicklungen in diesem Zeithorizont unsicher sind, wird hier nicht näher auf die Substitutionsmöglichkeiten und ihre Maßnahmen eingegangen.

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

Die Umwelttechnologie der Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie (UT Nr. 60) kann bereits heute auf Substitutionsoptionen zurückgreifen. Bis 2025 wird daher angenommen, dass 5 % der Motoren durch Niedrigspannungsmotoren – die bereits heute für bestimmte Anwendungen auf

dem Markt vertreten sind – ersetzt werden. Weiterhin werden im Substitutionsszenario 60 % der Motoren mit Motoren mit reduziertem SEE-Gehalt substituiert.

Bis 2050 wird angenommen, dass der Niederspannungsmotor 15 % und der Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt 83 % Marktanteil einnimmt.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie aufgelistet.

Tabelle 2-4: Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie (UT Nr. 60)

| Subst. Nr. | Substitutions-option    | Priorität | Ziel der Maßnahmen | Maßnahmen           | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt)                                                    | Zeithorizont |
|------------|-------------------------|-----------|--------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 60-1       | Niedrigspannungsmotoren | 3         | Marktdurchdringung | Informationsangebot | Motorenhersteller, VDMA, ZVEI, Bundesregierung (BMUB, BMWi)<br>EU: JRC, Horizon, EIT          | 2017-2030    |
| 60-2       | Reduzierter SEE-Gehalt  | 1         | Marktdurchdringung | Informationsangebot | Motoren-, Magnethersteller, VDMA, ZVEI, Bundesregierung (BMUB, BMWi)<br>EU: JRC, Horizon, EIT | 2017-2025    |

#### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 60:

60-1: Schon heute kann der NdFeB-Permanentmagnet-Motor in den industriellen Anwendungen teilweise substituiert werden. Zum einen ist der Niederspannungsmotor auf dem Markt vertreten, der allerdings aufgrund des großen Bauvolumens nicht für alle Anwendungsbereiche alternativ eingesetzt werden kann. Diese Substitutionsalternative ist mit Priorität 3 eingestuft, da eine Substitution von 5 % bis 2025 angenommen wird. Hier bedarf es einer weiteren Marktdurchdringung mit Hilfe von umfassenden Informationsangeboten, die das Bewusstsein sensibilisieren und Vertrauen schaffen. Mit dieser Informationsoffensive sollte direkt begonnen werden. Der Marktanteil soll bis 2050 steigen (auf 15 %), so dass bis 2030 aktiv Informationen veröffentlicht werden sollten. Motoren- und Magnethersteller sowie ihre Verbände besitzen hier Eigeninteressen, ihre Produkte auf dem Markt zu etablieren. Nichtsdestotrotz liegt es im Interesse der Bundesregierung und der EU, die Abhängigkeiten von kritisch eingestuften Rohstoffen (wie z. B. Seltenen Erden) zu minimieren. Daher sollten ebenso

Anstrengungen der Bundesregierung (z. B. BMUB, BMWi) und der EU (z. B. JRC, Horizon, EIT Raw Materials) unternommen werden, umfassende Informationsangebote zu bieten.

60-2: Der NdFeB-Permanentmagnet mit reduziertem SEE-Gehalt ist ebenso bereits heute auf dem Markt vertreten. Eine starke Implementierung in den Markt wird bis 2025 (60 %) und 2050 (83 %) angenommen. Daher besitzt diese Substitution die höchste Priorität (1). Eine weitere Marktdurchdringung sollte durch bewusstseinsbildende und vertrauensschaffende Maßnahmen in Form von Informationsangeboten unterstützt werden. Diese Maßnahmen sollten bereits heute beginnen und durch die Wirtschaft selbst und mit Unterstützung der Bundesregierung und der EU bis 2025 durchgeführt werden.

Abbildung 2-3: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie mit Unterscheidung der Handlungsfelder

| Handlungsfeld                                    | Maßnahmen                                                                                                    |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Technologieentwicklung<br>TRL 1-5<br>TRL 6-9     |                                                                                                              |
| Markteinführung                                  |                                                                                                              |
| Marktdurchdringung<br>(z.B. Informationsangebot) | <div>60-1: Marktdurchdringung Niederspannungsmotor</div> <div>60-2: Marktdurchdringung red. SEE-Gehalt</div> |
| Rechtlich-regulatorischer Rahmen                 |                                                                                                              |
| Keine Maßnahmen erkennbar                        |                                                                                                              |
|                                                  | 2017      2020      2025      2030      2030+                                                                |

Quelle: Öko-Institut e.V.

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

### Fazit:

Substitutionsmöglichkeiten für den Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie sind mit dem Niederspannungsmotor und dem Synchronmotor mit reduziertem SEE-Gehalt bereits heute auf dem Markt vorhanden. Für die vorhandenen Substitute ist eine umfassende Informationsoffensive für Unternehmen von besonderer Bedeutung, um die angenommenen Potentiale zu erschließen. Hierbei sind bewusstseinsbildende und vertrauensfördernde Informationen notwendig.

Zum einen haben Motoren- bzw. Magnethersteller ein Eigeninteresse in der Marktdurchdringung und sind entscheidende Akteure als Informationsquelle. Zum anderen können bestehende Netzwerke und Verbände in Deutschland, wie z. B. das VDI ZRE, VDMA, ZVEI, aber auch europaweit z. B. das EIT Raw Materials eine Marktoffensive unterstützen. Ebenso können die Bundesregierung (BMUB, BMWi) oder die EU (JRC, EIT Raw Materials, „Horizon“) entscheidend sein, um vertrauensbildende Informationen gezielt zu entwickeln und zu streuen.

## 2.2 Solarenergie

### 2.2.1 Dünnschicht-PV (UT Nr. 87)

Im vorliegenden Projekt wurden Dünnschicht-Zellen aus amorphem Silizium, Cadmiumtellurid und Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) als Ausgangstechnologie betrachtet. Neben der partiellen Substitution von Indium durch Gallium und dem Einsatz Indium-freier TCOs (die in den zukünftigen Materialbedarfen bereits berücksichtigt wurden) erscheinen Solarzellen mit Halbleitern aus Kupfer-Zink-Zinnsulfid (CZTS) langfristig potentiell geeignet, um zukünftig die benötigten kritischen Ressourcen zu reduzieren (Substitutionspotential 2025: 5 %; 2050: 20 %). Es sollte beachtet werden, dass auch eine stärkere Marktdurchdringung der anderen in diesem Projekt betrachteten PV-Technologien praktisch substituierend wirken könnten.

Tabelle 2-5: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Dünnschicht-PV (UT Nr. 87)

| Subst.-Nr. | Substitutions-option | Priorität | Ziel der Maßnahmen         | Maßnahmen                        | Akteure<br>(wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeit-horizont |
|------------|----------------------|-----------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|---------------|
| 87-1       | CZTS-Zellen          | 3         | Erhöhung der Wirkungsgrade | Anwendungs-orientierte Forschung | <b>FhG</b><br>Helmholtz<br>BMBF               | Ab 2017       |
|            |                      |           | Markteinführung            | Demonstrations-anlagen           | <b>BMBF</b> , KfW,<br>Anlagenbauer            | Ab 2022       |

#### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 87:

87-1: CZTS-Zellen sind zurzeit nicht wettbewerbsfähig. Die erreichten Wirkungsgrade liegen nur bei 12,6 %. Weitere Forschungsanstrengungen sind nötig, um den Wirkungsgrad zu verbessern. Zudem müssen die erreichten Laborwirkungsgrade in kommerziellen Anlagen umgesetzt werden. Einen Forschungsrahmen bieten große Forschungseinrichtungen, wie u. a. das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB). Die Forschungsergebnisse müssten weiterhin in Entwicklungsprojekte umgesetzt werden. Hier können Förderungen für die Errichtung von Demonstrationsanlagen die Erschließung von Substitutionspotentialen unterstützen. Eine Markteinführung ist ab 2022 vorstellbar. Voraussetzung wären Investitionsanreize von staatlicher Ebene (z. B. KfW) um einen Marktanteil von ungefähr 5 % im Jahr 2025 zu erreichen.

Abbildung 2-4: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Dünnschicht-PV mit Unterscheidung der Handlungsfelder

| Handlungsfeld                                    | Maßnahmen                                                                                                     |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Technologieentwicklung<br>TRL 1-5<br>TRL 6-9     | 87-1: Anwendungsorientierte Forschung                                                                         |
| Markteinführung                                  | 87-2: Demonstrationsanlagen                                                                                   |
| Marktdurchdringung<br>(z.B. Informationsangebot) |                                                                                                               |
| Rechtlich-regulatorischer Rahmen                 |                                                                                                               |
| Keine Maßnahmen erkennbar                        |                                                                                                               |
|                                                  | 2017                      2020                      2025                      2030                      2030+ |

Quelle: IZT

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

### Fazit:

Die Dünnschicht-PV steht in einigen Anwendungsfeldern mit anderen Photovoltaik-Technologien in Konkurrenz. Auch innerhalb der Dünnschicht-PV konkurrieren verschiedene Technologielinien miteinander, die unterschiedliche Materialbedarfe haben. Als Substitutionsmöglichkeit sind Solarzellen auf CZTS-Basis zu sehen. Diese weisen bis dato niedrige Wirkungsgrade auf; hier besteht noch Forschungsbedarf und Bedarf für eine Unterstützung in der Markteinführung.

### 2.2.2 Tandemzellen (UT Nr. 90)

Tandemzellen in terrestrischen Anwendungen werden auch in Zukunft wohl ausschließlich in Anlagen der konzentrierenden PV eingesetzt, um die hohen Wirkungsgrade der teuren Zellen voll auszunutzen. In der sogenannten TCO-Schicht (transparent leitfähige Oxide – transparent conducting oxide) wird heutzutage meist Indium verwendet. Für Indium-freie TCOs wird bis 2025 ein Substitutionspotential von 45 % und 2050 von 90 % angenommen. Das Silber der zur Konzentration der Sonnenstrahlung eingesetzten Spiegel kann durch Aluminium ersetzt werden (Substitutionspotential 2025: 5 %; 2050: 10 %).

Tabelle 2-6: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Tandemzellen (UT Nr. 90)

| Subst.-Nr. | Substitutions-option              | Priorität | Ziel der Maßnahmen                   | Maßnahmen                        | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeit-horizont |
|------------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| 90-1       | Substitution von Indium aus ITOs  | 1         | Verbesserte großtechnische Umsetzung | Förderung der Prozessentwicklung | FhG, AiF                                   | 2017-2020     |
| 90-2       | Silber in Spiegel durch Aluminium | 3         | -                                    | -                                | -                                          | -             |

**Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 90:**

90-1: Der Einsatz indiumfreier TCOs wird vorangetrieben und ist in einigen PV-Linien auch heute schon Stand der Technik. Daher wird erwartet, dass er sich auch in Anlagen der konzentrierenden Photovoltaik zukünftig durchsetzt, ohne dass dedizierte Maßnahmen ergriffen werden müssten. Zusätzliche Fördermaßnahmen könnten helfen, die Probleme bei der großtechnischen Fertigung zu verringern und die Marktdiffusion beschleunigen. So benötigt beispielsweise die direkte Gasphasenabscheidung (CVD) von FTO eine Abscheidetemperatur > 350 °C; auch die direkte Applikation auf Polymerfolien ist noch nicht Stand der Technik. Eine Förderung der Prozessentwicklung könnte die Entwicklung von Prozessen, das Sammeln von Erfahrung und den Aufbau einer großtechnischen (und damit günstigeren) Fertigung unterstützen. Einen Förderrahmen bieten u. a. die Fraunhofer-Gesellschaft sowie die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF).

90-2: Der Einsatz von Aluminium als Spiegelmaterial ist technisch machbar, geht jedoch mit Wirkungsgradverlusten von rund 5 % einher. Die Entscheidung für das eine oder andere Material wird wirtschaftlich bestimmt und ist marktgetrieben. Ein besonderer Handlungsbedarf besteht deshalb nicht.

Abbildung 2-5: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Tandemzellen mit Unterscheidung der Handlungsfelder

| Handlungsfeld                                    | Maßnahmen                       |
|--------------------------------------------------|---------------------------------|
| Technologieentwicklung<br>TRL 1-5<br>TRL 6-9     | 90-1: Förderung<br>Prozessentw. |
| Markteinführung                                  |                                 |
| Marktdurchdringung<br>(z.B. Informationsangebot) |                                 |
| Rechtlich-regulatorischer Rahmen                 |                                 |
| Keine Maßnahmen erkennbar                        | 90-2: Rein marktgetrieben       |

2017                      2020                                      2025                                                              2030                                      2030+

Quelle: IZT

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

### Fazit:

Die diskutierten Substitutionsmöglichkeiten sind technisch realisierbar, reduzieren jedoch nur die Abhängigkeit von einigen der eingesetzten kritischen Ressourcen. Die Substitution von Silber in den Spiegeln ist mit Wirkungsgradverlusten möglich und im Wesentlichen eine wirtschaftliche Entscheidung. Der Einsatz von Indium-freien TCOs ist in den nächsten Jahren zu erwarten, zusätzliche Förderung der Prozessentwicklung könnte ihren Einsatz beschleunigen.

### 2.2.3 Concentrating Solar Power (CSP) (UT Nr. 93)

In CSP-Anlagen wird Sonnenlicht konzentriert und erzeugt über einen Dampfkreislauf Energie. Wie auch in CPV-Anlagen (Tandemzellen in konzentrierender Photovoltaik) wird für den Einsatz von Aluminiumspiegeln ein Substitutionspotential von 5 % im Jahr 2025 und 10 % im Jahr 2050 angenommen.

Tabelle 2-7: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der CSP (UT Nr. 93)

| Subst.-Nr. | Substitutions-option              | Priorität | Ziel der Maßnahmen | Maßnahmen | Akteure<br>(wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeit-horizont |
|------------|-----------------------------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------------------------------------|---------------|
| 93-1       | Silber in Spiegel durch Aluminium | 3         | -                  | -         | -                                             | -             |

**Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 93:**

93-1: Der Einsatz von Aluminium als Spiegelmaterial ist technisch machbar, geht jedoch mit Wirkungsgradverlusten von rund 5 % einher. Eine bedeutende Verringerung dieser Verluste in Zukunft ist unwahrscheinlich. Da die Entscheidung für das eine oder andere Material wirtschaftlich bestimmt ist, wird kein besonderer Handlungsbedarf gesehen.

Abbildung 2-6: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der CSP mit Unterscheidung der Handlungsfelder

| Handlungsfeld                                    | Maßnahmen                                     |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Technologieentwicklung<br>TRL 1-5<br>TRL 6-9     |                                               |
| Markteinführung                                  |                                               |
| Marktdurchdringung<br>(z.B. Informationsangebot) |                                               |
| Rechtlich-regulatorischer Rahmen                 |                                               |
| Keine Maßnahmen erkennbar                        | 93-1: Rein marktgetrieben                     |
|                                                  | 2017      2020      2025      2030      2030+ |

Quelle: IZT

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

**Fazit:**

Die Substitution von Silber durch Aluminium in den Spiegeln von CSP-Anlagen geht mit Wirkungsgradverlusten einher, die physikalisch bedingt sind und sich nicht vermeiden lassen. Ein Handlungsbedarf wird nicht gesehen.

**2.3 Beleuchtung****2.3.1 Weiße LED (UT Nr. 27)**

Es wird angenommen, dass in 2025 für den Massenmarkt folgende zwei Substitutionsoptionen bestehen:

- ▶ weiße LED Leuchtmittel mit cadmiumfreien Quantum-Dots als Phosphorschicht
- ▶ glasbasierte wOLED Lichtquellen

Bei diesen Substitutionsoptionen geht es in erster Linie um die Verringerung der momentan für die Lumineszenzkonversion genutzten Seltenerdoxide in der Phosphorschicht weißer LEDs.

Es ist davon auszugehen, dass bis 2025 vor allem technologische Substitutionen umsetzbar sein werden. Demzufolge werden rund 50 % der am Markt befindlichen wLED Leuchtmittel mit einer Phosphorschicht aus cadmiumfreien Quantum-Dots als ausgestattet sein. Weitere 10 % der Beleuchtungskörper werden glasbasierte wOLEDs anstelle von wLEDs enthalten.

Im langfristigen Zeithorizont 2050 wird angenommen, dass es zu einer weitgehenden Verdrängung der heutigen wLED-Technologie gekommen sein wird. Bis dahin wird die Verwendung der als Übergangstechnologie betrachteten cadmiumfreien Quantum-Dots wieder zurückgehen (auf 30 %). Stattdessen werden die weißen OLEDs als dominierende Beleuchtungstechnologie betrachtet (60 %). wLEDs mit einer Phosphorschicht aus Seltenerdoxiden werden auf Spezialanwendungen beschränkt sein und einen verbleibenden Marktanteil von nicht mehr als 10 % aufweisen.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der wLED Leuchtmittel aufgelistet.

Tabelle 2-8: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der weißen LED (UT Nr. 27)

| Subst. Nr. | Substitutions-option | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                    | Maßnahmen                              | Akteure<br>(wichtigster Akteur fett gedruckt)                        | Zeithorizont |
|------------|----------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------|
| 27-1       | QD ersetzt SEE       | 1         | Verbesserung der Quanteneffizienz                                     | F&E                                    | <b>Universitäten</b><br><b>Fraunhofer-Gesellschaft (FhG)</b><br>BMBF | Bis 2020     |
|            |                      |           | Ökologische und gesundheitliche Risikobewertung der Cd freien QD      | Rechtlich-regulatorisch                | <b>Universitäten / Forschungsinstitute</b><br>BMUB                   | Bis 2020     |
|            |                      |           | Verringerung der Herstellungspreise von Cd freien QD                  | Upscaling der industriellen Produktion | <b>Industrie</b><br>EU-FP9<br>BMW i                                  | Bis 2025     |
| 27-2       | wOLED ersetzt eLED   | 2         | Verlängerung der Lebensdauer von OLED Elementen                       | F&E                                    | <b>Universitäten / Industrie / FhG</b>                               | Bis 2020     |
|            |                      |           | Verbesserung der flächigen Leuchthomogenität                          | F&E                                    | <b>Universitäten / Industrie</b>                                     | 2020         |
|            |                      |           | Reduktion der Nutzung von ITO für transparente Elektroden             | F&E                                    | <b>Universitäten / Industrie / FhG</b><br>EU-FP9, BMBF               | Bis 2025     |
|            |                      |           | Substitution von Iridium / Platinmetalle in der aktiven Leuchtschicht | F&E                                    | <b>Universitäten</b><br>EU-FP9                                       | Bis 2030     |
|            |                      |           | Verringerung der Herstellungspreise                                   | Upscaling der industriellen            | <b>Industrie</b>                                                     | Ab 2020      |

| Subst. Nr. | Substitutions-option | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                                                   | Maßnahmen                                           | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt)           | Zeithorizont |
|------------|----------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|
|            |                      |           | von OLED Elementen                                                                                   | Produktion                                          |                                                      |              |
|            |                      |           | Verbesserung der Quanteneffizienz und internen Reflexionen, Auskopplungsverluste, Interferenzen etc. | F&E                                                 | <b>Universitäten</b><br><b>FhG</b><br>EU-FP9<br>BMBF | Bis 2025     |
|            |                      |           | Verbesserung Anwendbarkeit im Alltag                                                                 | Design neuer flächiger Beleuchtungskonzepte         | <b>Designer / Industrie</b>                          | 2020 - 2030  |
|            |                      |           | Verbesserung Anwendbarkeit im Alltag                                                                 | Normung der Kompatibilität von wOLED Leuchtmitteln  | <b>Industrie</b><br>DIN / CEN                        | 2030         |
|            |                      |           | Verbesserung Anwendbarkeit im Alltag                                                                 | Normung angepasster Mess- und Qualitätsvorschriften | <b>Industrie</b><br>DIN / CEN                        | 2030         |

#### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 27:

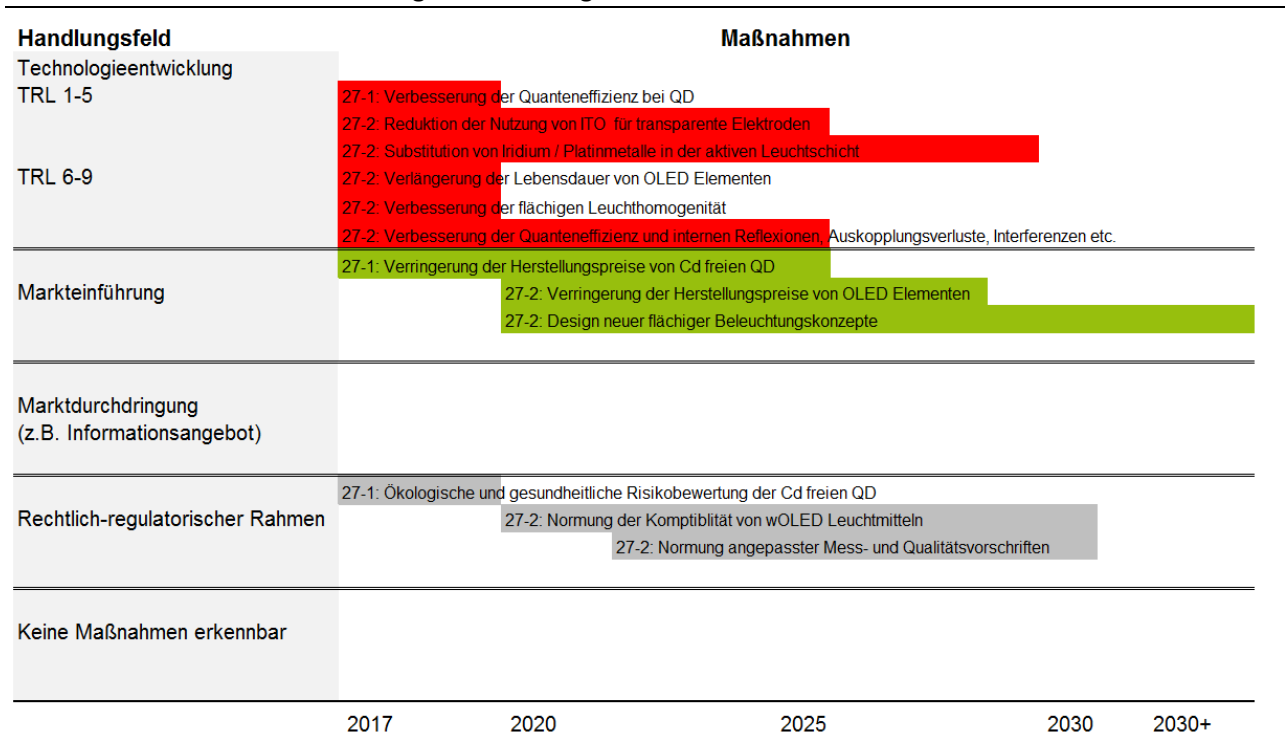
Die Substitution von Seltenerdoxiden für die Lumineszenzkonversion von blauem Licht zu einem weißen Mischspektrum erfordert mittelfristig eine Hochskalierung der Produktionskapazität für Cd-freie Quantum Dots. Da diese Technologie sich bereits auf einem relativ hohen Technologiereifegrad (ca. TRL 9) befindet, ist diese Maßnahme vor allem durch industriepolitische Instrumente möglich. Diese Substitutionsoption ist ohne tiefgreifende Eingriffe in die etablierten Wertschöpfungsketten und Produktionssysteme für wLED Leuchtmittel umsetzbar (Voraussetzung für eine Umsetzung ist, dass die Patente zur Verfügung stehen). Die Innovation sollte allerdings durch begleitende Erforschung der Umweltaspekte und gesundheitlicher Auswirkungen von Cd-freien Quantum Dots flankiert werden, insbesondere in Hinblick auf die Herstellungsphase der Quantum Dots und die sichere Entsorgung/das Recycling der Leuchtmittel.

Die langfristige Umstellung der Beleuchtungstechnik auf weiße OLED wird gegenüber den Cd-freien Quantum Dots relativ tiefgreifende Auswirkungen auf die Wertschöpfungsketten haben. Außerdem wird die Nutzung von flächigen (anstelle punktförmiger) Lichtquellen zu Problemen mit der Kompatibilität zu Beleuchtungskonzepten im Gebäudebestand führen. Hierzu bedarf es der Entwicklung völlig neuer Beleuchtungskonzepte für den Indoor- als auch Outdoor-Einsatz. Kurz- bis mittelfristig geht es jedoch zunächst um die Verbesserung der physikalischen und technischen Eigenschaften der wOLEDs. Diese haben eine für den Praxiseinsatz noch zu geringe Lebensdauer und stehen auch in puncto Energieeffizienz noch hinter den wLEDs zurück.

Weitere Forschung und Entwicklung ist erforderlich, um anwendungsreife und kostengünstige wOLED für die Anwendung in Produkten für den Konsumentenmarkt zu etablieren. Um die avisierten 10 % Marktdurchdringung zu erreichen, sind industrielle Upscalingmaßnahmen unabdingbar. Für glasbasierte wOLEDs wird ein solches Upscaling als schwierig angesehen, weil ein großes Marktvolumen an hochpräzisen Flachgläsern erforderlich ist (dies steht in Konkurrenz zur Fertigung von Flachdisplays). Vielversprechender ist die Herstellung von wOLEDs auf Basis flexibler

Polymersubstrate, weil sich diese perspektivisch in einer Rolle-zu-Rolle-Technologie fertigen lassen. Bis dahin sind allerdings noch einige technische Herausforderungen, v.a. bezüglich Alterungsbeständigkeit der wOLEDs, zu lösen.

Abbildung 2-7: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der weißen LED mit Unterscheidung der Handlungsfelder



Quelle: Öko-Institut e.V.

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

### Fazit:

Für die Realisierung von Substitutionsoptionen in der Umwelttechnologie wLED steht eine Reihe von technologischen Möglichkeiten zur Verfügung. Der Markteinführung am nächsten stehen die Cadmium-freien Quantum Dots weil sich diese Technologie relativ unproblematisch in die bestehenden technischen Designkonzepte der wLED basierten Beleuchtungstechnologie integrieren lässt. Ein Handlungsbedarf zur Technologieoptimierung besteht vor allem noch hinsichtlich der Verbesserung der Quanteneffizienz von Quantum Dots.

In Hinblick auf die zweitgenannte Substitutionsoption weiße OLEDs besteht ein umfangreicher Innovationsbedarf. Obwohl glasbasierte wOLEDs bereits in geringem Umfang auf dem Markt verfügbar sind, wird diese Technologie nur dann ein relevantes Potential zur Marktdurchdringung entfalten können, wenn die Preise pro Lumen auf ein mit wLED vergleichbares Niveau sinken. Einige grundlegende technische Probleme sind bisher trotz intensiver F&E-Anstrengungen noch nicht hinreichend gelöst worden. Zudem ist eine weitgehende Umstellung der Beleuchtungstechnologie auf flächige Lichtquellen eine eher langfristig zu planende Angelegenheit.

## 2.4 Weitere Technologien

### 2.4.1 RFID für Wertstofftrennung (UT Nr. 05)

Bis 2025 wird folgende Substitutionsoption für den industriellen Einsatz der RFID<sup>6</sup>-Technologie auf Verpackungsmaterialien für die Verbesserung der Wertstofftrennung angenommen:

- Aluminium-basierte RFID-Antennen

Durch den Einsatz dieser Substitutionsoption lässt sich die Verwendung von Silber und Kupfer für die Herstellung von RFID-Tags (Smart Labels) reduzieren (materielle Substitution). Bis 2025 könnten etwa 96 % der theoretisch für ein RFID-unterstütztes Wertstofftrennungssystem einzusetzenden Tags auf Basis von Aluminium hergestellt werden anstatt auf Basis von Silber oder Kupfer. Bis 2050 werden 100 % erwartet.

In der folgenden Tabelle ist die notwendige Maßnahme zur Erreichung der Substitutionsoption aufgelistet.

Tabelle 2-9: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der RFID (UT Nr. 05)

| Subst. Nr. | Substitutions-option             | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                                                      | Maßnahmen | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeithorizont |
|------------|----------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|--------------|
| 05-1       | Aluminium-basierte RFID-Antennen | 1         | Entwicklung kostengünstiger Druckverfahren für Herstellung robuster Al-Tags auf Verpackungskunststoffen | F&E       | FhG / Industrie<br>BMBF                    | Bis 2020     |

#### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 05:

Die Substitution von Silber und Kupfer in RFID-Tags ist aus technischen und anwendungspraktischen Gründen schwierig. Die Substitution von Silber und Kupfer in RFID-Tags muss noch weiter optimiert werden, um eine Marktdurchdringung der Technologie im Anwendungsbereich

Verpackungskennzeichnung zu erreichen. Für die Erreichung anwendungssicherer Produkte sind weitere Entwicklungen unter Einbezug der RFID-Hersteller (bzw. Hersteller der RFID-Herstellungsausrüstung), Einzelhandel, Recyclingwirtschaft und Verbraucher notwendig. In Zuge eines solchen Multi-Stakeholder-Innovationsprozesses sollte auch die Frage nach der aus wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Sichtweise vorteilhaftesten Strategie zu Wertstoffen (Substitution oder Vermeidung) diskutiert und entschieden werden.

<sup>6</sup> Radio Frequency Identification

Abbildung 2-8: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der RFID mit Unterscheidung der Handlungsfelder

| Handlungsfeld                                | Maßnahmen                             |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| Technologieentwicklung<br>TRL 1-5<br>TRL 6-9 | 05-1 Aluminium-basierte RFID-Antennen |
| Markteinführung                              |                                       |
| Marktdurchdringung                           |                                       |
| Rechtlich-regulatorischer Rahmen             |                                       |
| Keine Maßnahmen erkennbar                    |                                       |
|                                              | 2017 2020 2025 2030 2030+             |

Quelle: Öko-Institut e.V.

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

### Fazit:

Für diese Umwelttechnologie sind Substitutionsmöglichkeiten vorhanden, allerdings sind noch weitere prozesstechnische und logistische Entwicklungen vonnöten um auf dem Markt wettbewerbsfähig und anwendungssicher zu sein. 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.

### 2.4.2 Membranelektrolyse (UT Nr. 13)

Bis 2025 wird folgende Substitutionsoption für den industriellen Einsatz der Membranelektrolyse im Prozess der Chlorerzeugung angenommen:

- Deacon-Verfahren

Durch den Einsatz dieser Substitutionsoption lässt sich die Verwendung von Silber für Sauerstoffverzehrkathoden reduzieren (technologische Substitution). Eine funktionale und stoffliche Substitution ist hingegen nicht möglich. Da Silber bei diesem Verfahren als Katalysator wirkt und nicht verbraucht wird, wird eine Substitution nicht als prioritär betrachtet.

Es ist davon auszugehen, dass bis 2025 technologische Substitutionen in begrenztem Umfang umsetzbar sein werden. Etwa 5 % lassen sich durch Anwendung des Deacon-Verfahrens substituieren, in 2050 wird das Potential unverändert gesehen.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Membranelektrolyse aufgelistet.

Tabelle 2-10: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Membranelektrolyse (UT Nr. 13)

| Subst. Nr. | Substitutionsoption | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                              | Maßnahmen                 | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeithorizont |
|------------|---------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|--------------|
| 13-1       | Deacon-Verfahren    | 3         | Entwicklung edelmetallfreier Alternativen für Katalysatoren für die Elektrolyse | F&E                       | FhG / Industrie H2020 BMBF                 | Bis 2020     |
|            |                     |           | Erhöhung der industriellen Anwendungsreife                                      | technologisches Upscaling | Industrie BMBF                             | Ab 2020      |

**Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 27:**

Die Substitution von Sauerstoffverzehrkathoden in der für die Chlor-Alkalielektrolyse eingesetzten Technologie der Membranelektrolyse kann lediglich in beschränktem Umfang erfolgen. Da das Deacon-Verfahren als Ausgangsstoff Chlorwasserstoff verwendet, ist keine weitgehende Substitution möglich. HCl ist als Nebenprodukt nur begrenzt verfügbar und ist wiederum ein Folgeprodukt der ursprünglichen Chlor-Alkalielektrolyse mittels Membranelektrolyse. Dennoch sind technologische und wirtschaftliche Optimierungspotentiale vorhanden, welche die industrielle Anwendbarkeit des Deacon-Verfahrens verbessern könnten. Dazu gehören die Entwicklung edelmetallfreier Alternativen für Katalysatoren als auch Maßnahmen zur Hochskalierung der Technologie auf einen großindustriellen Maßstab.

Abbildung 2-9: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Membranelektrolyse mit Unterscheidung der Handlungsfelder

| Handlungsfeld                                | Maßnahmen                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Technologieentwicklung<br>TRL 1-5<br>TRL 6-9 | 13-1: Entwicklung edelmetallfreier Alternativen für Katalysatoren für die Elektrolyse<br>13-1: Erhöhung der industriellen Anwendungsreife |
| Markteinführung                              |                                                                                                                                           |
| Marktdurchdringung                           |                                                                                                                                           |
| Rechtlich-regulatorischer Rahmen             |                                                                                                                                           |
| Keine Maßnahmen erkennbar                    |                                                                                                                                           |
|                                              | 2017 2020 2025 2030 2030+                                                                                                                 |

Quelle: Öko-Institut e.V.

**Fazit:**

Für diese Umwelttechnologie sind keine relevanten Substitutionsoptionen vorhanden, da sich technische Alternativen wie das Deacon-Verfahren wegen der limitierten Verfügbarkeit von Prozessprodukten nur in begrenztem Umfang nutzen lassen.

### 2.4.3 Fahrzeug-Abgas-Katalysator (UT Nr. 43)

Es wird angenommen, dass die Umwelttechnologie des Fahrzeug-Abgas-Katalysator (UT Nr. 43) in 2025 auf vier Substitutionsoptionen zurückgreifen kann. In 2025 wird angenommen, dass in 15 % der Katalysatoren Palladium durch Platin ersetzt ist. Weiterhin sind im Substitutionsszenario in 2025 je 5 % der Katalysatorsysteme mit einer Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR bzw. einer Zeolith-SCR ausgestattet. Die letzte Substitutionsoption besteht in einer Luftsteuerung, welche die Menge an benötigtem Cer im Katalysatorsystem senkt. Auch diese Option findet 2025 bei 5 % der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren Anwendung.

Es wird davon ausgegangen, dass es in 2050 zu einer Verdoppelung des Marktanteils der jeweiligen Optionen kommt. Dies bedeutet dass in 30 % der Katalysatoren Palladium durch Platin ersetzt wird, in jeweils 10 % der Katalysatorsysteme eine Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR bzw. Zeolith-SCR eingesetzt wird und in 10 % der Katalysatoren eine bessere Luftsteuerung stattfindet.

In der folgenden Tabelle sind die notwendigen Maßnahmen zur Erreichung der Substitution der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren aufgelistet.

Tabelle 2-11: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren (UT Nr. 43)

| Subst. Nr.  | Substitutions-option                             | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                                   | Maßnahmen                                       | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt)                                              | Zeithorizont |
|-------------|--------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 43-1        | Pt ersetzt Pd                                    | 2         | Keine Maßnahmen erkennbar                                                            |                                                 |                                                                                         |              |
| 43-2 / 43-3 | Vanadiumpentoxid/<br>Titandioxid/<br>Wolfram-SCR | 3         | Entwicklung besserer Ammoniakzuführung                                               | Technologieentwicklung hinsichtlich Optimierung | Automobilkonzern e und -zulieferer, BMBF, Forschungsinstitute<br>EU: Horizon            | 2019-2021    |
|             |                                                  |           | Marktdurchdringung                                                                   | Informationsangebot                             | Automobilkonzern e und -zulieferer, VDA, Bundesregierung<br>EU: JRC, Horizon, EIT       | 2022-2024    |
| 43-4        | Luftsteuerung                                    | 3         | Implementierung von hochfrequenzgestützter Beladungserkennung in Katalysatorsystemen | Pilotprojekte zur Implementierung               | Automobilkonzern e und -zulieferer, Bundesregierung, Forschungsinstitute<br>EU: Horizon | 2019-2021    |
|             |                                                  |           | Marktdurchdringung                                                                   | Informationsangebot                             | Automobilkonzern e und -zulieferer, VDA, Bundesregierung<br>EU: JRC, Horizon, EIT       | 2022-2025    |

**Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 43:**

Die Substitution von Palladium durch Platin kann nicht durch Maßnahmen unterstützt werden. Die Substitution richtet sich nach dem Preis der beiden Metalle. Wenn der Unterschied der Kritikalität der beiden Metalle sich im Preis niederschlägt und der Preis des Platins sinkt bzw. der Preis des Palladiums steigt, wird Palladium durch Platin substituiert.

Die SCR-Technologien an sich sind sehr ausgereift. Optimierungspotentiale werden hier nur für eine höhere Schwefelresistenz gesehen, welche für den deutschen Markt und dessen Kraftstoffe nicht notwendig sind. Auch eine Kostenreduktion durch höhere Produktionsmengen wäre eine Möglichkeit, vor allem im Falle der Zeolith-SCR. Allerdings sind die maximal notwendigen Produktionsmengen zu gering, um hier mit Investitionsanreizen höhere (Über-)Produktionskapazitäten zu schaffen. Es ist aber notwendig, an einer anderen Stelle einzugreifen. Zur effektiveren Implementierung der beiden SCR-Technologien (Vanadiumpentoxid/Titandioxid/Wolfram-SCR bzw. Zeolith) wird eine bessere Ammoniakzuführung als Harnstofflösung benötigt, da sich Harnstoff erst ab 190 – 200 °C zu Ammoniak zersetzt, die manche Motor-/Abgasstrangkongfigurationen nicht realisieren können. Hier gibt es die Möglichkeiten, andere Speicherverbindungen zu nutzen wie  $\text{Sr}(\text{NH}_3)_8\text{Cl}_2$  oder die Zersetzungstemperaturen über einen Bypass zu realisieren, um nur das Ammoniak und nicht die Harnstofflösung selbst in den Abgasstrang zu dosieren. Es gibt bereits praxisrelevante Entwicklungen, aber eine Optimierung der Entwicklungen und eine Informationskampagne zur Marktdurchdringung sind für das Erreichen des jeweils avisierten 5 % Marktanteils der beiden SCR-Technologien notwendig.

Eine verbesserte Luftsteuerung ist zur Reduktion von Cer im Katalysatorsystem notwendig. Hierzu muss die eingesetzte Sensorik verbessert bzw. ausgetauscht werden. Es gibt bereits vielversprechende Ergebnisse zur hochfrequenzgestützten Beladungserkennung in Katalysatorsystemen. Diese sind im Labor bereits ausgereift und müssten in Pilotprojekten nun in Fahrzeugen eingebaut und getestet werden. Eine entsprechende Informationskampagne zur Kommerzialisierung müsste folgen, um die avisierte 5 % Marktdurchdringung zu erreichen.

Abbildung 2-10: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren mit Unterscheidung der Handlungsfelder

| Handlungsfeld                                    | Maßnahmen                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Technologieentwicklung<br>TRL 1-5<br>TRL 6-9     | 43-2: Entwicklung besserer Ammoniakzuführung<br>43-3: Entwicklung besserer Ammoniakzuführung<br>43-4: Implementierung von hochfrequenzgestützter Beladungserkennung |
| Markteinführung                                  |                                                                                                                                                                     |
| Marktdurchdringung<br>(z.B. Informationsangebot) | 43-2: Informationskampagne<br>43-3: Informationskampagne<br>43-4: Informationskampagne                                                                              |
| Rechtlich-regulatorischer Rahmen                 |                                                                                                                                                                     |
| Keine Maßnahmen erkennbar                        | 43-1: keine Maßnahmen erkennbar                                                                                                                                     |
|                                                  | 2017                      2020                      2025                      2030                      2030+                                                       |

Quelle: Öko-Institut e.V.

**Fazit:**

Für die Implementierung von Substitutionsoptionen im Fahrzeug-Abgas-Katalysator auf dem Markt bestehen Handlungsbedarfe zum einen in der Technologieoptimierung bzw. Praxisimplementation und zum anderen in der Marktdurchdringung. Bei der Substitution von Palladium durch Platin sind keine Maßnahmen erkennbar.

Bei der Technologieoptimierung für die SCR-Technologien muss bis 2021 eine gut implementierbare Praxislösung zur Eindosierung von Ammoniak entwickelt werden. Für die Luftsteuerung müssen bis 2012 Pilotprojekte durchgeführt werden, um die Laborentwicklungen auf die Straße zu bringen und so den optimalen Einbau sowie die optimalen Betriebsparameter zu finden. Hier sind sowohl die Automobilkonzerne und ihre Zulieferer gefragt als auch die Bundesregierung mit ihren Ministerien, die Pilotprojekte fördern können. Auf EU-Ebene könnte eine Förderung über „Horizon“-Ausschreibungen oder das EIT erfolgen.

Abgesehen von der Substitution von Palladium durch Platin müssen alle Substitutionsoptionen (43-2, 43-3, 43-4) in ihrer Marktdurchdringung unterstützt werden. Hier könnten bestehende Netzwerke und Verbände in Deutschland, wie z. B. das VDI ZRE oder der VDA oder das EIT auf europäischer Ebene Anstöße geben. Ebenfalls könnten Programme des BMBF in Deutschland oder in der EU im Rahmen des JRC oder des „Horizon“-Programms entscheidend sein, um vertrauensbildende Informationen gezielt zu streuen.

**2.4.4 Bleifreie Lote (UT Nr. 56)**

Es wird angenommen, dass die Umwelttechnologie Bleifreie Lote (UT Nr. 56) in 2025 in geringem Umfang auf drei RohS-konforme Substitutionsoptionen zurückgreifen kann:

1. Zinn-Bismut-Lote: 57Bi-42Sn-1Ag
2. Silber-Sintern
3. Mikro-Reibrührschweißen

Die Nutzung alternativer Legierungen zur Substitution silberhaltiger Lote wird in der Industrie seit einigen Jahren getestet. Lote wie 57Bi-42Sn-1Ag können helfen, den Bedarf an den Rohstoffen Zinn und Silber zu senken. Allerdings ist eine breite Anwendung dieser Substitution aufgrund der unzureichenden technischen Eigenschaften (Verarbeitungstemperatur, Sprödigkeit) nicht absehbar. Außerdem ist die Rohstoffverfügbarkeit von Bismut (ein Koppelprodukt der Bleiförderung) viel zu gering, um eine flächendeckende Umstellung auf Zinn-Bismut-Lote zu ermöglichen. Bis 2025 und darüber hinaus werden deshalb lediglich 5 % der klassischen bleifreien Lote durch Zinn-Bismut-Lote ersetzt werden können.

Ein etwas höheres Potential von 10 % in 2025 und 20 % in 2050 wird dem Silber-Sintern beigemessen. Diese Technologie vermeidet die Verwendung von Loten und nutzt stattdessen reines Silber als Kontaktwerkstoff. Gleichwohl besteht auch bei Silber ein Substitutionspotential, weil wesentlich geringere Materialmengen erforderlich sind als bei Lotlegierungen. Allerdings eignet sich diese Verbindungstechnologie nur für speziell dafür designte Elektronikkomponenten und wird auch bis auf weiteres nicht als Ersatz für das klassische Löten von Elektronik angesehen.

Das Mikro-Reibrührschweißen wird ebenfalls nur als Nischentechnologie für spezielle Anwendungsbereiche erachtet. Bis 2025 liegt das Substitutionspotential nicht über 5 % und auch bis 2050 nicht über 10 %. Die Gründe liegen hier ebenfalls in den technischen Eigenschaften.

Bis 2050 wird sich die Molekulare Elektronik möglicherweise soweit entwickelt haben, dass diese eine weitere realistische funktionale Substitution darstellt. Mittelfristig (bis 2025) jedoch wird diese Technologie noch nicht als marktrelevante Alternative zu gelöteter Elektronik betrachtet. Dies schließt

jedoch nicht aus, dass Polymerelektronik sich in einigen Anwendungsgebieten zusätzlich zur konventionellen Elektronik anwenden lässt. Dies wird jedoch nicht als Substitution betrachtet.

Da die Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung des Technologiesektors Elektronik bis 2050 insgesamt sehr hoch sind, konzentriert sich die folgende Ausarbeitung auf den Zeithorizont bis 2025. In kursiver Schrift sind Maßnahmen für die Erreichung der Substitutionen 2050 dargestellt.

Tabelle 2-12: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der bleifreien Lote (UT Nr. 56)

| Subst. Nr. | Substitutionsoption          | Priorität                           | Ziel der Maßnahmen                                          | Maßnahmen                                                                                                          | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeithorizont   |
|------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|
| 56-1       | Zinn-Bismut-Lote             | 3                                   | Erreichen der industriellen Anwendungsreife                 | Weiterentwicklung und industrielles Upscaling                                                                      | Industrie BMWi                             | 2020           |
|            |                              |                                     | Marktdurchdringung vergrößern                               | Informationsangebote                                                                                               |                                            | 2020           |
| 56-2       | Silber-Sintern               | 2                                   | Technologieentwicklung                                      | Prozessentwicklung und Upscaling des Verfahrens in generischen Fertigungsprozesse der Elektronikbranche verbessern | Industrie BMBF, BMWi, FhG EU-FP9 ff        | 2025           |
|            |                              |                                     | Markteinführung                                             | Prozesskonformität verbessern                                                                                      | Industrie BMBF, BMWi, FhG EU-FP9 ff        | 2020-2030      |
| 56-3       | Mikro-Reibrührschweißen      | 3                                   | Adaption des FSW Prozesses zur elektronischen Kontaktierung | Prozessgeschwindigkeit und Parallelbearbeitung hunderter Kontaktpunkte, Upscaling                                  | Industrie BMBF, BMWi, FhG EU-FP9 ff        | 2020-2025      |
|            |                              |                                     | Markteinführung                                             | Prozesskonformität verbessern                                                                                      | Industrie, BMBF, BMWi, FhG EU-FP9 ff       | 2020-2030      |
|            |                              |                                     | Qualitätssicherung                                          | Technische Normung und Qualitätsstandards                                                                          | Industrie VDE, DIN, CENELEC                | 2020-2025      |
| 56-4       | <i>Molekulare Elektronik</i> | <i>3 (kein Marktanteil in 2025)</i> | <i>Technologieentwicklung</i>                               | <i>Langfristige F&amp;E Förderung</i>                                                                              | <b>FhG</b><br>BMBF<br>EU-FP9 ff            | <i>Ab 2017</i> |

#### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 37:

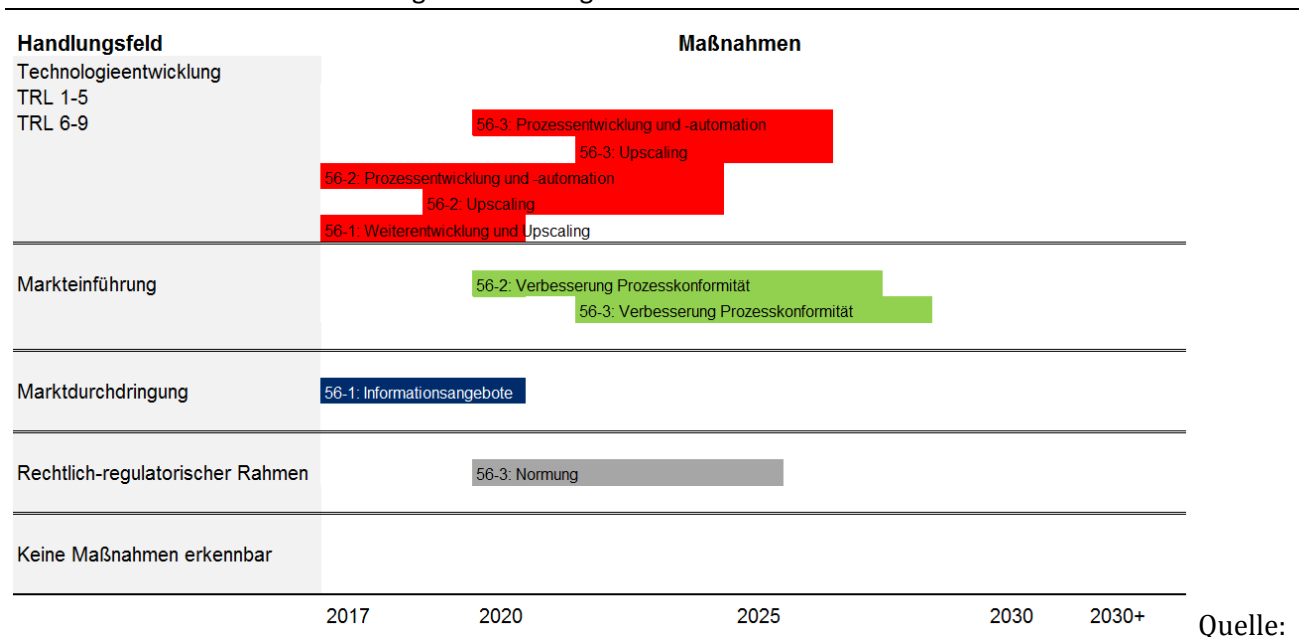
Die Substitution von bleifreien Loten auf Zinnbasis durch andere bleifreie (und RohS-konforme) Legierungen hat sich bisher als äußerst schwierig erwiesen, weil die zur Verfügung stehenden

Alternativen nicht die optimale Kombination aus technischen Eigenschaften, Verarbeitbarkeit und Kosten haben. Die genannte Substitution Zinn-Bismut-Lote kommen diesen Ansprüchen am nächsten, sind aber gleichzeitig wiederum vom Problem der Ressourcenknappheit (Bismut) betroffen. Aus heutiger Perspektive bieten sie keine massenmarkttaugliche Alternative zur Verwendung silberhaltiger Zinnlote, Zinn-Bismut-Lote sind aber als Nischenprodukt aussichtsreich.

Die beiden anderen genannten Substitutionsmöglichkeiten basieren auf fundamental anderen Verbindungstechnologien (Sintern und Schweißen) und kommen deshalb ohne Lote aus. Allerdings sind diese Verfahren aus technologischen Gründen schwierig in die bisher etablierten elektronischen Fertigungsprozesse zu integrieren, weil sie den Einsatz speziell dafür optimierter Elektronikkomponenten erfordern (Materialauswahl der Kontakte, mechanische und thermische Stabilität der Substrate) sowie Geometrie der Kontaktstellen. Insbesondere das Silber-Sintern erfordert die Applikation lokal höherer Temperaturen als das Lötten und kann deshalb nicht ohne weiteres in bestehende Fertigungslinien integriert werden. Das Mikro-Reibrührschweißen erfolgt im Gegensatz dazu ohne thermische Energiezufuhr, sondern durch punktuelle mechanische Krafteinwirkung. Dieses Verfahren erfordert den Einsatz mechanisch entsprechend designter Elektronikbauteile (keine verdeckten Kontaktpunkte). Außerdem ist die Kontaktierung hunderter oder tausender Kontaktpunkte auf einer elektronischen Leiterplatte mittels eines seriellen Prozesses viel zu langsam für die Ansprüche einer wirtschaftlich sinnvollen Fertigung. Die Anwendung dieses Verfahrens als Substitution für das Lötten würde demzufolge eine massive Parallelisierung erfordern. Maßnahmen zur technologischen Innovation sind demzufolge unabdingbar, um diese genannten Technologien als Alternative zum Lötten nutzbar zu machen. Außerdem sind Innovationen zur Prozessautomation und -integration auf Ebene der gesamten Wertschöpfungskette in der Elektronikindustrie erforderlich.

Die Nutzung von Polymerelektronik wird sich voraussichtlich zunächst in Form von Nischenanwendungen entwickeln und nicht direkt in funktionale Konkurrenz zur konventionellen Elektronik treten. Gleichwohl könnten relativ schnell Massenprodukte mit organischer Elektronik auf den Markt kommen. Allerdings sind diese voraussichtlich von vornherein ohne die Anwendung von Lötprozessen, sondern mittels Druckprozessen gefertigt, so dass hieraus kein nennenswertes Substitutionspotential für die elektronische Löttechnologie in den traditionellen Produktgruppen der Mikroelektronik und Leistungselektronik erwächst. Allerdings hat diese Technologie das Potential, Marktanteile im Bereich von Low-cost Anwendungen zu substituieren.

Abbildung 2-11: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der bleifreien Lote mit Unterscheidung der Handlungsfelder



Öko-Institut e.V.

### Fazit:

Für die elektronische Löttechnologie und den Einsatz silberbasierter RohS-konformer Lote existieren derzeit keine massenmarkttauglichen Substitutionsoptionen. Abgesehen vom Ersatz silberhaltiger Lote durch andere, bereits markverfügbarer Lot-Legierungen stehen keine weiteren stofflichen Substitutionen zur Verfügung. Bismut-haltige Legierungen sind auch vom Problem der Ressourcenkritikalität betroffen und stellen deshalb keine massenmarkttaugliche Lösung dar.

Die Nutzung neuartiger Verbindungstechnologien für elektronische Kontaktierung erfordert neben weiteren prozesstechnischen Innovationen (Parallelisierung) auch Weiterentwicklungen in der Prozessautomation und dem Qualitätsmanagement der so gefertigten Produkte.

### 2.4.5 Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98)

Für die Substitution von Lithium-Ionen-Batterien bzw. Teilen davon konnten drei Substitutionsoptionen herausgearbeitet werden. Für eine Materialsubstitution ist die Substitution von Kupfer durch Aluminium denkbar. Hier wird von einer möglichen Substitution von bis zu 30 % bis 2025 und von 40 % bis 2050 ausgegangen. Darüber hinaus werden neben der Materialsubstitution mit dem Doppelschichtkondensator und der Brennstoffzelle zwei funktionelle Substitutionsoptionen als wahrscheinlich erachtet. Auf Basis der zu Grunde liegenden Informationen und Annahmen ist bis 2025 von einer Substitution der LIB durch Doppelschichtkondensatoren in Höhe von 5 % und bis 2050 in Höhe von 10 % auszugehen. Die Substitution durch Brennstoffzellen dürfte erst 2050 mit rund 20 % einen nennenswerten Beitrag liefern.

Nachfolgend werden die einzelnen Substitutionsoptionen mit den jeweiligen Prioritäten, Maßnahmen, Akteuren, usw. nochmals tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 2-13: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge (UT Nr. 98)

| Subst. Nr. | Substitutionsoption             | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                                                                              | Maßnahmen                                                           | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt)                                                              | Zeithorizont |
|------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 98-1       | Kupfer durch Aluminium ersetzen | 1         |                                                                                                                                 |                                                                     |                                                                                                         |              |
| 98-2       | Doppelschichtkondensator        | 3         | Erhöhung der Energiedichte, Optimierung Elektroden, Elektrolyten und Separatoren                                                | Materialforschung, Angewandte Forschung                             | FhG, BMBF                                                                                               | Ab 2017      |
| 98-3       | Wasserstoff-Brennstoffzelle     | 3         | Kostensenkung (Investitions- und Betriebskosten)<br>Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads<br>Verbesserung der Betriebssicherheit | Angewandte Forschung                                                | FhG<br>BMW; BMBF; BMVI; Universitäten<br>Industrie<br>Energieversorger<br>Stadtwerke (Gasinfrastruktur) | Ab 2017      |
|            |                                 |           | Ausbau Wasserstoff-Infrastruktur (Elektrolyseure, Tankstellen)<br>Marktdurchdringung<br>Partieller Systemwechsel                | Politische Weichenstellung zum Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur | Bundesregierung                                                                                         | Ab 2020      |

**Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 98**

98-1: Die Substitution von Kupfer durch Aluminium in der Batterieelektronik erfolgt vor allem durch die Materialkosten und ist demnach marktgetrieben. Im Vordergrund stehen hierbei insbesondere die Preisdifferenz zwischen Kupfer und Aluminium, die derzeit (August 2017) zwischen 3.700 € und 3.900 € liegt<sup>7</sup>. Gezielte politische Steuerungen, die zu einer verstärkten Substitution von Kupfer durch Aluminium führen, liegen derzeit nicht vor und bis 2025 ist auch nicht mit einem gezielten Strategiewechsel zu rechnen. Letztendlich obliegt die Entscheidung, Aluminium anstelle von Kupfer zu verwenden, bei den Produzenten von Batterieelektronik bzw. generell Elektronikherstellern sowie den Nutzeransprüchen der Kunden.

98-2: Doppelschichtkondensatoren (DSK) sind bereits seit Jahren Stand der Technik im Bereich der mobilen Anwendungen. DSK kommen diesbezüglich als Energiespeicher für sekundäre Systeme (z. B.

<sup>7</sup> Eigene Analysen historischer Daten von Rohstoffpreisen. Datenquelle: [www.finanzen.net/rohstoffe/](http://www.finanzen.net/rohstoffe/)

Servolenkung, Airbag-Auslösesysteme, Katalysatorvorwärmung) zum Einsatz. Darüber hinaus sind DSK vielversprechend für Anwendungen, die sehr kurze und hohe Leistungen beanspruchen bzw. Leistungen zum Einspeichern bereitstellen, so z. B. bei der Rekuperation von Bremsenergie und der Beschleunigung. Lithium-Ionen-Batterien könnten somit zukünftig in Elektro-Fahrzeugen durch DSK entlastet und möglicherweise auch kleiner dimensioniert werden. Eine Hemmschwelle für die weitere Verbreitung der DSK ist ihre vergleichsweise geringe Energiedichte, was zu hohen Investitionen bei größeren DSK führt. Zentrale Forschungs- und Entwicklungsanforderungen liegen dahingehend in der Verbesserung der Energiedichte durch verbesserte Elektroden und des Batteriemanagements. Wichtiger Bestandteil hierbei ist die Materialforschung. Die Mehrheit der Forschungen zu DSK findet heute, wie auch bei den LIB, in Asien statt.

98-3: Im Mobilitätsbereich konnte die Wasserstoff-Brennstoffzelle dank anhaltender Forschung und Förderung (z. B. CEP<sup>8</sup>, NOW<sup>9</sup>, NIP<sup>10</sup>) in den letzten Jahren in vielen Pilotprojekten, Reallaboren und Praxistests weltweit eingeführt werden. So hat u. a. die BMW Group<sup>11</sup> angekündigt, ab 2021 Fahrzeuge in Kleinserie herzustellen und ab 2025 auf dem Markt anzubieten. Eine kommerzielle Marktreife konnte trotz vergleichsweise hoher Investitionen und Subventionen jedoch bisher (2017) noch nicht erreicht werden. Hintergründe sind z. B. die bisher nur sehr gering ausgebaute Infrastruktur in Form von Ladestationen und Elektrolyseuren. In diesem Kontext wird mittlerweile jedoch auch von dem Phänomen des „Henne-Ei-Problems“ gesprochen, in dem die Frage aufgeworfen wird, was eigentlich zuerst vorhanden sein muss – die Wasserstoff-Infrastruktur oder die Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Etablierung der Brennstoffzellen grundsätzlich losgelöst von der Entwicklung und Verbreitung einer Wasserstoff-Infrastruktur möglich ist. Weitere Aspekte, die bisher eine breite Marktdurchdringung bremsen, sind die vergleichsweise hohen Investitions- und Betriebskosten der Infrastruktur und der Brennstoffzelle mit einem Wasserstofftank, der aus Sicherheitsgründen besonders robust sein muss (Betriebssicherheit und Betriebsdruck von 700 Bar). Es zeigt sich, dass trotz vielfältiger Forschungsprogramme und Dynamiken in den letzten Jahren weiterhin ein erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, insbesondere bei der Brennstoffzellen-Technologie besteht, die noch immer einige Fragen aufwirft. Zentrale Aspekte sind z. B. die Optimierung von Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Gleichzeitig ist es wichtig die Kosten der Brennstoffzelle zu optimieren. Dies umfasst u. a. kostengünstige Katalysatormaterialien, Membranmaterialien oder auch die Verbesserung von Brennstoffzellenstapeln (fuel cell stacks).

### Fazit:

Insgesamt zeigt sich, dass zur Umsetzung der Substitutionsoptionen sehr unterschiedliche Anstrengungen bzw. Maßnahmen ergriffen werden müssen. So wird die Substitution von Kupfer in der Elektronik durch Aluminium vorrangig durch Marktentwicklungen (Rohstoffpreise, Zahlungsbereitschaft der Endkunden) beeinflusst. Die Technologie der Kondensatoren hat zwar bereits in sekundären Systemen (Servolenkung, Airbag-Auslösesysteme, Katalysatorvorwärmung, usw.) eine Marktdurchdringung erreicht, konnte jedoch darüber hinaus bisher noch keine weitere Etablierung erreichen. Problematisch sind diesbezüglich die geringe Energiedichte und die hohen Kosten von Doppelschichtkondensatoren. Eine (teilweise) Substitution von LIB durch DSK ist

<sup>8</sup> Clean Energy Partnership (CEP); <https://cleanenergypartnership.de/h2-mobilitaet/brennstoffzellenantrieb/>

<sup>9</sup> Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NOW GmbH; <https://www.now-gmbh.de/de>

<sup>10</sup> Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (NIP); <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/nationales-innovationsprog-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie-nip.html>

<sup>11</sup> BMW Group Bilanzpressekonferenz für das Geschäftsjahr 2016. Auditorium BMW Welt, München [Zugriff am: 26. September 2017]. Verfügbar unter: [https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup\\_com/ir/downloads/de/2017/GB/Rede\\_Krueger\\_BPK\\_2017.pdf](https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2017/GB/Rede_Krueger_BPK_2017.pdf)

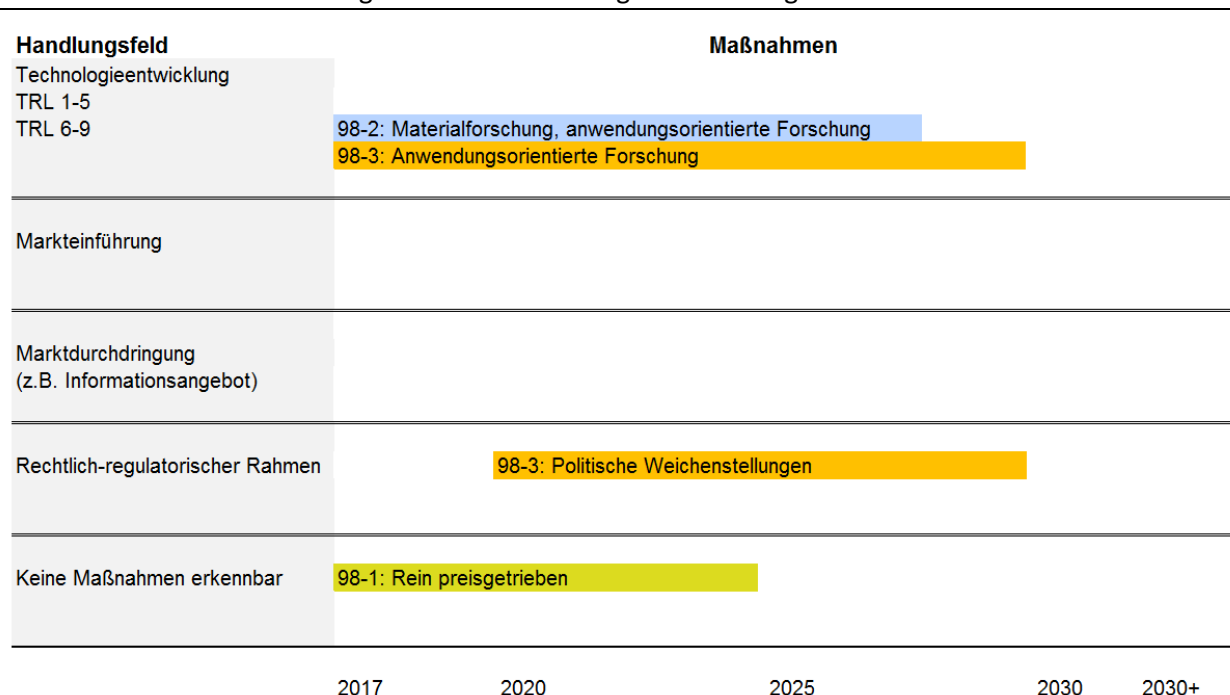
dahingehend mit der Verbesserung der Energiedichte der DSK verbunden, was insbesondere einer eingehenderen Forschung im Bereich alternativer bzw. verbesserter Materialien für Elektroden, Elektrolyte und Separatoren bedarf. Perspektivisch ist davon auszugehen, dass Doppelschichtkondensatoren insbesondere in Kombination mit LIB oder auch Wasserstoff-Brennstoffzellen als Leistungsspeicher eingesetzt werden können, um Leistungsanforderungen abzufangen.

Die Etablierung der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie erfordert neben der Optimierung und Weiterentwicklung einzelner Bestandteile einen zumindest partiellen Systemwechsel hin zu einer verstärkten Power-to-Gas Systemorientierung. Durch einen Ausbau der Power-to-Gas-Infrastruktur und der Kombination mit stationären Anwendungsbereichen können hierdurch Synergieeffekte erschlossen werden und die Systemkosten zumindest teilweise verringert werden. Grundsätzlich ist die Brennstoffzelle jedoch nicht auf einen Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur angewiesen. Insgesamt vereint die Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie eine Vielzahl an Akteuren und Branchen (z. B. Deutsche Bahn AG, Automobilbranche, Energieversorger, Eigenheimbesitzer, usw.) aus Deutschland aber auch global<sup>12</sup>, die die Marktdurchdringung durchaus vorantreiben können. Hierzu wird es jedoch notwendig sein, durch die Regierung entsprechende Weichen zu stellen, z. B. in Form von Subventionen für den Aufbau einer Infrastruktur. Entscheidender jedoch scheint die Verbesserung der eigentlichen Brennstoffzellen-Technologie. Auf Basis der zuvor dargelegten Annahmen und Informationen lässt sich schlussfolgern, dass kurzfristig die Substitution von LIB oder auch einzelnen Bestandteilen nur bedingt erfolgen kann. Langfristig hingegen könnte, insbesondere durch die Brennstoffzellen-Technologie und einen (partiellen) Systemwechsel, die Nachfrage nach LIB reduziert bzw. substituiert werden. Hinderlich könnte im Gesamtkontext jedoch die voranschreitende Verbesserung der Lithium-Ionen-Batteriespeichertechnologie durch Verbesserung von Energiedichte und Wirkungsgrad sein, was zumindest im mobilen Bereich zu einem verringerten Engagement in der Forschung und Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie resultieren könnte.

---

<sup>12</sup> Z. B.: Hydrogen Council; <http://hydrogencouncil.com/our-members/>

Abbildung 2-12: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge mit Unterscheidung der Handlungsfelder



Quelle: IZT

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

#### 2.4.6 Lithium-Ionen-Speicher (UT Nr. 100)

Zur Vorbeugung möglicher Materialengpässe bei Lithium, Kupfer und Mangan besteht die Option, stationäre Lithium-Ionen-Speicher durch andere Speichertechnologien zu substituieren oder begrenzende Materialien durch alternative Materialien zu ersetzen. Im Rahmen der Substitutionsszenarien konnten diesbezüglich vier potentielle Substitutionsoptionen identifiziert werden. Es wird angenommen, dass beispielsweise Kupfer bis 2025 zu 20 % durch Aluminium ersetzt werden kann. Nach 2025 wird davon ausgegangen, dass der Marktanteil von Aluminium auf vergleichbarem Niveau (20 %) bleibt.

Die Substitution von Lithium-Ionen-Speichern durch Redox-Flow-Batteriesystemen wird auf Basis der zu Grunde liegenden Informationen und Annahmen bis 2025 10 % und bis 2050 20 % erreichen. Der Marktanteil von Natrium-Schwefel-Batterien wird voraussichtlich 2025 bei rund 5 % liegen und bis 2050 konstant bleiben.

Nachfolgend werden die einzelnen Substitutionsoptionen mit den jeweiligen Prioritäten, Maßnahmen, Akteuren, usw. nochmals tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 2-14: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Lithium-Ionen-Speicher (UT Nr. 100)

| Subst. Nr. | Substitutionsoption    | Priorität | Ziel der Maßnahmen | Maßnahmen | Akteure<br>(wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeithorizont |
|------------|------------------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------------------------------------|--------------|
| 100-1      | Kupfer durch Aluminium | 1         |                    |           |                                               |              |

| Subst. Nr. | Substitutionsoption         | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                                                                                             | Maßnahmen                                                 | Akteure<br>(wichtigster Akteur fett gedruckt)                                                      | Zeithorizont |
|------------|-----------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|            | ersetzen                    |           |                                                                                                                                                |                                                           |                                                                                                    |              |
| 100-2      | Natrium-Schwefel-Batterie   | 3         | Entwicklung von Niedertemperatur-NaS-Batterien, Verringerung von Risiken beim Betrieb, Kostensenkung (Investitions- und Betriebskosten)        | Angewandte Forschung                                      | FhG; BMWi; BMBF; Universitäten, DFG                                                                | Ab 2017      |
|            |                             |           | Markteinführung                                                                                                                                | Förderung von Demonstrationsanlagen, Informationsangebote |                                                                                                    | Ab 2020      |
| 100-3      | Redox-Flow-Batterie         | 2         | Optimierung von Elektrolyten, Lösungen und Membranen Kostensenkung (Investitions-, Betriebskosten)                                             | Angewandte Forschung                                      | FhG; BMWi; BMBF; Universitäten, DFG Industrie (Chemiebranche; Verfahrens- und Produktionsbereiche) | Ab 2017      |
|            |                             |           | Marktdurchdringung                                                                                                                             | Informationsangebot                                       | Verbände                                                                                           | Ab 2020      |
| 100-4      | Wasserstoff-Brennstoffzelle | 3         | Kostensenkung (Investitions-, Betriebskosten) Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur (u. a. Elektrolyseure) | Angewandte Forschung                                      | FhG; BMWi; BMBF; Universitäten, DFG Industrie Energieversorger Stadtwerke (Gasinfrastruktur)       | Ab 2017      |
|            |                             |           | Marktdurchdringung<br>Partieller Systemwechsel                                                                                                 | Politische Weichenstellung                                | Bundesregierung                                                                                    | Ab 2020      |

### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 100

100-1: Die Substitution von Kupfer durch Aluminium in der Batterieelektronik erfolgt aus Sicht der Autoren vor allem durch die Materialkosten und ist demnach marktgetrieben. Im Vordergrund stehen

hierbei insbesondere die Preisdifferenz zwischen Kupfer und Aluminium, die derzeit (August 2017) zwischen 3.700 € und 3.900 € liegt<sup>13</sup>. Gezielte politische Steuerungen, die zu einer verstärkten Substitution von Kupfer durch Aluminium führen liegen derzeit nicht vor und bis 2025 ist auch nicht mit einem gezielten Strategiewechsel zu rechnen. Letztendlich obliegt die Entscheidung, Aluminium anstelle von Kupfer zu verwenden bei den Produzenten von Batterieelektronik bzw. generell Elektronikherstellern sowie den Nutzeransprüchen der Kunden.

100-2: Eine der zentralen Herausforderungen bei der Weiterentwicklung und Verbreitung von Natrium-Schwefel-Batterien (NaS-Batterien) ist die Reduktion der Betriebstemperatur, die mit über 300 °C vergleichsweise hoch ist (Hochtemperatur-Batterie) und daher insbesondere bei Ruhephasen einer Wärmezufuhr bedarf. Während des Betriebs kann die Batterie hingegen durch die internen Reaktionen besonders hohe Temperaturen erreichen, so dass die Batterie aktiv gekühlt werden muss. Durch die Reduktion der Betriebstemperatur können zum einen die Risiken für Mensch und Umwelt reduziert als auch die Investitions- und Betriebskosten (Batteriemanagementsystem, Strom- und Wärmebedarf) verringert werden, welche zentrale Kriterien für die Steigerung der Marktdurchdringung darstellen. Durch die verringerte Betriebstemperatur können dann auch neue Märkte, u. a. der Markt der privaten Nutzer, erschlossen werden, was zu einem erhöhten Absatz und voraussichtlich zu einer weiteren Kostendegression führt. Um die Weiterentwicklung von NaS-Batterien voran zu bringen, wäre eine gezielte Erforschung der NaS-Batterie-Technologie, die durch den Bund bzw. die einzelnen Ministerien (BMBF, BMWi) gefördert wird, notwendig. Vorreiter in der NaS-Forschung sind asiatische Firmen, hier insbesondere die Firma NGK Insulators zusammen mit TEPCO (Tokyo Electric Power Co.) aus Japan.<sup>14</sup> Die Weiterentwicklung von NaS-Batterien mit Betriebstemperaturen im zweistelligen Celsius-Bereich (Raumtemperatur) findet vorrangig in Asien und den USA statt und erfolgte erst etwa ab Ende 2012.<sup>15</sup> Erste Pilotprojekte haben Niedertemperatur-NaS-Batterien entwickelt, die 2015 jedoch noch nicht den kommerziellen Reifegrad erreicht hatten.<sup>16</sup> Eine Analyse von Patenten zeigt beispielsweise, dass Europa und insbesondere Deutschland sich nur in vergleichsweise geringem Umfang an der Erforschung und Weiterentwicklung von NaS-Batterien beteiligt. In einzelnen Märkten (z. B. Japan, USA) und Anwendungsgebieten (Netzstabilität und Lastausgleich) haben NaS-Batteriesysteme bereits einen gewissen Stellenwert erreicht. Es wird angenommen, dass die Markteinführung von Niedertemperatur-NaS-Batterien voraussichtlich ab 2020 erfolgt.

100-3: Die Redox-Flow-Technologie wird bereits in einigen Systemen und Anwendungsfällen weltweit genutzt und hat auch bereits in Einzelfällen den kommerziellen Reifegrad erreicht. Um zukünftig jedoch zu einer weiteren Verbreitung beizutragen ist es notwendig, die spezifischen Investitionskosten von Redox-Flow-Systemen zu verringern. Hierzu stehen mehrere Entwicklungspfade zur Verfügung. Dazu gehören, die Materialkosten der Elektrolyte zu verringern oder auch das Konzentrationsverhältnis der Elektrolyte zu verbessern, um hierdurch die benötigte Menge an Elektrolyt zu verringern und folglich die Kosten zu senken. Einer Optimierung bedarf auch die Zusammenführung von mehreren Zellen (Stacks), die zum einen kostengünstig, aber auch möglichst langlebig sein müssen. Damit verbunden ist auch die Entwicklung neuer Verfahren zur günstigen Herstellung von Stacks. Des Weiteren bedarf es einer Optimierung der Elektroden, die in

<sup>13</sup> Eigene Analysen historischer Daten von Rohstoffpreisen. Datenquelle: [www.finanzen.net/rohstoffe/](http://www.finanzen.net/rohstoffe/)

<sup>14</sup> Vgl. <https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/31747/>

<sup>15</sup> ADELHELM, P., P. HARTMANN, C.L. BENDER, M. BUSCHE, C. EUFINGER und J. JANEK, 2015. From lithium to sodium: cell chemistry of room temperature sodium-air and sodium-sulfur batteries [online]. Beilstein journal of nanotechnology, 6, 1016-1055. ISSN 2190-4286. Verfügbar unter: doi:10.3762/bjnano.6.105; S. 1043

<sup>16</sup> ADELHELM, P., P. HARTMANN, C.L. BENDER, M. BUSCHE, C. EUFINGER und J. JANEK, 2015. From lithium to sodium: cell chemistry of room temperature sodium-air and sodium-sulfur batteries [online]. Beilstein journal of nanotechnology, 6, 1016-1055. ISSN 2190-4286. Verfügbar unter: doi:10.3762/bjnano.6.105; S. 1049-1050

den meisten Fällen aus diversen Kohlenstoffverbindungen (häufig Graphitfilze) bestehen. Ein anderer Aspekt ist die Verringerung der Umweltrisiken durch die verwendeten Elektrolytlösungen, die bisher vorrangig organische bzw. anorganische Säuren als Lösungsmittel verwenden. Durch die Verringerung der Umweltrisiken können ebenfalls Kosten beim Batteriemanagementsystem eingespart werden. Insgesamt werden der Redox-Flow-Technologie in den nächsten 5-10 Jahren ein erhöhtes Entwicklungspotential und eine erhöhte Wettbewerbsfähigkeit vorhergesagt. Zur Erreichung des Marktanteils von 10 % in 2025 sind Maßnahmen zur Marktdurchdringung anzustoßen. Hier sollten Informationsangebote von Batterieherstellern, Wirtschaftsverbänden (wie dem VDMA) in Kooperation mit Forschungseinrichtungen geschaffen werden.

100-4: Die Wasserstoff-Brennstoffzelle wird bereits seit Jahren als alternative Energiequelle für den Umstieg von fossilen zu umweltfreundlichen Energiequellen gehandelt. Die Wasserstoff-Brennstoffzelle hat in den letzten Jahren einen grundlegenden kommerziellen Reifegrad erreicht. So konnte durch lang angelegte Förderprogramme (z. B. NIP<sup>17</sup>; BMVI<sup>18</sup>) und Forschungsprojekte (z. B. Callux<sup>19</sup>) die Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie in einzelnen Bereichen bis zur Marktreife entwickelt und getestet werden. Bei diesen Wasserstoff-Brennstoffzellen handelt es sich jedoch bisher vorrangig um Systeme mit vergleichsweise geringer Leistung (< 1 MW). Weltweit sind jedoch bereits auch Systeme mit Leistungen im unteren MW-Bereich installiert worden und im Betrieb. Bezieht man die Elektrolyse in den Gesamtprozess mit ein, dann fällt der Gesamtwirkungsgrad der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie vergleichsweise niedrig aus. Durch die vorgelagerte Elektrolyse und die dazugehörige Peripherie entstehen vergleichsweise hohe Kosten. Trotz der bereits vorangeschrittenen Verbreitung der Brennstoffzellen-Technologie bedingt eine weitere Verbreitung einen systemischen Wechsel, da für eine größere Marktdurchdringung die benötigte Infrastruktur geschaffen werden muss. Dennoch bzw. gerade deshalb unterliegt die Brennstoffzellen-Technologie inklusive der Bereitstellung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff in Deutschland einer dynamischen Entwicklung, die durch universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sowie durch industrielle Partner vorangetrieben wird.

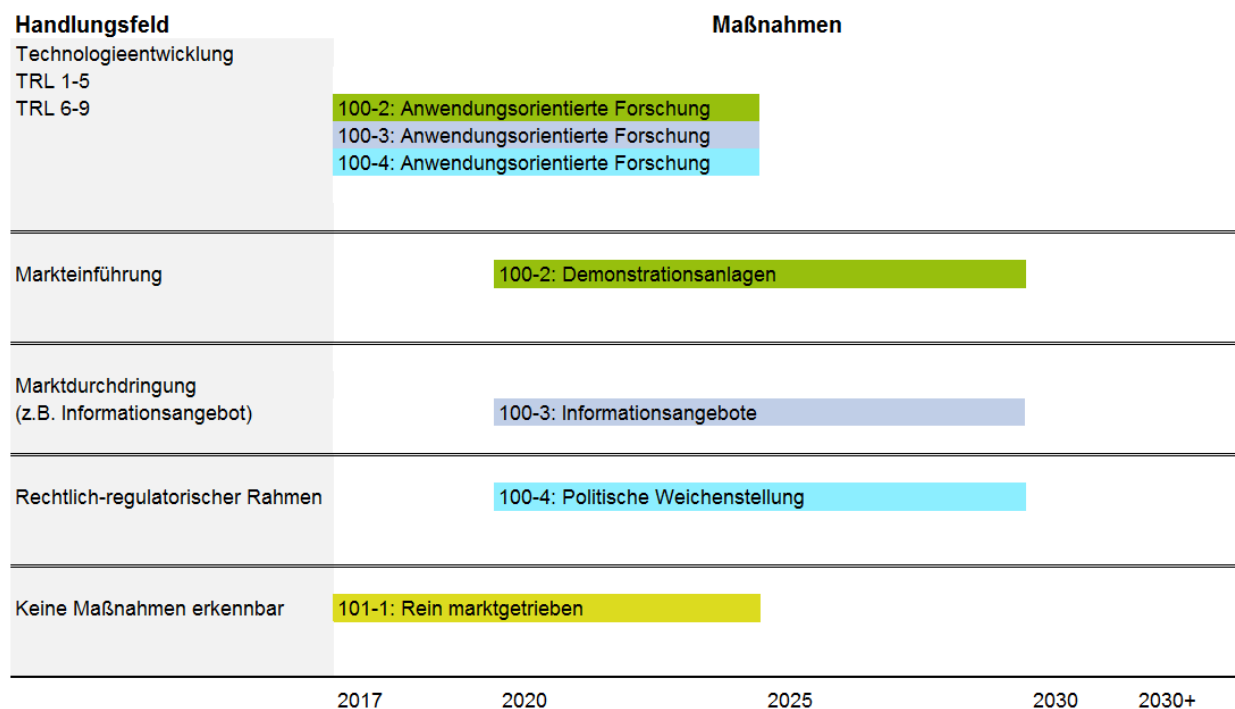
---

<sup>17</sup> Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006 - 2016 (NIP) [Online] [Zugriff am: 21. September 2017]. Verfügbar unter: [https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_7636/nip-regierungsprog.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_7636/nip-regierungsprog.pdf)

<sup>18</sup> BMVI, 2016. Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 - 2026 – von der Marktvorbereitung zu wettbewerbsfähigen Produkten. zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms

<sup>19</sup> CALLUX, 2015. Callux, Praxistest Brennstoffzelle fürs Eigenheim. Hintergründe und Aktivitäten [Online] [Zugriff am: 21. September 2017]. Verfügbar unter: <https://now-gmbh.de/de/nationales-innovationsprog/strom-und-waerme-mit-brennstoffzellen/callux>

Abbildung 2-13: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Lithium-Ionen-Speicher mit Unterscheidung der Handlungsfelder



Quelle: IZT

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)**Fazit:**

Insgesamt zeigt sich, dass zur Umsetzung der Substitutionsoptionen sehr unterschiedliche Anstrengungen bzw. Maßnahmen ergriffen werden müssen. So wird die Substitution von Kupfer in der Elektronik durch Aluminium vorrangig durch Marktentwicklungen (Rohstoffpreise, Zahlungsbereitschaft der Endkunden) beeinflusst. Bei der Einführung von NaS-Batterien hingegen zeigt sich eine andere Sachlage. So findet umfangreiche Forschung zur erhöhten Marktfähigkeit der NaS-Batterietechnologie (100-2) mehrheitlich in Asien statt. In Europa und Deutschland selbst ist der Forschungsumfang als gering einzustufen. Generell wird der NaS-Batterietechnologie in Deutschland auch wenig Entwicklungspotential unterstellt. Um eine Entwicklung, hin zu einer verstärkten Markteinführung zu erreichen, wären vermehrt Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen nötig (Niedertemperatur-NaS-Batterie) bzw. eine gezielte Technologiestrategie und damit Förderung der NaS-Batterietechnologie notwendig. Zur Etablierung der Redox-Flow-Batterietechnologie bis 2025 und darüber hinaus besteht die vorrangige Aufgabe in der Optimierung der Leistung (Energiedichte, Wirkungsgrad), der Reduzierung der Investitionskosten sowie der Verringerung der Umweltrisiken durch umweltverträglichere Elektrolytlösungen. Das Hauptaugenmerk sollte daher auf der Weiterentwicklung der Elektrolyte bzw. der Suche nach alternativen Elektrolyten und der Optimierung der Elektroden sowie Membranen liegen. Die erst seit kurzem (seit ca. 2013) angestoßenen Forschungen durch z. B. die Fraunhofer-Gesellschaft oder das ZAE Bayern sowie an universitären Einrichtungen sollten durch gezielte Förderung intensiviert werden. Die Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie hat im kleineren Leistungsbereich bereits einen kommerziellen Reifegrad erreicht und wird von verschiedenen Unternehmen auf dem Markt vertrieben. Auch wenn

die Brennstoffzellen-Technologie in den letzten Jahren Fortschritte gemacht hat, so wird die weitere Marktdurchdringung derzeit durch die fehlende Infrastruktur gebremst. Ein Ausbau der Infrastruktur ist jedoch mit einem nicht unerheblichen Systemwechsel verbunden. Insgesamt zeigt sich bei den vier Substitutionsoptionen in unterschiedlichem Ausmaß, dass mögliche Rohstoffknappheiten bei der Lithium-Ionen-Technologie durch andere Knappheiten (Ressourcenknappheit, Verfügbarkeit) bei den Substitutionsoptionen ersetzt werden (z. B. Aluminium, Vanadium). Daher sollte das Ziel insbesondere in der Entwicklung von alternativen Materialien der Hauptkomponenten liegen, im Fall der Redox-Flow-Batterie z. B. des Elektrolyten.

#### 2.4.7 Permanentmagnetgeneratoren in WKA (UT Nr. 106)

Bei Permanentmagnetgeneratoren in WKA lässt sich auf stofflicher Ebene Dysprosium durch das nach unserer Methodik weniger kritische Terbium ersetzen. Der Ersatz von Dysprosium durch Terbium ist heute schon technisch möglich. Außerdem lässt sich der Bedarf an Dysprosium und Neodym durch FeCo- und FeNi-basierte Materialien, langfristig auch durch Nanokomposite und Nanostrukturen, reduzieren. Derzeit sind die erreichbaren Energiedichten allerdings zu gering für den Einsatz in WKA. Für FeCo- und FeNi-basierte Magnete wird ein Einsatz von 5 % im Jahr 2025 angenommen (der auch 2050 auf diesem Level bleibt). Für Permanentmagnete aus Nanokompositen und Nanostrukturen wird ein Substitutionspotential von jeweils 5 % im Jahr 2050 angenommen. Als technologische Substitutionsmöglichkeit für Permanentmagnetgeneratoren in Windkraftanlagen kommen HTS-Generatoren in Betracht. Deren Substitutionspotential wird bis 2025 mit 5 % und bis 2050 mit 30 % angenommen.

In der folgenden Tabelle sind die erforderlichen Maßnahmen zur Erschließung der angenommenen Substitutionspotentiale aufgeführt.

Tabelle 2-15: Maßnahmen zur Erreichung der Substitutionen der Permanentmagnetgeneratoren in WKA (UT Nr. 106)

| Subst.-Nr. | Substitutionsoption                   | Priorität | Ziel der Maßnahmen                                                         | Maßnahmen                                 | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeithorizont |
|------------|---------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|
| 106-1      | Dysprosium durch Terbium              | 1         | -                                                                          | -                                         | -                                          | -            |
| 106-2      | HTS-Generatoren                       | 3         | Verbesserung der Zuverlässigkeit                                           | F&E (Demonstratoren)                      | WKA-Hersteller, FhG                        | 2020 - 2025  |
|            |                                       |           | Einsatz geeigneter Supraleiter                                             | Materialforschung                         | BMBF, EU, Hochschule n                     | 2017 - 2025  |
|            |                                       |           | Senkung der Kosten für den Supraleiter (Aufbau von Produktionskapazitäten) | Investitionsförderung                     | BMBF                                       | Ab 2030      |
| 106-3      | FeCo-, FeNi-basierte Permanentmagnete | 3         | Erhöhung der Energiedichten                                                | Grundlagenforschung, angewandte Forschung | EU, Hochschule n                           | 2017 - 2025  |
| 106-4      | Nanokomposite                         | 3         | Erhöhung der Energiedichten                                                | Grundlagenforschung, angewandte           | EU, Hochschule                             | 2017 - 2025  |

| Subst.-Nr. | Substitutionsoption | Priorität | Ziel der Maßnahmen          | Maßnahmen                                 | Akteure (wichtigster Akteur fett gedruckt) | Zeithorizont |
|------------|---------------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|
|            |                     |           |                             | <i>Forschung</i>                          | <i>n</i>                                   |              |
| 106-5      | Nanostrukturen      | 3         | Erhöhung der Energiedichten | Grundlagenforschung, angewandte Forschung | EU, Hochschule<br><i>n</i>                 | 2017 - 2025  |

### Begründungen und Erläuterungen zu den Annahmen in der Maßnahmentabelle zu UT Nr. 106:

106-1: Der Ersatz von Dysprosium durch Terbium ist technisch heute schon möglich. Bis zum Jahr 2025 erscheint ein Substitutionspotential in Höhe von 30 % realistisch, bis 2050 wird ein Substitutionspotential von 50 % angenommen. Genau wie Dysprosium erhöht Terbium die Temperaturbeständigkeit, den Korrosionswiderstand und die Koerzitivfeldstärke der Magnete; darüber hinaus reduziert es (anders als Dysprosium) nicht ihre Remanenz. Der Einsatz des einen oder anderen Rohstoffes ist dabei rein wirtschaftlich getrieben.<sup>20</sup> Handlungsbedarfe werden daher nicht gesehen.

106-2: Generatoren auf Basis von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) sind eine vergleichsweise junge Technologielinie, die es potentiell erlaubt, für hohe Leistungsbereiche sehr hohe Wirkungsgrade bei geringem Gondelgewicht zu realisieren. Zwar gibt es einige Demonstrationsprojekte, jedoch ist noch nicht abzusehen, wann HTS-Generatoren in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen könnten. Wichtig wäre zunächst eine Verbesserung der Wirkungsgrade sowie der Zuverlässigkeit der Anlagen insgesamt<sup>21</sup>. Für letzteres sind Entwicklungsanstrengungen nötig, die durch öffentlich geförderte F&E-Programme unterstützt werden müssen, beispielweise mit Blick auf die Errichtung von Pilotanlagen.

Eine Problematik beim Einsatz von HTS-Generatoren stellt die benötigte Kühlung dar. Forschungsanstrengungen zielen auf die Entwicklung von Materialien, die auch bei Temperaturen, die mit flüssigem Stickstoff realisiert werden können, supraleitende Eigenschaften aufweisen. Momentan werden hier Yttrium-Barium-Kupferoxid-Gruppen untersucht. Diese Anstrengungen erfolgen auf der Ebene der Materialforschung. Darauf aufbauend können konkrete Produktentwicklungen anschließen. Für die entwickelten Supraleiter müssten kostengünstige Methoden der Massenfertigung gefunden werden. Ab 2030 könnte eine Investitionsförderung den Aufbau von Produktionskapazitäten unterstützen.

106-3/106-4/106-5: Permanentmagnete lassen sich auch ohne Seltene Erden fertigen; bisher liegen jedoch die erreichbaren Energiedichten deutlich unter denen von NdFeB-basierten Magneten.

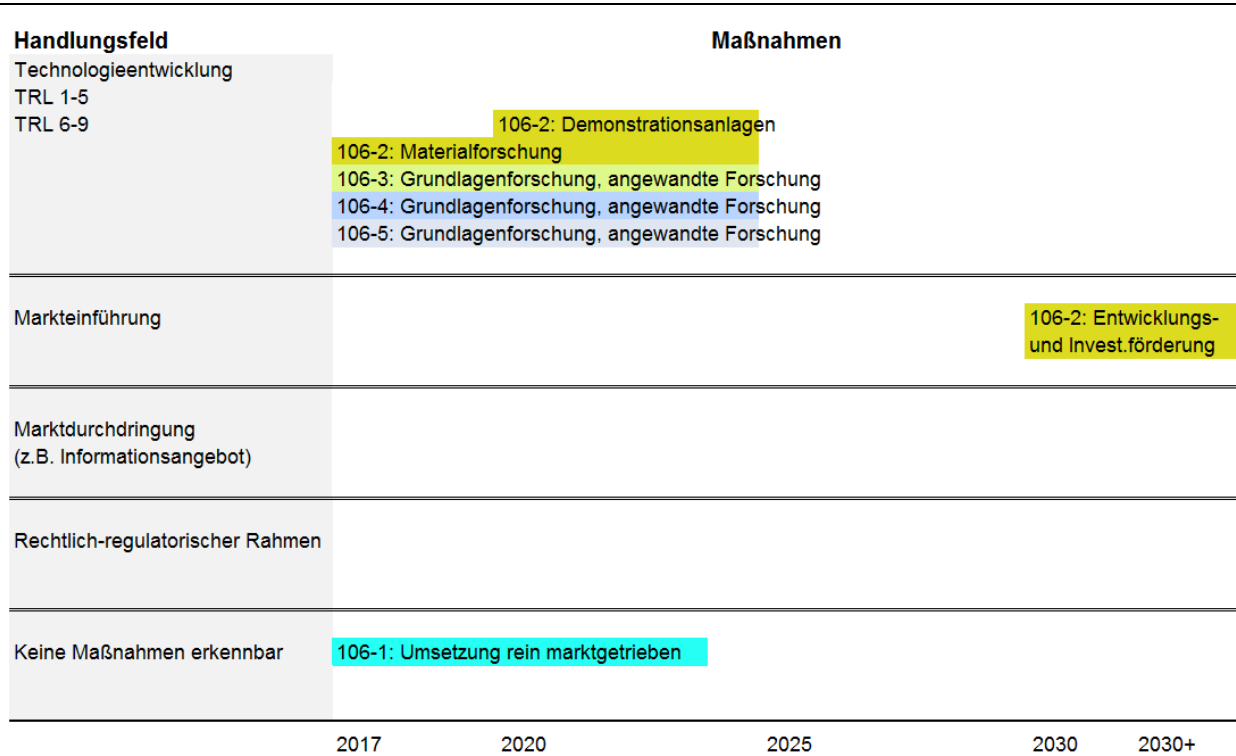
Vielversprechende Ansätze liegen in der Entwicklung von FeCo- oder FeNi-basierte Materialien sowie Nanokompositen und -strukturen. Diese befinden sich noch im Labormaßstab, auch mittelfristig scheinen die Energiedichten von marktüblichen Permanentmagneten nicht erreicht zu werden. Dementsprechend ist die Forschung momentan auf die Suche nach aussichtsreichen Materialkombinationen und der Verbesserungen ihrer magnetischen Eigenschaften auszurichten. Die Fortschritte werden nicht plötzlich, sondern kontinuierlich erreicht, so dass sich mögliche Anwendungsgebiete nach und nach erschließen könnten. Akteure sind im Wesentlichen Universitäten und größere Forschungseinrichtungen, deren Forschung durch nationale und internationale Institutionen gefördert werden müsste.

<sup>20</sup> 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)

<sup>21</sup> Wuppertal Institut 2014: KRESSE – Abschlussbericht, Wuppertal

Da die Unsicherheiten bis 2050 groß sind, konzentrieren sich die Maßnahmen auf den Zeithorizont bis 2025.

Abbildung 2-14: Übersicht der Maßnahmen zu den Substitutionspotentialen der Permanentmagnetgeneratoren in WKA mit Unterscheidung der Handlungsfelder



Quelle: IZT

TRL: Technology Readiness Level = Technologischer Reifegrad

TRL 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) – TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung)

TRL 6 (Prototyp im Einsatzumgebung) – TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes)

Quelle TRL:

[https://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_5502/definition\\_des\\_technologischen\\_reifegrades.pdf](https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_5502/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf)

### Fazit:

Generell erscheint die Substitution von Permanentmagnet-Generatoren in WKA oder die einzelner eingesetzter Materialien kurz- bis mittelfristig schwierig. Eine Ausnahme bildet die Substitution von Dysprosium durch Terbium, die heute schon technisch machbar und allein preisgetrieben ist. Die Entwicklung von Permanentmagneten, die keine Seltenen Erden einsetzen und von HTS-Generatoren ist von Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen abhängig. Für FeCo- und FeNi-basierte Magnete liegen diese im Bereich der Grundlagen- und Materialforschung. Ansatzpunkte bieten vor allem EU-Forschungsprogramme. Kontinuierliche Verbesserungen könnten einzelne Nischenanwendungen erschließen, der breite Einsatz erscheint auch langfristig fraglich.

Noch unsicherer erscheint der Einsatz von Permanentmagneten auf Basis von Nanostrukturen und -kompositen. Auch die hier vergleichsweise noch größeren Grundlagen- und Materialforschungsbedarfe könnten durch EU-Forschungsprogramme gefördert werden.

HTS-Generatoren werden in anderen Anwendungen schon heute eingesetzt. Für den Einsatz in WKA sind zunächst F&E-Anstrengungen nötig. Diese können beispielsweise über die Förderung von Pilotprojekten effektiv durch Programme der Bundesregierung unterstützt werden, die von Windkraftanlagenbauern errichtet werden. Die Materialforschung erfolgt momentan hauptsächlich in

Universitäten. Langfristig wird es darum gehen, die Grundlagenerkenntnisse in konkrete Entwicklungsprojekte zu überführen und Technologien auf den Markt zu bringen.

### 3 Zusammenfassung nach Priorität der Substitutionsalternativen

In den folgenden Abbildungen werden die Maßnahmen nach der Priorität der Substitutionsoptionen strukturiert. Dabei erfolgt die Priorisierung nach dem angenommenen Marktanteil der Substitutionsoptionen in 2025 analog dem abgestimmten Substitutionsszenario in AP 5:

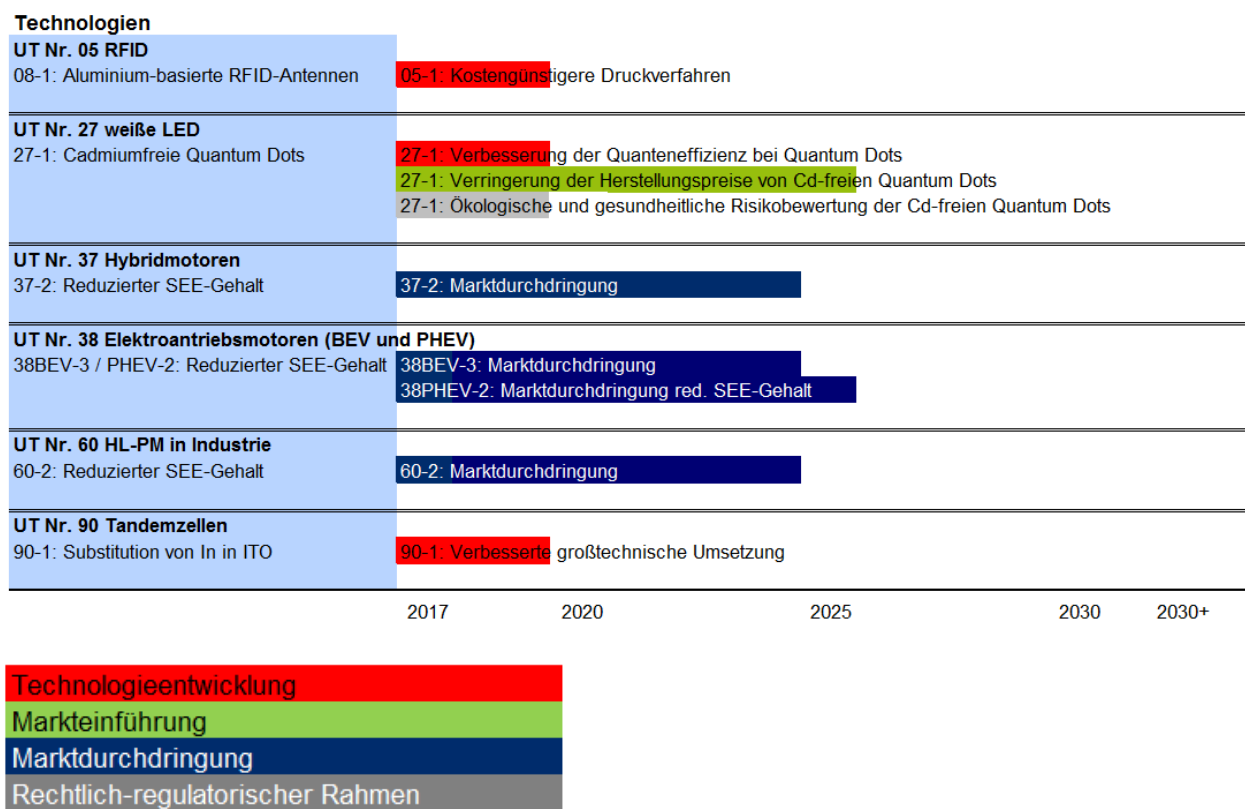
1. Priorität: Marktanteil in 2025 > 15 %
2. Priorität: Marktanteil in 2025 > 5 – 15 %
3. Priorität: Marktanteil in 2025 ≤ 5 %

Für die Substitutionsoptionen der 1. Priorität ist zu erkennen, dass nicht die F&E-Maßnahmen entscheidend sind, sondern die Erhöhung der Marktdurchdringung durch Informationsmaterial und Bewusstseinsbildung im Vordergrund steht. Diese Substitutionsoptionen sind schon sehr weit fortgeschritten in der Entwicklung bzw. bereits in Nischenmärkten auf dem Markt vertreten. Dies gilt z. B. für Substitutionen von weißen LEDs oder Hybrid- bzw. Elektroantriebsmotoren. Sie nehmen im Substitutionsportfolio für 2025 einen relevanten Marktanteil der untersuchten Umwelttechnologie mit 15 % ein.

Bei den Substitutionsoptionen der zweiten Priorität ist die Technologieentwicklung deutlich wichtiger. Diese Substitutionsoptionen sollen die untersuchte Umwelttechnologie in 2025 mit einem Anteil von > 5 – 15 % substituieren. Neben der Marktdurchdringung sind auch Maßnahmen im rechtlich-regulatorischen Rahmen (z. B. bei den weißen OLED) formuliert.

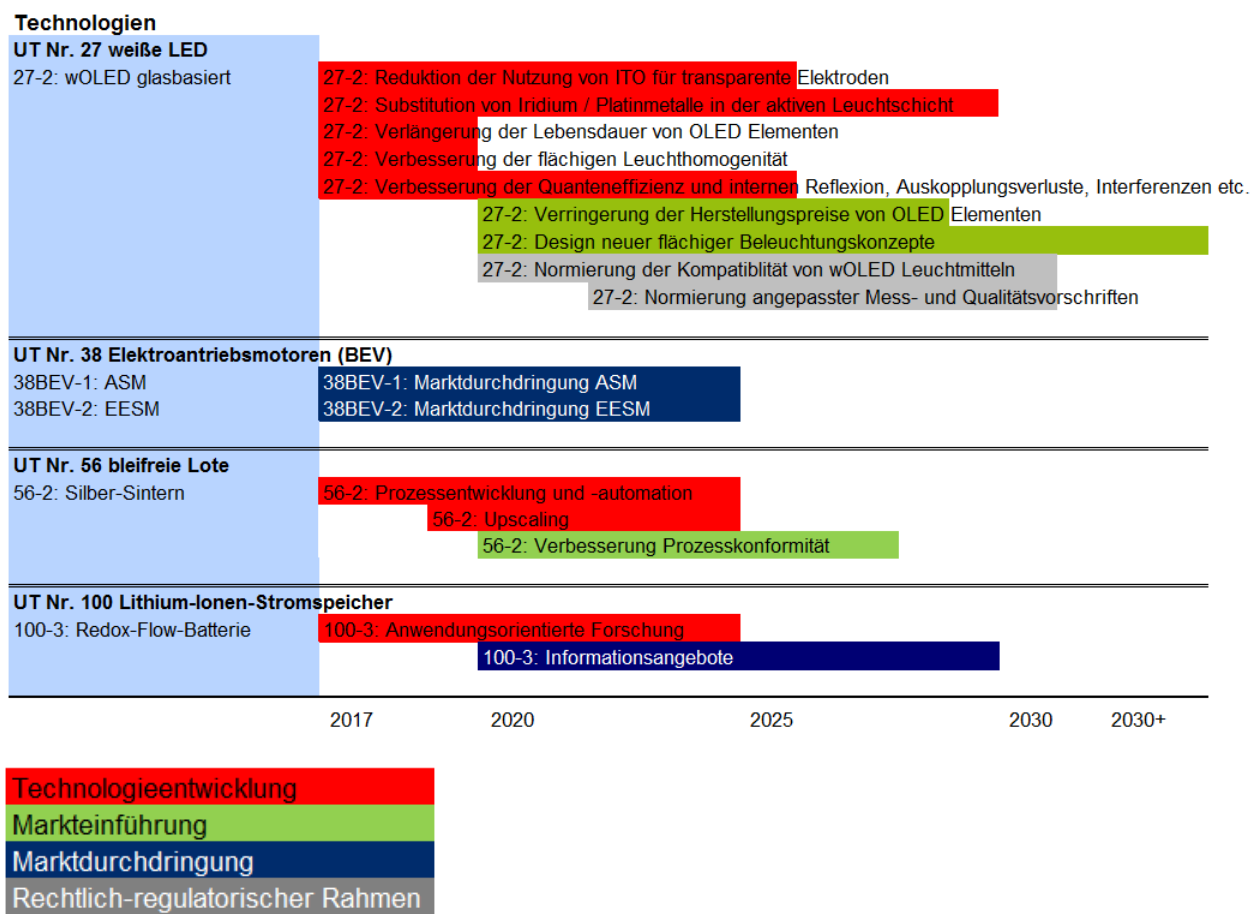
Die größte Anzahl an Substitutionsalternativen fällt in den Bereich der dritten Priorität. Hier liegt der Fokus deutlich auf F&E-Maßnahmen mit nachfolgender Unterstützung in der Markteinführung. Diese Substitutionsalternativen sind unsicherer in ihrem Substitutionspotential (z. B. HTS-Generatoren) oder sind als Technologie bereits ausgereift, aber nur in Nischenmärkten einsetzbar (z. B. Niederspannungsmotor bei den Hochleistungs-Permanentmagneten in der Industrie).

Abbildung 3-1: Übersicht der Substitutionsoptionen der ersten Priorität



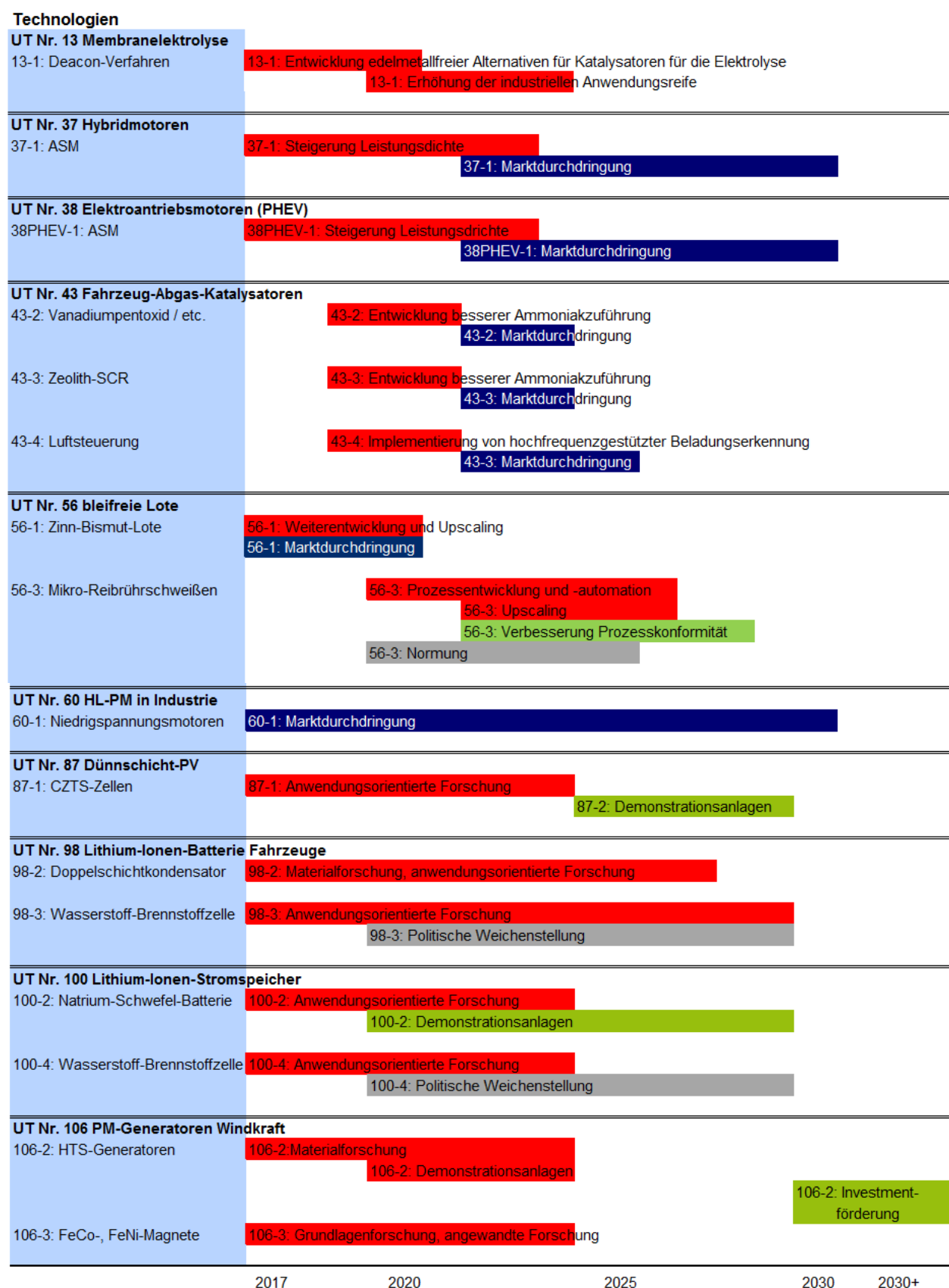
Quelle: Öko-Institut e.V.

Abbildung 3-2: Übersicht der Substitutionsoptionen der zweiten Priorität



Quelle: Öko-Institut e.V.

Abbildung 3-3: Übersicht der Substitutionsoptionen der dritten Priorität



Quelle: Öko-Institut e.V.



TEXTE 03/2019

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 93 316 0  
UBA-FB 002705/ANH,6

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

Arbeitsbericht 6: Substitutions-Roadmap

von

Dr. Matthias Buchert, Stefanie Degreif, Dr. Winfried Bulach  
Öko-Institut e. V., Darmstadt/Freiburg

Dr. Siegfried Behrendt, 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:**

September 2017

**Redaktion:**

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

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2019

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