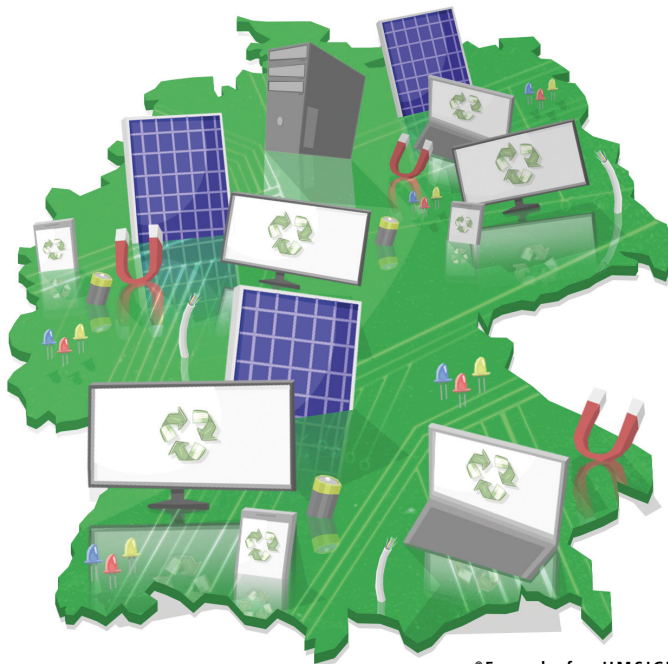


ENDBERICHT KURZSTUDIE

# RECYCLINGPOTENZIAL VON TECHNOLOGIEMETALLEN UND ANDEREN KRITISCHEN ROHSTOFFEN ALS WICHTIGE SÄULE DER ROHSTOFFVERSORGUNG

KURZTITEL: RECYCLINGPOTENZIAL TECHNOLOGIEMETALLE

ASJA MROTZEK-BLÖB | JOCHEN NÜHLEN | HARTMUT PFLAUM | MANUELA RETTWEILER  
STEPHANIE KROOP | KATHARINA REH | MATTHIAS FRANKE



©Fraunhofer UMSICHT

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Oberhausen und Sulzbach-Rosenberg, 14. September 2015

Endbericht Kurzstudie

# RECYCLINGPOTENZIAL VON TECHNOLOGIEMETALLEN UND ANDEREN KRITISCHEN ROHSTOFFEN ALS WICHTIGE SÄULE DER ROHSTOFFVERSORGUNG

Kurztitel: Recyclingpotenzial Technologiemetalle

**Im Auftrag des:** **Bundesministeriums für  
Wirtschaft und Energie (BMWi)**  
Villemombler Straße 76  
53123 Bonn

**Vorgelegt von:** **Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik  
UMSICHT**  
Institutsleiter  
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner  
Osterfelder Straße 3  
46047 Oberhausen

**Institutsteil Sulzbach-  
Rosenberg**  
Leiter des Institutsteils  
Prof. Dr. Andreas Hornung  
An der Maxhütte 1  
92237 Sulzbach-Rosenberg

**Autoren:**

Dr.-Ing. Asja Mrotzek-Blöß\* | Jochen Nühlen | Dr.-Ing. Hartmut Pflaum  
Manuela Rettweiler | Stephanie Kroop | Katharina Reh  
Dr.-Ing. Matthias Franke

*\*Projektleitung*

Stand der Bearbeitung: 14. September 2015

**Bitte zitieren Sie die Studie folgendermaßen:**

Mrotzek-Blöß, A.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Rettweiler, M.; Kroop, S.; Reh, K.; Franke, M.: Recyclingpotenzial von Technologiemetallen und anderen kritischen Rohstoffen als wichtige Säule der Rohstoffversorgung (Recyclingpotenzial Technologiemetalle), Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Kurzstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Oberhausen und Sulzbach-Rosenberg, September 2015

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Hintergrund und Vorgehensweise</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Identifizierung kritischer Rohstoffe</b>	<b>6</b>
2.1	Kritische Rohstoffe für die EU	6
2.2	Wirtschaftliche Bedeutung kritischer Rohstoffe für Deutschland	7
2.2.1	Hintergrund und Methodik	7
2.2.2	Wirtschaftliche Bedeutung ausgewählter Rohstoffe für Deutschland	8
2.2.3	Rohstoffauswahl für die weitere Betrachtung	11
2.3	Zwischenfazit	12
<b>3</b>	<b>Stand der Rückgewinnung</b>	<b>14</b>
3.1	Status quo Recycling	15
3.1.1	Indium (Chemisches Zeichen: In)	15
3.1.2	Germanium (Chemisches Zeichen: Ge)	16
3.1.3	Gallium (Chemisches Zeichen: Ga)	17
3.1.4	Neodym (Chemisches Zeichen: Nd), Dysprosium (Chemisches Zeichen: Dy)	19
3.2	Recyclingpotenziale und Hindernisse	21
<b>4</b>	<b>Stand der Forschung zu Recyclingverfahren</b>	<b>27</b>
4.1	Vorgehen	27
4.2	Literaturrecherche	29
4.3	Patentrecherche	34
4.3.1	Allgemeine Ergebnisse	36
4.3.2	Rohstoffspezifische Ergebnisse »Neodym«	37
4.3.3	Rohstoffspezifische Ergebnisse »Dysprosium«	39
4.3.4	Rohstoffspezifische Ergebnisse »Indium«	40
4.3.5	Rohstoffspezifische Ergebnisse »Germanium«	41
4.3.6	Rohstoffspezifische Ergebnisse »Gallium«	43
4.4	Forschungsprojekte	44
<b>5</b>	<b>Forschungsbedarf</b>	<b>51</b>
5.1	Vorgehensweise und Hintergrund	51
5.2	Forschungslücken bei den betrachteten Elementen	51
5.3	Forschungslücken bei den betrachteten Recyclingverfahren	51
5.4	Forschungslücken nach dem Entwicklungsstand	52
5.5	Hemmnisse auf dem Weg in die praktische Umsetzung	53
<b>6</b>	<b>Überblick über vorhandene Handlungsempfehlungen</b>	<b>54</b>

6.1	Motivation und Vorgehensweise	54
6.2	»Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung« (2002, 2012)	54
6.3	»Rohstoffstrategie der Bundesregierung« (2010)	55
6.4	»Deutsches Ressourceneffizienzprogramm - ProgRes« (2012)	55
6.5	Rohstoffstudien der BGR/DERA	57
6.6	Rohstoffstrategie für Europa	58
6.7	European Rare Earths Competency Network (ERECON)	59
6.8	Internationale Aktivitäten im Bereich der Ressourceneffizienz	59
6.9	Zukunftsbetrachtungen und Innovationspotenzial: Industrie 4.0 - Rohstoffwende	61
6.10	Zusammenfassung vorhandene Handlungsfelder und Handlungsempfehlungen	62
6.11	Rechtliche Entwicklungen mit Einfluss auf das Recyclingpotenzial der betrachteten Technologiemetalle	62
<b>7</b>	<b>Handlungsempfehlungen</b>	<b>66</b>
7.1	Handlungsempfehlung 1	68
7.2	Handlungsempfehlung 2	69
7.3	Handlungsempfehlung 3	70
7.4	Handlungsempfehlung 4	72
7.5	Handlungsempfehlung 5	74
7.6	Handlungsempfehlung 6	75
7.7	Handlungsempfehlung 7	77
7.8	Handlungsempfehlung 8	79
7.9	Handlungsempfehlung 9	80
<b>8</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>82</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>90</b>
<b>10</b>	<b>Bildverzeichnis</b>	<b>91</b>
<b>11</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>93</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b>	<b>95</b>
12.1	Steckbrief Indium (Chemisches Zeichen: In)	95
12.2	Steckbrief Germanium (Chemisches Zeichen: Ge)	97
12.3	Steckbrief Gallium (Chemisches Zeichen: Ga)	99
12.4	Steckbrief Neodym (Chemisches Zeichen: Nd)	101
12.5	Steckbrief Dysprosium (Chemisches Zeichen: Dy)	104
12.6	Liste der durchgeführten Experteninterviews	106

# 1 Hintergrund und Vorgehensweise

Ziel des Vorhabens ist die Analyse bestehender Recyclingstrategien und Rückgewinnungsverfahren für relevante Technologiemetalle in Deutschland sowie die Identifizierung etwaiger Hemmnisse in technologischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Hinsicht. Durch die Analyse sollen ungenutzte Recyclingpotenziale aufgedeckt und Gründe für etwaige ungenutzte Potenziale herausgearbeitet werden. Darauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen entwickelt und hinsichtlich ihrer Umsetzung bewertet bzw. konkretisiert.

Sowohl auf politischer, privatwirtschaftlicher und Verbandsebene sowie von Seiten der Forschungslandschaft wird auf Versorgungsrisiken im Bereich der wirtschaftsstrategischen Rohstoffe und Technologiemetalle reagiert. Die Bundesregierung hat mit der im Oktober 2010 veröffentlichten Rohstoffstrategie und dem 2012 verabschiedeten Ressourceneffizienzprogramm »ProgRes« Rahmenbedingungen für eine sichere Versorgung der heimischen Industrie im Bereich nicht-energetischer mineralischer Rohstoffe initiiert, um auf die Entwicklungen des internationalen Rohstoffmarktes zu reagieren. Im Zuge dessen sind im Rahmen der laufenden Programme der Ressortforschung, insbesondere bei BMWi, BMUB, BMBF und dem BMVI mehrere Förderausschreibungen mit dem Fokus auf Grundlagen als auch industrienaher angewandter Forschung zu vielfältigen Rohstoffthemen initiiert worden. Die Projekte der ersten Forschungsausschreibungen sind abgeschlossen oder befinden sich in der Projektabschlussphase. Parallel zu den genannten Forschungsaktivitäten wurden verschiedene Gremien, Initiativen, Netzwerke und Plattformen auf nationaler und europäischer Ebene ins Leben gerufen. Hier sind insbesondere die European Innovation Partnership Raw Materials, die Europäische Plattform für Ressourceneffizienz (EREP), die Deutsche Rohstoffagentur (DERA), die Deutsche Materialeffizienzagentur (demea), das VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE), das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) oder das EIT KIC Raw Materials RawMatTERS zu nennen.

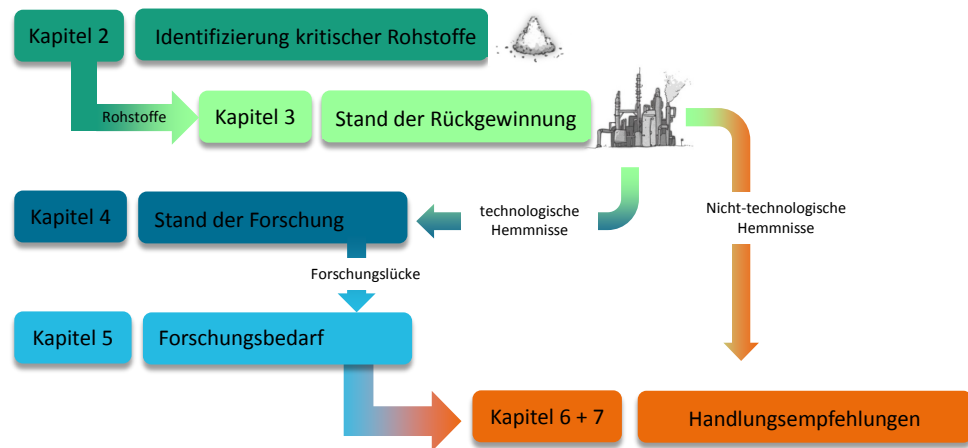
Die Entscheidungsträger stehen nun vor der Herausforderung, die bisherigen Erkenntnisse dieser Initiativen zu bewerten und diese in neue Strategien und Handlungsempfehlungen einzuarbeiten.

Die für Deutschland als kritisch identifizierten Rohstoffe (Kapitel 2) bilden die Basis der Kurzstudie. Aufbauend auf der getroffenen Rohstoffauswahl werden der aktuelle Stand der Rückgewinnungstechnik und bekannte technologische und nicht-technologische Hemmnisse eines Ausbaus dieser Technik (Kapitel 3) zusammengetragen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Erfassung bekannter technologischer Lösungen. Erhobene technologische Hemmnisse bilden wiederum die Grundlage für die Ermittlung zukünftiger Forschungsaktivitäten. Aus der Recherche zum Stand der Forschung (Kapitel 4) folgt die Ermittlung des zukünftigen Forschungsbedarfs im Bereich der ressourceneffizienten Rückgewinnung kritischer Rohstoffe (Kapitel 5) und die Ableitung von Instrumenten zur Verbesserung der Forschungslage. Abschließend werden die

Ergebnisse vor dem Hintergrund bestehender Strategien und Entwicklungen zu Handlungsempfehlungen aufbereitet und konzentriert (Kapitel 6).

Projektkonzept und Vorgehen sind zusammenfassend in Bild 1-1 gezeigt.

Bild 1-1:  
Projektstruktur und  
Vorgehen



Folgende Bearbeitungsgrundlagen wurden für die Erstellung der Studie verwendet:

- Wissenschaftliche Recherchearbeiten (Internet, Firmendatenbanken, Statistiken, Studien und Veröffentlichungen, Literatur- und Patentdatenbanken)
- Fachkontakte zu Unternehmen der Sekundär- und Primärrohstoffwirtschaft, der Kreislaufwirtschaft und des Recyclings
- Mit dem Auftraggeber abgestimmte Gespräche mit externen Fachkontakten (persönliche und telefonische Experteninterviews)
- Institutsinternes Know-how zu Aufbereitungs- und Recyclingtechnik sowie Werkstoffeinsatz

Wir möchten uns bei allen Gesprächspartnern für die sehr interessanten und konstruktiven Gespräche bedanken.

- Dr. Albrecht Melber, Accurec Recycling GmbH
- Harald Fischer, Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. Kommanditgesellschaft
- Ulrike Dorner, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)
- Dipl.-Geol. Dr. Harald Elsner, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)
- Dr. Martin Schmitz, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)
- Dr. Ulrich Schwarz-Schampera, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)
- Maik Bergamos, ELPRO Elektronik-Produkt Recycling GmbH

- Prof. Dr. Daniel Goldmann, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal
- Jochen Schiemann, Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.
- Marek Bartosinski, Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling RWTH Aachen
- Michael Schäfer, Metallverarbeitungsgesellschaft mbH
- Dr. Gunter Daub, ppm pure metals
- Christian Duwe, REWIMET Recycling-Cluster wirtschaftsstrategischer Metalle Niedersachsen e.V.
- Dr. Christina Meskers, Umicore Precious Metals Refining
- Marcel Picard, Umicore AG & Co. KG
- Rolf Blank, VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG

Die vorliegende Kurzstudie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) erstellt. Wesentliche Zwischenergebnisse wurden mit dem Auftraggeber und von ihm benannten Ansprechpartnern der DERA/BGR diskutiert. Der Bearbeitungszeitraum der Kurzstudie betrug insgesamt vier Monate (18. Mai 2015 - 21. September 2015). Die Ergebnisse der Studie werden im Rahmen des BMWi/BDI-Workshops »Recyclingpotenzial von Technologiemetallen und anderen kritischen Rohstoffen als wichtige Säule der Rohstoffversorgung« am 21. September 2015 in Berlin vorgestellt.

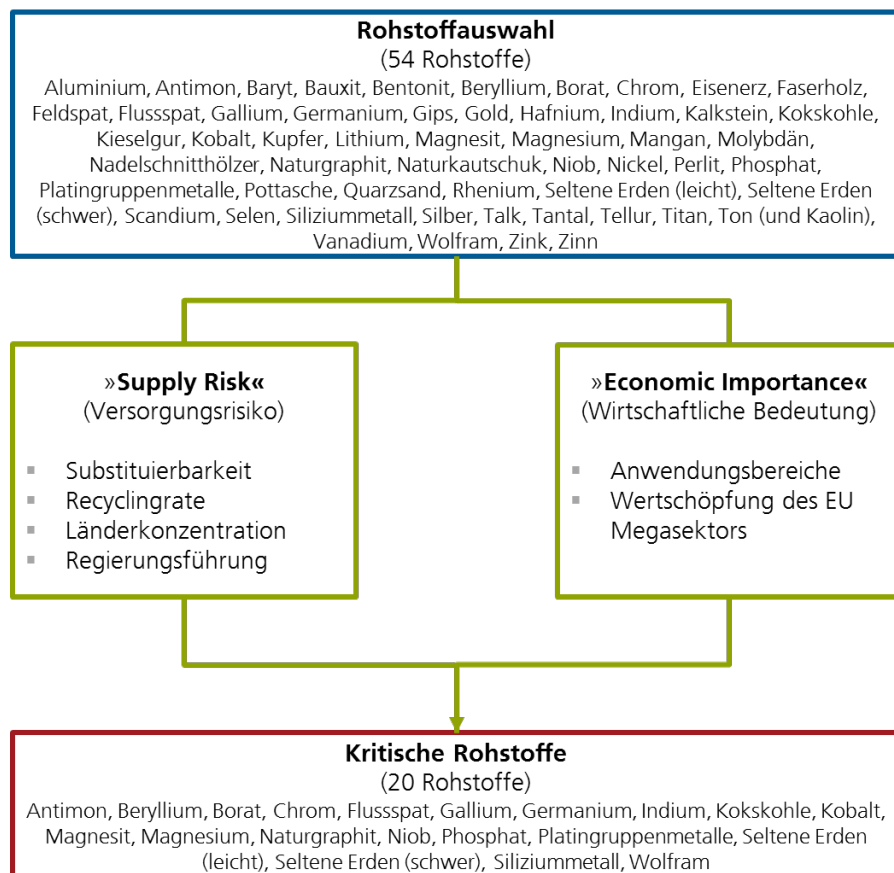
## 2 Identifizierung kritischer Rohstoffe

### 2.1 Kritische Rohstoffe für die EU

Im Juni 2010 wurde erstmals ein Bericht der europäischen »Ad-hoc-Arbeitsgruppe zur Definition kritischer Rohstoffe« vorgelegt, die sich mit der Kritikalität metallischer und mineralischer Primärrohstoffe für die EU auseinandergesetzt hat. Die Bewertung wurde im Jahr 2014 aktualisiert. Demnach sind aktuell zwanzig Rohstoffe für die Versorgung der europäischen Wirtschaft als kritisch einzustufen [EC-2014]<sup>1</sup>.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde als Basis für die Identifizierung kritischer Rohstoffe für Deutschland die von Seiten der Europäischen Kommission vorgenommene Kritikalitätseinstufung herangezogen. Die durch die Arbeitsgruppe vorgenommene Bewertung erfolgte anhand der in Bild 2-1 genannten Kriterien »Supply Risk« (Versorgungsrisiko) sowie »Economic Importance« (wirtschaftliche Bedeutung) und wurde für 54 vorausgewählte Rohstoffe angewendet. Dabei handelte es sich um nichtenergetische, nichtlandwirtschaftliche, abiotische und biotische Rohstoffe, deren Bedeutung für die EU als besonders wichtig erachtet wurde [EC-2014].

Bild 2-1:  
Methodik und Ergebnis  
der Kritikalitäts-  
bewertung der EU,  
eigene Darstellung,  
nach [EC-2014]



<sup>1</sup> Aktualisierte Fassung der 2010 veröffentlichten Ausgangsstudie [EC-2010]



Das Kriterium »Supply Risk« (im Weiteren Versorgungsrisiko genannt) beinhaltet dabei eine aggregierte Bewertung der regionalen Konzentration von Rohstoffvorkommen, der politischen und wirtschaftlichen Stabilität der wichtigsten Förderländer sowie der Substituierbarkeit und Recyclingrate der einzelnen Rohstoffe. Die »Economic Importance« eines Rohstoffes (im Weiteren als wirtschaftliche Bedeutung aufgeführt) wird anhand der Wertschöpfung in diversen Wirtschaftssektoren (Megasektoren), gewichtet nach dem Anteil der Verwendung eines bestimmten Rohstoffs im jeweiligen Wirtschaftssektor, bemessen.

Auf Basis dieser Bewertungsgrundlage wurden die nachfolgend aufgelisteten 20 Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen (PGM<sup>2</sup>, SSE<sup>3</sup>, LSE<sup>4</sup>) für die EU als kritisch eingestuft [EC-2014].

- Antimon
- Beryllium
- Borat
- Chrom
- Flussspat
- Gallium
- Germanium
- Indium
- Kobalt
- Kokskohle
- Magnesit
- Magnesium
- Naturgraphit
- Niob
- Platingruppenmetalle (PGM)
- Phosphat
- Leichte Seltene Erden (LSE)<sup>5</sup>
- Schwere Seltene Erden (SSE)<sup>6</sup>
- Silizium
- Wolfram

## 2.2 Wirtschaftliche Bedeutung kritischer Rohstoffe für Deutschland

### 2.2.1 Hintergrund und Methodik

Eine Bewertung der Bedeutung von Rohstoffen für den Wirtschaftsstandort Deutschland wurde bereits in mehreren Untersuchungen mit jeweils speziellen Zielstellungen vorgenommen. In diesem Zusammenhang sind unter anderem folgende vorliegenden Studien zur Kritikalitätsbewertung zu nennen:

- »Kritische Rohstoffe für Deutschland« [IZT-2011]
- »Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems« [KRESSE-2014]
- »Rohstoffe für Zukunftstechnologien« [IZT/ISI-2009]
- »Deutschland – Rohstoffsituation 2013« [DERA-2013]

<sup>2</sup> PGM: Platingruppenmetalle

<sup>3</sup> SSE: Schwere Seltene Erden

<sup>4</sup> LSE: Leichte Seltene Erden

<sup>5</sup> Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Samarium

<sup>6</sup> Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Erbium, Yttrium, Holmium, Thulium, Ytterbium, Lutetium

Für eine umfassende Bewertung von kritischen Rohstoffen für den Wirtschaftsstandort Deutschland ausgehend von den bestehenden Untersuchungen wurden zunächst die Kritikalitätseinstufungen und die für die Bewertung herangezogenen Kriterien der einzelnen Studien gegenübergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen thematischen Fokussierung der jeweiligen Studien, z. B. auf Zukunftstechnologien oder Technologien für die Energiewende zeichneten sich bei der Studienauswertung Unterschiede im Hinblick auf die betrachteten Rohstoffe bzw. die gewählten Bewertungskriterien und Indikatoren ab. Des Weiteren wurden in den Studien vorwiegend globale Versorgungsrisiken bzw. technologiebedingte Nachfrageimpulse betrachtet. Zwar wurden in einzelnen Studien darüber hinaus noch der Anteil Deutschlands am Weltverbrauch und entsprechende Importdaten betrachtet, eine direkte Ableitung der wirtschaftlichen Bedeutung aller 20 im Rahmen der vorliegenden Studie zu betrachtenden Rohstoffe war anhand dieser vorhandenen Daten jedoch nicht durchgängig möglich.

Um zu bewerten, welche Rohstoffe im Speziellen für den Wirtschaftsstandort Deutschland kritisch sind, wurde daher ein Vorgehen gewählt, das sich stark an der Methodik der Bewertung auf EU-Ebene orientiert. So wurde zum einen das Versorgungsrisiko der einzelnen Rohstoffe berücksichtigt, welches die regionale Konzentration von Rohstoffvorkommen, die politische und wirtschaftliche Stabilität der wichtigsten Förderländer sowie die Substituierbarkeit und Recyclingrate der einzelnen Rohstoffe beinhaltet. Die Bewertung der Rohstoffe hinsichtlich des Versorgungsrisikos kann für Deutschland [EC-2014] übernommen werden, da hier innerhalb Europas keine länderspezifischen Unterschiede bestehen. In Analogie zur Studie der Europäischen Kommission [EC-2014] ist das potenzielle Versorgungsrisiko der einzelnen Rohstoffe deren wirtschaftlicher Bedeutung gegenüberzustellen. Die Vorgehensweise zur Beurteilung der wirtschaftlichen Bedeutung für Deutschland orientiert sich wiederum ebenfalls an der in [EC-2014] beschriebenen Vorgehensweise. Die Betrachtung wurde für die 20 auf EU-Ebene als kritisch identifizierten Rohstoffe durchgeführt und wird nachfolgend beschrieben.

### **2.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung ausgewählter Rohstoffe für Deutschland**

Für die Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung wurde zunächst festgehalten, zu welchem Anteil ein Rohstoff in einen bestimmten Anwendungsbereich fließt. So werden beispielsweise 54 % der globalen Siliziummetall-Verbräuche für die Herstellung von Silikonen für Form- und Dichtungsmaterialien bzw. die Produktion von Farben und Lacken verwendet. Weitere 38 % finden in Form von Legierungen, wie etwa bei der Veredelung von Aluminium, Anwendung. Die verbleibenden 8 % fließen in die Herstellung von Halbleitern, Mikrochips oder Solarzellen [EC-2014]. Im nächsten Schritt wurde ermittelt, welchen Branchen diese spezifischen Anwendungsgebiete zuzuordnen sind. Während die Berechnungssystematik der EU-Studie eine Zuordnung zu übergeordneten »Megasektoren« vorsieht, die teilweise verschiedene Wirtschaftszweige oder Teile davon zusammenfassen, wurden die Anwendungen in der vorliegenden Studie den Wirtschaftszweigen gemäß der für Deutschland geltenden »Klassifikation der Wirtschaftszweige« [Destatis-2008] zugeordnet.

Somit ergäbe sich für Silizium unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Anwendungsgebiete eine Zuordnung zu folgenden Wirtschaftszweigen (WZ):

- Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ 20)
- Metallerzeugung und Metallbearbeitung (WZ 24)
- Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen (WZ 26)

Abschließend wurde betrachtet, welche Bruttowertschöpfung (BWS) die jeweiligen Wirtschaftszweige (WZ) im Jahr 2012<sup>7</sup> generierten. Hierfür wurden die Daten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung [Destatis-2015] herangezogen. Die verschiedenen Ausgangsdaten, die für die Ermittlung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes für Deutschland notwendig sind, sind in Tabelle 2-1 für das Beispiel Siliziummetall zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2-1: Darstellung der Ausgangsdaten für die Ermittlung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes am Beispiel Silizium [EC-2014]

Anwendungsgebiet	Anteil in %	WZ	Bezeichnung WZ	BWS des WZ in Mrd. Euro (2012)
Silikone für Form- und Dichtungsmaterialien, Lacke und Farben	54	20	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	40,29
Legierungen (z. B. Veredlung von Aluminium)	38	24	Metallerzeugung und Metallbearbeitung	21,19
Halbleiter, Mikrochips, Solarzellen	8	26	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen	31,67

Die in Tabelle 2-1 für den Rohstoff Silizium exemplarisch dargestellten Ausgangsdaten wurden in gleicher Weise für jeden der 20 nach [EC-2014] als kritisch eingestuft Rohstoffe zusammengestellt. Anhand der nachfolgend dargestellten Formel, die sich ebenfalls an der in der EU-Studie [EC-2014] verwendeten Berechnungsformel orientiert, wurde anschließend die wirtschaftliche Bedeutung der Rohstoffe für Deutschland ermittelt.

<sup>7</sup> Zum Zeitpunkt der Bearbeitung lagen für die Jahre 2013 bzw. 2014 noch keine Daten zur Bruttowertschöpfung der relevanten Wirtschaftszweige vor.

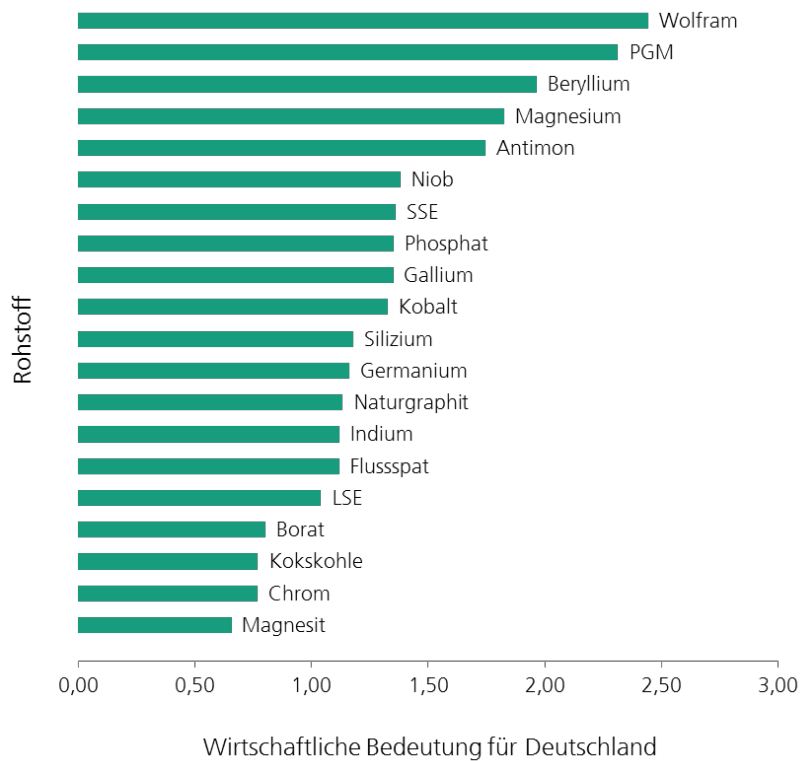
Formel 2-1:  
Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes für Deutschland, in Anlehnung an [EC-2014]

$$WB_s = \frac{1}{BIP} \times \sum_s A_{is} Q_s$$

- WB<sub>s</sub>: Wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes für Deutschland
- BIP: Bruttoinlandsprodukt Deutschland in Mrd. Euro (2012)
- A<sub>is</sub>: Prozentualer Anteil der Verwendung in einer Branche
- Q<sub>s</sub>: Bruttowertschöpfung der Branche in Mrd. Euro (2012)

Auf Basis des zuvor beschriebenen Berechnungsmodells ergibt sich eine dimensionslose Kennzahl zwischen 0 und 3, die einen Anhaltswert dafür gibt, welche Wirtschaftsleistung aus den unterschiedlichen Anwendungsbereichen der Rohstoffe resultiert. In Bild 2-2 sind die Berechnungsergebnisse für die jeweiligen Rohstoffe dargestellt, die insbesondere für Wolfram, PGM, Beryllium, Magnesium und Antimon die höchste wirtschaftliche Bedeutung aufweisen.

Bild 2-2:  
Wirtschaftliche Bedeutung der Rohstoffe für Deutschland, eigene Berechnungen

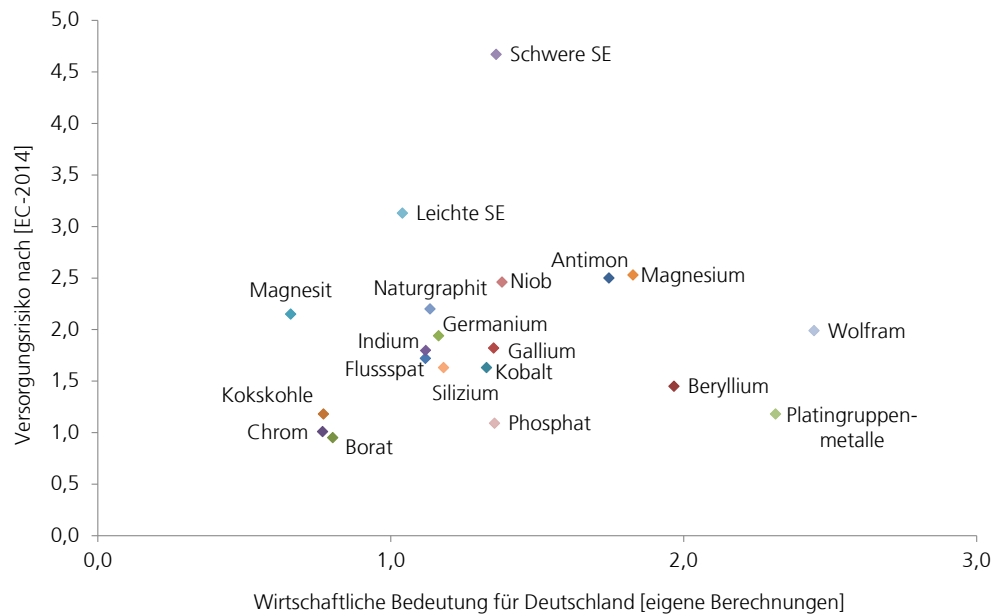


Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die prozentuale Zuordnung zu Anwendungsgebieten (vgl. auch Tabelle 2-1) in der Regel auf globale Verbrauchs- bzw. Verwendungsmengen bezieht, die nicht zwangsläufig auch die Bedarfssituation in Deutschland widerspiegeln. Für eine spezifischere Betrachtung wäre es notwendig zu untersuchen, welchen Bedarf an relevanten Rohstoffen die deutschen Industrieunternehmen tatsächlich haben und wie sich diese Bedarfe auf die verschiedenen Anwendungsgebiete und Wirtschaftszweige verteilen. Gerade in Bezug auf diese Aspekte ist die Datenverfügbarkeit derzeit allerdings noch als mangelhaft einzustufen (vgl. auch Kapitel 2.2.1).

### 2.2.3 Rohstoffauswahl für die weitere Betrachtung

Entsprechend der in [EC-2014] gewählten Methodik wurden die Bewertungsergebnisse der wirtschaftlichen Bedeutung dem Versorgungsrisiko aus [EC-2014] gegenübergestellt (vgl. Bild 2-3). Ausgehend von dieser Darstellung wurden die zwanzig betrachteten Rohstoffe danach zum Zweck einer nachfolgenden detaillierteren Betrachtung auf fünf ausgewählte Rohstoffe eingezengt.

Bild 2-3:  
Gegenüberstellung des Versorgungsrisikos [EC-2014] und der wirtschaftlichen Bedeutung der Rohstoffe für Deutschland, eigene Berechnung



Bei der Gegenüberstellung wird deutlich, dass insbesondere die Rohstoffgruppe der Seltenen Erden (LSE, SSE) das höchste Versorgungsrisiko aufweist und Beryllium, Platingruppenmetalle und Wolfram die größte wirtschaftliche Bedeutung besitzen.

Des Weiteren sollte für die Auswahl der weiter zu betrachtenden Rohstoffe berücksichtigt werden, für welche Rohstoffe die zu erwartenden Recyclingpotenziale am höchsten bzw. der derzeitige Stand des Recyclings noch als defizitär einzuschätzen ist. So ist für einige Rohstoffe, deren wirtschaftliche Bedeutung hoch ist, das Recycling bereits als gut etabliert und die allgemeine Versorgungssituation als weitgehend unkritisch einzuschätzen (z. B. PGM, Magnesium), während sich die Situation für Rohstoffe mit geringerer wirtschaftlicher Bedeutung (z. B. Gallium, Germanium, Indium) bezüglich des Standes des Recyclings kritischer darstellt. Zudem besteht insbesondere für diese Rohstoffe aktuell noch ein hoher Informationsbedarf zum derzeitigen Stand des Recyclings.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass einige der betrachteten Rohstoffe, wie beispielsweise Germanium oder Indium, vorrangig als Nebenprodukt von Hauptmetallen gewonnen werden. Infolge dieser Koppelproduktion kann eine strukturell bedingte Ressourcenknappheit entstehen [Hagelücken-2013]. Der relevante Rohstoff fällt bei der Förderung eines Hauptmetalls lediglich als Nebenprodukt an und kann erst durch einen notwendigen Zwischenschritt wirtschaftlich abgebaut werden [Achzet-2012]. Dies ist insofern problematisch, da das

globale Angebot des Koppelprodukts vom Bergbau der Hauptmetalle abhängt [Hagelüken-2013]. Umgekehrt bedeutet dies, dass bei einer sprunghaft gestiegenen Nachfrage für einen Rohstoff, der in Koppelproduktion gewonnen wird, ein zeitnaher Förderungsanstieg des Hauptmetalls notwendig wird und die damit verbundenen Absatzmöglichkeiten gegeben sein müssen.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Ermittlung der wirtschaftlichen Bedeutung für Deutschland aufgrund der nur global verfügbaren Aufteilung auf Anwendungsgebiete einen Rohstoff gegebenenfalls in seiner Bedeutung für Deutschland »überbewertet«. So wäre es möglich, dass global betrachtet große Mengen eines Rohstoffes in ein Anwendungsgebiet fließen, das in Deutschland unter Umständen nur von untergeordneter Bedeutung ist (vgl. auch 2.2). Aus diesem Grund sollte ein nachweislich breites Anwendungsspektrum in Deutschland als weiterer Aspekt in die Rohstoffauswahl einbezogen werden.

Abschließend wurden unter Berücksichtigung des Versorgungsrisikos sowie der Einschätzung zum derzeitigen Stand des Recyclings in Abstimmung mit dem Auftraggeber folgende Rohstoffe<sup>8</sup> ausgewählt:

- **Gallium**,
- **Germanium** und
- **Indium** sowie
- **Neodym** und **Dysprosium** als Vertreter der Leichten bzw. Schweren Seltenen Erden.

### 2.3 Zwischenfazit

Eine Abschätzung, wie kritisch die Versorgungslage der deutschen Wirtschaft für die 20 untersuchten Rohstoffe tatsächlich ist, ist auf Basis der derzeit zur Verfügung stehenden Daten nur eingeschränkt möglich. Einerseits existieren zahlreiche, über die im Versorgungsrisiko der EU-Studie aggregierten Parameter hinausgehenden, Faktoren, die die Verfügbarkeit eines Rohstoffes beeinflussen. Hierzu zählen auch Marktmechanismen wie durch globale Nachfrageimpulse bedingte Preisanstiege oder eine protektionistische Handelspolitik einzelner Förderländer. Diese heterogene und gleichzeitig dynamische Datenlage erfordert ein kontinuierliches Monitoring der Rohstoffmärkte und erschwert in gleichem Maße Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Märkte, da gerade auch unerwartete geopolitische Entwicklungen abrupte Änderungen der Versorgungslage zur Folge haben können. Eine vergleichende Betrachtung zwischen [EC-2010] und [EC-2014] zeigt, dass ein Großteil der im Jahr 2010 als kritisch eingestuft Rohstoffe auch für das Jahr 2013 als kritisch erachtet wird. Lediglich Tantal wurde nicht mehr als kritisch eingestuft. Hingegen werden in [EC-2014] zusätzlich zu den in [EC-2010] identifizierten Rohstoffen mit Borat, Chrom, Magnesit, Kokskohle, Phosphat und Silizium weitere sechs Rohstoffe als kritisch eingeschätzt<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> Teilweise werden andere - möglicherweise ebenfalls strategische - Rohstoffe in gerade laufenden Studien untersucht, deren Ergebnisse aber noch nicht vorliegen.

<sup>9</sup> Kokskohle, Phosphat und Silizium waren in [EC-2010] nicht in dem Rohstoff-Pool enthalten.

Andererseits erschwert eine global betrachtete Zuordnung von Rohstoffverbräuchen zu den jeweiligen Anwendungsgebieten die spezifische Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung für Deutschland. An dieser Stelle wären detaillierte Stoffstromanalysen für ausgewählte Rohstoffe notwendig, die den spezifischen Bedarf bzw. Verbrauch der einzelnen Industriezweige abbilden. Eine reine Betrachtung von Rohstoffimporten nach Deutschland würde dabei zu kurz greifen. Berücksichtigt man die Güterimporte nach Deutschland nach Verarbeitungsgrad so wird deutlich, dass im Jahr 2010 rund 323 Mio. t Rohstoffe, 127 Mio. t Halbwaren sowie 140 Mio. t Fertigwaren eingeführt wurden. Der Import an Fertigwaren stieg zudem seit 1994 zum Teil stark an [UBA-2013]. Demzufolge müssten auch Halb- und Fertigwaren, die relevante Rohstoffe enthalten, mit in eine Deutschland-spezifische Bedarfsanalyse einbezogen werden. Kenntnisse über die tatsächliche Materialzusammensetzung der entsprechenden Halb- und Fertigwaren, die nach Deutschland importiert und oftmals nur endmontiert werden, aber dennoch eine Wertschöpfung im Land erzielen, sind kaum vorhanden bzw. nicht öffentlich zugänglich. Zudem sind teilweise auch relevante Daten, die Aufschluss über den Rohstoffbedarf geben könnten, aus Geheimhaltungsgründen gesperrt oder werden nur gruppiert angegeben (z. B. Seltenerdmetalle, Scandium und Yttrium, untereinander gemischt oder miteinander legiert). Erst wenn alle notwendigen Daten zu Bedarf und Verbrauch in den jeweiligen Industriezweigen vorlägen, wäre es für die einzelnen Rohstoffe möglich, eine Risiko-Matrix zu erstellen, auf der die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versorgungsrisikos einem zu erwartenden volkswirtschaftlichen Schaden im Falle eines Versorgungsengpasses gegenübergestellt werden könnte.

#### **Fazit 1 »Rohstoffauswahl für die weitere Betrachtung«**

Nach Auswertung der in AP 1 generierten Ergebnisse wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber folgende Rohstoffe für die weitere Betrachtung ausgewählt:

- Indium (Chemisches Zeichen: In)
- Germanium (Chemisches Zeichen: Ge)
- Gallium (Chemisches Zeichen: Ga)
- Neodym (Chemisches Zeichen: Nd)
- Dysprosium (Chemisches Zeichen: Dy)

#### **Problemfeld 1 »Datengrundlage für Stoffstromanalyse«**

Eine Deutschland-spezifische Bedarfsanalyse relevanter Rohstoffe und eine Zuordnung zu entsprechenden Wirtschaftszweigen sind auf Basis der derzeitigen Datenlage nicht möglich. Ursachen hierfür sind

- Geheimhaltungsbedingte Datenlücken bei Rohstoffimporten
- Unspezifische, aggregierte Daten zu Rohstoffimporten (aufgrund gruppiertes Darstellung nicht Element-spezifisch auswertbar )
- Mangelnde Kenntnis über die Materialzusammensetzung importierter Halb- und Fertigwaren
- Geheimhaltungsbedingte Datenlücken bei Produktionsstatistiken

### 3 Stand der Rückgewinnung

In den nachfolgenden Kapiteln werden für die fünf ausgewählten Rohstoffe der Status quo des Recyclings sowie bestehende Hindernisse bei der Rückgewinnung der betreffenden Rohstoffe dargestellt. Um zu berücksichtigen, welche Abfallströme für das Recycling des jeweiligen Rohstoffes relevant sein könnten, werden auch kurz die jeweiligen Anwendungsgebiete des Rohstoffes dargestellt.

Bei der Analyse des Status quo der Recyclingverfahren wird unterschieden, ob es sich um Verfahren handelt, die bereits Marktreife erreicht haben, oder ob sich diese noch im Entwicklungsstadium befinden. Zusätzlich werden auch die einschlägigen, von Seiten des International Resource Panel des UNEP verwendeten, Kenngrößen wie die End-of-Life-Recyclingrate (EoL-RR) oder Recyclingquote, der Recyclinganteil (RA) und der Schrottanteil (OSR<sup>10</sup>) berücksichtigt. Diese dienen dazu, das Recycling von Industrierohstoffen mess- und vergleichbar zu machen.

Die End-of-Life-Recyclingrate (EoL-RR) bezeichnet dabei den prozentualen Anteil an Rohstoffen, die als Abfall gesammelt und dem Recycling zugeführt werden. Hierbei sind Verluste mit eingeschlossen [UNEP-2011], [DERA-2011]. Der Recyclinganteil (engl. recycled content) bezeichnet den Anteil an recyceltem Metall in der globalen Metallherstellung [UNEP-2011]. Der Recyclinganteil liegt immer dann deutlich unter der Recyclingquote, wenn bei steigendem Metallbedarf (Marktwachstum) und langer Lebensdauer (z. B. Metalle, Mineralien) mehr Primärmaterial eingesetzt werden muss als durch das Recycling aus Altschrott und verunreinigtem Produktionsabfall zur Verfügung gestellt wird [Rombach-2011]. Der Schrottanteil verweist auf den Anteil an Abfallmetallen aus dem Endverbrauch im gesamten Abfallaufkommen. Diese sind nicht zu verwechseln mit Produktionsabfällen, wodurch neu produzierte Metalle dem Recycling zugeführt werden [UNEP-2011].

Darüber hinaus wurde betrachtet, welche Bedeutung das Recycling für Deutschland hat und auf welchen Stufen der Wertschöpfungskette nachgewiesenermaßen Rohstoffverluste entstehen bzw. in welchen Bereichen Verluste vermutet werden, die jedoch aufgrund einer lückenhaften Datenlage nicht abgeschätzt werden können. Abschließend werden spezifische Hindernisse erörtert, die den jeweiligen Recyclingprozessen entgegenstehen. Hierfür wurden technologische, organisatorische und auch ökonomische Aspekte berücksichtigt.

---

<sup>10</sup> OSR: *engl.* **O**ld **S**crap **R**atio



### 3.1 Status quo Recycling

#### 3.1.1 Indium (Chemisches Zeichen: In)

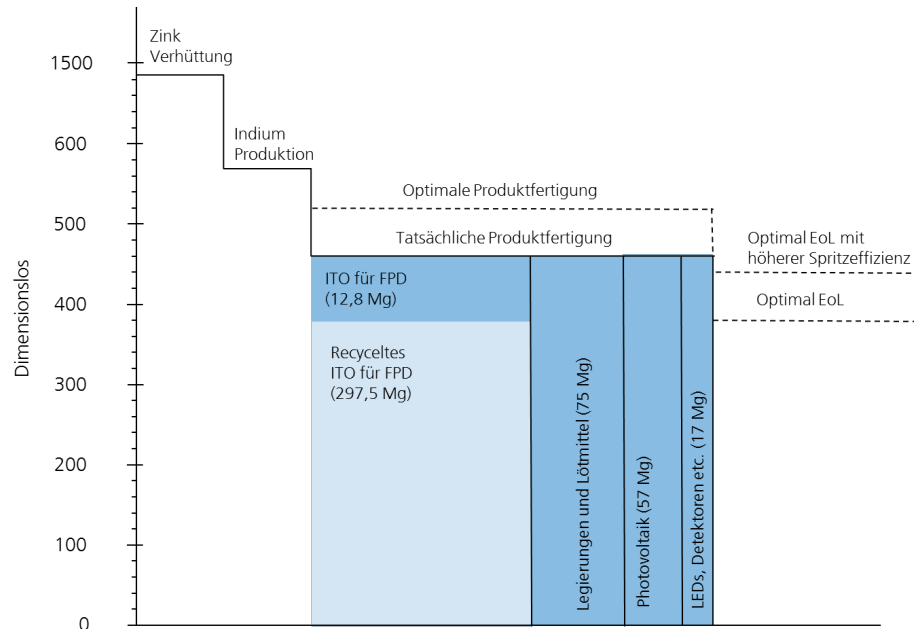
Indium wird hauptsächlich in Form von Indium-Zinn-Oxid (ITO) als transparenter Leiter in Flachbildschirmen eingesetzt. Dies stellt, mit einem Anteil von 74 % an der Gesamtindiumnachfrage, das dominierende Anwendungsfeld dar [Wilts-2014]. Darüber hinaus werden Kupfer-Indium-(Gallium)-Diselenide (CIS bzw. CIGS) in Dünnschicht-Solarzellen eingesetzt [IZT/ISI-2009] und finden so im Bereich der Photovoltaik Anwendung. Auch bei der Herstellung von weißen LED (Light Emitting Diode) wird Indium in Form von Indiumgalliumnitrid (InGaN) verwendet. Aufgrund der hohen Zukunftsrelevanz weisen diese Produktbereiche sehr hohe Wachstumstendenzen auf [Oakdene-2011]. Des Weiteren wird Indium als Legierungselement in Lötmitteln (z. B. Fieldsches Metall) eingesetzt, darüber hinaus werden Indiumoxide bzw. -hydroxide in Batterien verwendet [EC-2014].

Obwohl ein Großteil der Anwendungen weit verbreitete Konsum- und Gebrauchsgüter darstellen, werden weltweit weniger als 1 % des Indiums aus Post-Consumer-Abfällen recycelt [UNEP-2011]. Dieser Anteil wird überwiegend aus Flachbildschirmschrotten im asiatischen Raum zurückgewonnen. In Deutschland wird hingegen kein Indium aus Post-Consumer-Abfällen recycelt [Wittmer-2011], [EC-2010]. In Deutschland beschränken sich die Recyclingaktivitäten derzeit auf die Durchführung von Forschungsvorhaben bzw. Pilotversuchen und fokussieren vorwiegend auf das Recycling von Indium aus LCD-Bildschirmen bzw. teilweise auch aus Photovoltaikanlagen [Rasenack-2014], [Böni-2015].

Das Recycling von Produktionsabfällen spielt beim Einsatz von Indium generell eine zentrale Rolle. Dies hängt unter anderem mit den derzeit noch erheblichen Ineffizienzen während der Aufbringung von ITO-Beschichtungen zusammen. Bei der Aufbringung der ITO-Schicht auf Solarmodule werden lediglich 30 % des ITO appliziert, der Rest fällt als Produktionsschrott an [Gibson-2011]. Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, dass die Anwendung in ITO-Beschichtungen eine dominierende Rolle einnimmt, haben sich hier insbesondere in den Herstellerländern (China, Japan und Korea) bereits entsprechende Rückgewinnungsverfahren etabliert [Gibson-2011], [Tolcin-2015], wobei Japan aus globaler Sicht eine Vorreiterrolle einnimmt. Aufgrund eines Produktionsmengenrückgangs in der Zinkindustrie und der damit einhergehenden Drosselung der an die Zinkproduktion gekoppelten Indiumgewinnung wurde innerhalb eines gezielten Recyclingprogrammes über die Hälfte der ITO-Produktion mit sekundärem Indium hergestellt. Das Recyclingkonzept basierte dabei unter anderem auf der Verwertung von Flachbildschirmschrotten und dem Import von Verarbeitungs- und Metallresten der ITO-Herstellung aus Ländern ohne Recyclinginfrastruktur für Indium. Großkonzerne wie Sharp und die Harima Raffinerie recyceln in Japan Indium im industriellen Maßstab [Bublies-2006]. Insgesamt werden 25-54 % des weltweit eingesetzten Primärmetalls Indium durch sekundäres Indium substituiert [UNEP-2011], [Polinares-2012], [Bertau-2013], [Ayres-2014], das wiederum zu 99 % aus dem Recycling von Produktionsabfällen stammt [UNEP-2011], [Gibson-2011].

Nachfolgendes Bild illustriert die anteiligen Verluste, die von der Primärgewinnung bis hin zur Entsorgung In-haltiger Produkte zu verzeichnen sind. Hier wird noch einmal deutlich, welche Potenziale im Bereich der Produktfertigung, vor allem aber im Bereich des EoL-Recyclings bestehen und bisher ungenutzt bleiben.

Bild 3-1:  
Systemverluste  
während des  
Lebenszyklus von  
Indium im Jahr 2010,  
eigene Darstellung  
nach [Ayres-2014]



### 3.1.2 Germanium (Chemisches Zeichen: Ge)

Germanium wird zu etwa 30 % im Bereich der Telekommunikation bzw. für Glasfaseranwendungen genutzt [EC-2014]. Eine Anreicherung von Germaniumdioxid im Kern der Glasfaserkabel ( $\text{GeO}_2$ -Gehalt 10 %) generiert einen höheren Brechungsindex, was die Führung des Lichts durch eine Verbesserung der Totalreflexion gewährleistet [Neukirchen-2014]. Weiter wird  $\text{GeO}_2$  als Katalysator in der Kunststoffindustrie eingesetzt und wird dabei insbesondere bei der Herstellung von Polyethylenterephthalat (PET)-Flaschen verwendet. Im Bereich der Elektronik bzw. in der Solartechnologie findet Germanium Anwendung in Form von Silizium-Germanium-Legierungen (SiGe). Darüber hinaus wird Germanium aufgrund der Transparenzregion von Ge-Kristallen im Bereich der Infrarotoptik oder bei der Herstellung von Linsensystemen verwendet [Röwer-2014]. Insbesondere diese Anwendungsbereiche sind auch von militärischer Bedeutung.

Das Recycling von Germanium beschränkt sich derzeit ausschließlich auf die Rückführung von Produktionsabfällen (Neuschrott), die bei der Herstellung Gehaltiger Produkte anfallen. Dabei ist das Germaniumrecycling aus diesen Produktionsabfällen an den Prozess der Primärgewinnung gekoppelt, sodass die primäre und sekundäre Verarbeitung zusammen erfolgt und somit nur in den entsprechenden Förderländern stattfindet [Jorgenson-2006]. Die seltenen natürlichen Vorkommen von Germanium, die dabei niedrigen Erzgehalte und aufwendige Herstellungsverfahren begünstigen das Recycling von Produktionsrückständen. Einerseits liegen die Ge-Konzentrationen in Produktionsrückstän-

den aus den Anwendungsbereichen deutlich über den Konzentrationen in natürlichen Vorkommen [Kammer-2009]. So eignen sich grundsätzlich Materialien ab einem Germaniumgehalt von zwei Prozent für das Recycling, weshalb beispielsweise auch Filtermatten aus der Raumlufthereinigung von Glasfaserproduzenten geeignet sind [Kammer-2009]. Andererseits liegen die zu erwartenden Kosten für das Recycling aufgrund der höheren Ge-Gehalte der Ausgangsstoffe deutlich unter denen der Primärgewinnung [Kammer-2009]. Begünstigend kommt außerdem hinzu, dass die Qualitäten zwischen Germanium aus Primär- und Sekundärproduktion auf gleichem Niveau liegen [Kammer-2009]. Insgesamt werden derzeit 25-50 % des weltweit eingesetzten Germaniums durch sekundäres Germanium substituiert [UNEP-2011], der Schrotanteil (OSR) hingegen liegt ebenso wie die EoL-Recyclingrate bei unter einem Prozent.

Ein Recycling von Ge-haltigen EoL-Produkten ist nicht etabliert. Insbesondere im Bereich der Elektronik und Optik ist der Ge-Anteil so gering, dass ein Recycling der Endprodukte häufig nicht wirtschaftlich ist [Kammer-2009, Melcher-2014, Jorgenson-2006]. Es ist festzustellen, dass eine mangelhafte Infrastruktur bzw. fehlende Rückgewinnungsverfahren dem Recycling von Post-Consumer-Abfällen entgegenstehen [UNEP-2009]. Zukünftig ist jedoch von einem vermehrten Abfallaufkommen von PV-Modulen auszugehen, wodurch die EoL-Recyclingrate ansteigen könnte [USGS-2010].

Neben den Germaniumverlusten, die aus einem mangelhaften EoL-Recycling resultieren, sind darüber hinaus noch weitere anwendungsbedingte Verluste von Germanium zu verzeichnen. So geht Germanium in seiner Anwendung als Katalysatormetall bei der PET-Herstellung in das Polymer über und geht bei diesem Anwendungsfall vollständig verloren. Da nach [EC-2014] etwa 25 % des Germaniums in diesen Anwendungsbereich fließen, sind die damit einhergehenden Verluste erheblich. Bisher existiert für dieses Anwendungsgebiet auch noch keine adäquate Substitutionsmöglichkeit [Röwer-2014]. Zusätzliche indirekt anwendungsbedingte Verluste entstehen in Deutschland bei der Verbrennung von Kohle in Kohlekraftwerken. Das in der Kohle enthaltene und durch den Verbrennungsprozess in die Flugasche übergehende Germanium geht derzeit verloren.

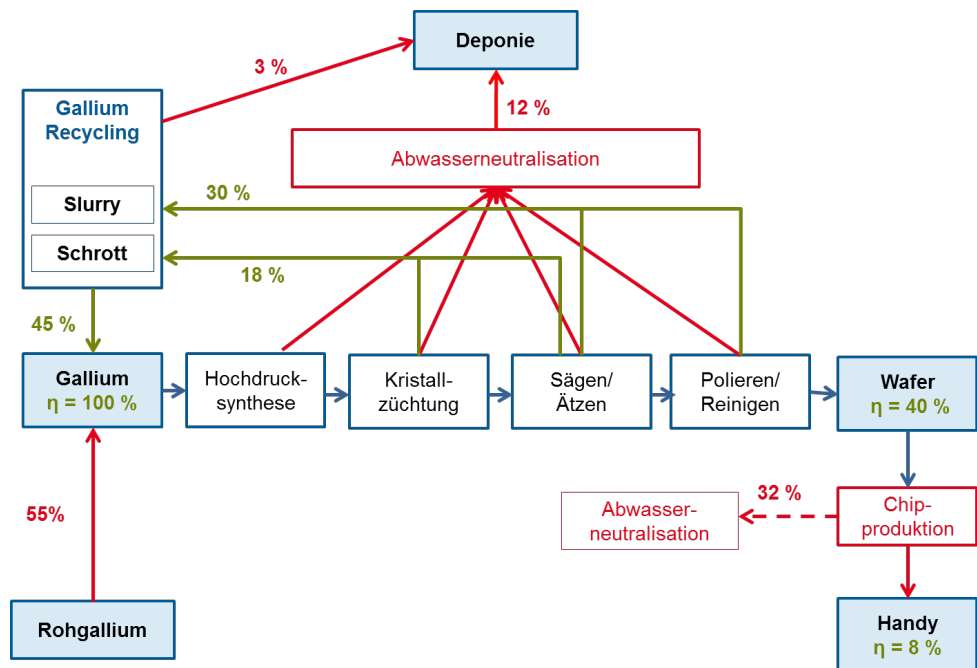
### 3.1.3 Gallium (Chemisches Zeichen: Ga)

Das Hauptanwendungsgebiet für das Element Gallium liegt in der Halbleitertechnologie. Typisch sind dabei Verbindungen wie Galliumarsenid (GaAs) oder Galliumphosphid (GaP) bzw. Galliumarsenidphosphid (GaAsP). Diese Halbleitermaterialien finden in zahlreichen opto-elektronischen Anwendungen wie beispielsweise LED, Lasern, Fotodetektoren aber auch im Bereich der Hochfrequenztechnik oder der Solarindustrie Anwendung [Moskalyk-2003], [Neukirchen-2014]. Seit Mitte der 90er Jahre ist der Galliumbedarf für die GaAs-Substraterzeugung stetig gestiegen und wird sich nach Schätzungen der Deutschen Rohstoffagentur DERA bis 2030 vervierfachen [Steinbach-2012]. Auch bei der Herstellung von Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB) wird Gallium in geringen Mengen als Legierungselement verwendet. Darüber hinaus werden Galliumlegierungen unter anderem als Substitut für Quecksilber in Thermometern eingesetzt [Butcher-2014].

Insgesamt werden derzeit zwischen 10 und 25 % des weltweit eingesetzten Galliums durch sekundäres Gallium substituiert [UNEP-2011], wobei es sich hier vorwiegend um recycelte Produktionsrückstände handelt, der Schrottanteil (OSR) hingegen liegt bei unter einem Prozent. Die EoL-Recyclingrate beträgt aktuell weniger als 1 % [UNEP-2011]. Wie auch bei den übrigen betrachteten Rohstoffen besteht eines der Hauptprobleme in der mangelnden Wirtschaftlichkeit potenzieller Verfahren. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Für einen wirtschaftlichen Betrieb von Recyclinganlagen ist eine stetige Zufuhr von Mindest-Durchsatzmengen erforderlich. Dies garantiert sowohl eine optimale Anlagenauslastung als auch einen kontinuierlichen Output von (Sekundär-)Rohstoffen, durch die für potenzielle Abnehmer relevante Mindestmengen erzeugt und entsprechende Verkaufserlöse erzielt werden können. Im Falle von Gallium gilt das insbesondere für das Recycling aus Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG), LED oder Photovoltaikanlagen. Aber gerade im Bereich der Erfassung der relevanten Stoffströme besteht noch erheblicher Handlungsbedarf [LANUV-2012]. Zusätzlich führt die dissipative Anwendung von Gallium im Endprodukt dazu, dass ein wirtschaftlicher Betrieb von möglichen Recyclingprozessen derzeit nicht möglich ist. So ist die Menge des enthaltenen Rohstoffes sehr gering (im ppm-Bereich [Stelter-2013]) und hohe Konzentrationen von Störstoffen wie beispielsweise  $Al^{3+}$  und  $Fe^{3+}$  erweisen sich ebenfalls als problematisch [Gutzmer-2012].

In Produktionsprozessen dagegen gehen oft erhebliche Mengen Gallium verloren, die entweder aus technologischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht zurückgewonnen werden. So sind bei der Galliumarsenid-Waferproduktion und -verarbeitung Galliumverluste von etwa 15 % zu verzeichnen (vgl. Bild 3-2). Diese resultieren zu 12 % aus Rückständen der Abwasserneutralisation und zu 3 % aus Resten, die beim produktionsinternen Gallium-Recycling aus Slurry oder Schrott anfallen, und werden in der Regel deponiert [Stelter-2013].

Bild 3-2: Arbeitsschritte bei der GaAs-Waferproduktion und -verarbeitung mit anteiligen Galliumströmen, nach [Stelter-2013]



Ein weiteres Problem der Verfahren, die bisher für das Recycling von Gallium aus Produktionsrückständen genutzt werden, liegt in dem erheblichen, aus der mehrfach notwendigen Neutralisation bedingten Chemikalienverbrauch begründet (NaOH und HCl).

### 3.1.4 Neodym (Chemisches Zeichen: Nd), Dysprosium (Chemisches Zeichen: Dy)

Der bedeutendste Anwendungsbereich von Neodym ist die Verwendung als Legierungselement für die Herstellung von Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB). Diese Permanentmagneten werden in Schlüsseltechnologien für die Energiewende, wie beispielsweise im Bereich der Windenergie oder der Elektromobilität eingesetzt, finden aber auch in zahlreichen Konsum- und Gebrauchsgütern wie Mobiltelefonen, Computerfestplatten oder Elektrofahrrädern Anwendung [Zepf-2015]. Des Weiteren wird Neodym als Zusatz in Magnesiumlegierungen für die Flugzeugindustrie, zur Festigkeitssteigerung in Aluminiumlegierungen, zur Modifizierung von rostfreien Stählen sowie zur Verbesserung der Eigenschaften von Gussstählen eingesetzt. In der Glas- und Keramikindustrie wird Neodym zum Einfärben von Gegenständen in violetter Farbe benutzt, auch für Emailleschichten setzt man es zu ihrer Färbung ein. Neodymgefärbte Gläser werden für Schweißer-, Glasbläserbrillen, als Schutzgläser in Industrieöfen und in Fernsehgeräten eingesetzt. Hochreines Neodymoxid wird zur Herstellung von Glaslasern verwendet [Bernhardt-2011].

Dysprosium wird – wie Neodym – im Wesentlichen in Permanentmagneten eingesetzt [Bast-2014]. Etwa 95 % des Dysprosiums fließen in diesen Anwendungsbereich [Hönderdaal-2012]. Jedoch wird Dysprosium in diesem Bereich nur verwendet, wenn eine entsprechende Temperaturstabilität garantiert werden muss. Weitere Anwendungsgebiete liegen im Einsatz als Dotierungsmaterial in Keramikvielschicht-Chipkondensatoren und als Legierungsbestandteil von Terfendol-D, einer Legierung, die sich durch Magnetfelder besonders leicht verformen lässt [Bast-2014]. In der Kerntechnik wird Dysprosium zur Herstellung von Kontrollstäben und für Schutzeinrichtungen zur Absorption thermischer Neutronen verwendet. Dysprosiumäthylsulfat setzt man in Spezialapparaturen zur Erzeugung tiefer Temperaturen ein [Bernhardt-2011].

Ein Recycling von Neodym und Dysprosium aus dem Hauptanwendungsbereich der Magnete findet in Deutschland bzw. Europa im industriellen Maßstab nicht statt. Prozessabfälle und Produktionsrückstände, die in Deutschland anfallen (vorwiegend Schleifschlämme, Splitter, Schrotte), werden nach China exportiert und werden dort dem Primärgewinnungsprozess zugeführt. Insgesamt stellen derzeit zwischen 1 und 10 % des weltweit eingesetzten Neodyms und Dysprosiums Sekundärmaterialien dar [UNEP-2011]. Neben der Möglichkeit, etablierte Primärgewinnungsprozesse zu nutzen, führen relevante Inputmengen dazu, dass Recyclingverfahren wirtschaftlich sind.

Eines der bedeutendsten Hemmnisse des Neodym- und Dysprosium-Recyclings aus EoL-Produkten besteht im Gegensatz zum Recycling von Produktionsrückständen in der mangelnden Wirtschaftlichkeit potenzieller Verfahren. Ursächlich hierfür sind die dissipative Anwendung im Endprodukt sowie der teilweise hohe Aufwand zur Freilegung der relevanten Bauteile aus EAG [Böni-2015].

Zudem befinden sich Recyclingtechnologien noch in der Entwicklungsphase [Rombach-2014], [Rademaker-2013]. Eine werkstoffliche Verwertung von Magnetwerkstoffen wäre im Vergleich zur rohstofflichen Verwertung deutlich weniger aufwendig, ist jedoch mit Qualitätseinbußen im Endprodukt verbunden, was von Kundenseite oftmals nicht akzeptabel ist [Blank-2015]. Eine rohstoffliche Verwertung ermöglicht hingegen hohe Produktqualitäten, ist aber aufgrund der notwendigen Arbeitsschritte (Entmagnetisierung, Entfernen von Verunreinigungen, ggf. Separierung, Auflösung, Aufkonzentration usw.) und der zu geringen Inputmengen (fehlende Sammelsysteme, mangelnde Kenntnis über relevante Stoffströme) nicht rentabel [Blank-2015].

Darüber hinaus setzten die Unternehmen in Phasen, in denen auf den Primärrohstoffmärkten extreme Preissteigerungen zu verzeichnen waren, unter anderem auf die Strategie der Materialeinsparung. So reduzierte sich nach Expertenaukunft der durchschnittliche Gehalt an Dysprosium in Festplatten um etwa zwei Drittel. Ähnlich verhält es sich bei Magneten, die im Automobilbau eingesetzt werden. Während bis vor wenigen Jahren grundsätzlich Dysprosium in den entsprechenden Magneten verwendet wurde, wird es inzwischen nur noch dann eingesetzt, wenn es aus Gründen der Temperaturbeständigkeit zwingend erforderlich ist [Fischer-2015]. Aus Gründen der Ressourceneffizienz ist dies eine durchaus wünschenswerte Entwicklung, es führt aber im Umkehrschluss zu einer Verstärkung von Dissipationseffekten, was wiederum das Recycling erschwert und potenzielle Recyclingverfahren unwirtschaftlich macht. Zusätzlich stehen auch die vorhandene Produktvielfalt und stetig voranschreitende Innovationszyklen einer Etablierung wirtschaftlicher Recyclingkonzepte entgegen. Letztendlich führen auch die seit 2011 kontinuierlich fallenden Preise auf den Primärrohstoffmärkten dazu, dass das Recycling von Dysprosium und Neodym aktuell wirtschaftlich unattraktiv ist. So lag beispielsweise der durchschnittliche Marktpreis für metallisches Dysprosium im August 2011 durchschnittlich noch bei 3 031 USD/kg und sank bis zum Juni 2015 auf 339 USD/kg [BGR-2015].

Dennoch implementieren einzelne Unternehmen Recyclingverfahren zur Rückgewinnung seltener Erden. So betreibt Rhodia S. A. (Frankreich) ein Recyclingverfahren für Energiesparlampen. Die Aufbereitung der darin enthaltenen Leuchtmittel erfolgt zunächst in einer Anlage in Saint Fons, welche ein Seltenerd-Konzentrat erzeugt, das dann in La Rochelle zu den Oxiden von Lanthan, Cer, Terbium, Yttrium, Europium und Gadolinium aufbereitet wird. Zusätzlich werden noch weitere Seltenerdoxide aus dem Batterierecycling von Umicore übernommen. Auch für Rhodia sind die Preise für Seltene Erden auf den Primärrohstoffmärkten relevant, allerdings startete die Firma ihre Recyclingaktivitäten 2007, also lange vor der Hochpreisphase. Der Entschluss dazu war damals als eine »long term decision« zu sehen. Es kann angenommen werden, dass die eingesetzten Technologien grundsätzlich auch für die Rückgewinnung von Neodymoxid und Dysprosiumoxid aus Magneten geeignet sind, aber die Reduktion der Oxide zu Metallen ist zurzeit nicht geplant [Bast-2014].

Weitere Ansätze für ein künftiges Recycling sind in der Literatur beschrieben, zielen jedoch überwiegend auf Magnetaufkommen aus Großanwendungen wie z. B. in Windkraftanlagen, Elektromobilität sowie Elektromotoren in industriellen Anwendungen ab [Öko-Institut-2013], [Rademaker-2013]. Diese sind

leicht demontierbar und erschließen bei vergleichsweise geringem Aufwand hohe Neodym- bzw. Dysprosium-Mengen. Allerdings handelt es sich bei diesen Anwendungsbereichen um Technologien, die zum Teil erst in der jüngeren Vergangenheit Anwendung finden und darüber hinaus über eine lange Nutzungsdauer verfügen, weswegen diese Abfallmengen erst in Zukunft an Bedeutung gewinnen werden.

Des Weiteren sind erhebliche Rohstoffverluste durch den Export von Nd- und Dy-haltigen Produkten zu verzeichnen. Während dieses Problemfeld im Bereich der EAG oder Altfahrzeuge schon länger bekannt ist, blieb bisher weitgehend unberücksichtigt, dass eine vergleichbare Problematik auch für Werkzeugmaschinen und Industriemotoren besteht [Blank-2015]. Da für diesen Stoffstrom derzeit noch keine aussagefähigen Stoffstromanalysen vorliegen, kann der mit dem Export verbundene Rohstoffverlust nicht beziffert werden. Experteneinschätzungen zufolge kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine erhebliche Anzahl an Industriemotoren über einen Gebrauchtwarenmarkt ins Ausland verbracht wird. Grundsätzlich ist die Art der Entsorgung von Industriemotoren aber von ihrer Verwendung abhängig [Bast-2014]. Während die in Maschinen integrierten Motoren in der Regel mit der gesamten Maschine verschrottet werden und dabei vorwiegend Massenmetalle wie Stahl, Kupfer oder Aluminium zurückgewonnen werden, werden bei Industriemotoren, die im Zuge einer Überholung oder Reparatur ausgetauscht werden, Rotor und Stator häufig voneinander getrennt und in unterschiedlichen Schrottfractionen gesammelt. Da es bislang aber keinen industriellen Prozess gibt, mit dem die in den Motoren verbauten Magnete wieder nutzbar gemacht werden können, gelangen diese mit der Mischschrottfraction in den Kreislauf des Stahlrecyclings. Die in den Magneten enthaltenen Elemente Neodym oder Dysprosium gehen damit ebenfalls verloren [Bast-2014].

### 3.2 Recyclingpotenziale und Hindernisse

Recycling hat gegenüber der Primärgewinnung in der Regel ökologische Vorteile. Daneben kann die Abhängigkeit von bestehenden Bezugsquellen kritischer Metalle durch eine Rohstoffversorgung aus sekundären Quellen reduziert werden [Rasenack-2014]. Jedoch wurde in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.4 deutlich, dass insbesondere das Recycling aus EoL-Produkten, das für alle der betrachteten Rohstoffe bei unter einem Prozent liegt, noch nicht zufriedenstellend ist.

Um die Potenziale der betrachteten Metalle in EoL-Produkten zu erörtern, soll der Rohstoffgehalt nachfolgend beispielhaft an der Geräteart Notebooks diskutiert werden. In Tabelle 3-1 werden zunächst die Mengen der in den in Verkehr gebrachten Geräten enthaltenen Metalle Indium, Gallium, Neodym und Dysprosium dargestellt.

Neben den im Rahmen der Studie ausgewählten Elementen wurde zum Vergleich das Element Kobalt mit in die Betrachtung aufgenommen. Hierbei wird deutlich, in welchen vergleichsweise geringen Mengen die Elemente In (0,29 t), Ga (0,01 t), Nd (15,16 t) und Dy (0,43 t) in allen Notebooks enthalten sind.

Tabelle 3-1: Darstellung der Gehalte sowie der durch Erfassung, Vor- und Endbehandlung bedingten Systemverluste am Beispiel Notebooks für ausgewählte Rohstoffe nach [LANUV-2012, Manhardt-2012]

Metall <sup>11</sup>	Gehalt in allen 2010 in D verkauften Notebooks [t]	Verluste bei Erfassung	Verluste bei Vorbehandlung	Verluste bei Endbehandlung	Rückgewinnung in D [t]
Indium	0,29	50 %	20 %	100 % <sup>12</sup>	0
Gallium	0,010	50 %	40 %	100 % <sup>12</sup>	0
Neodym	15,16	50 %	100 % <sup>12</sup>	100 % <sup>12</sup>	0
Dysprosium	0,43	50 %	100 % <sup>12</sup>	100 % <sup>12</sup>	0
Kobalt	461,31	50 %	20 %	4 %	177

Aktuellere Untersuchungen weisen unter Einbeziehung von LCD-Panels aus Fernsehgeräten, Mobiltelefonen, PC-Monitoren und Notebooks ein Indiumpotenzial von 0,2 bis 0,4 t sowie Neodym- und Dysprosiumpotenziale in Desktop-PC, Notebooks und Festplatten in Höhe von 10 bis 15 t (Neodym) sowie 0,5 bis 1,5 t (Dysprosium) aus [Rotter-2015]. Diese Zahlen beziehen sich jedoch auf die in den Sammelsystemen im Jahr 2013 tatsächlich erfassten Mengen und sind damit nicht unmittelbar mit den in Tabelle 3-1 dargestellten Mengen der in Verkehr gebrachten Geräte zu vergleichen. Ein Vergleich der genannten Elementmengen mit den Rohmetallimporten gemäß Außenhandelsstatistik für Deutschland [StaLa BW-2013] für die Elemente Gallium, Indium und Kobalt<sup>13</sup> ermöglicht eine Einordnung der in EAG enthaltenen Materialmengen. So wurden im Jahr 2012 etwa 47 t Indium, 36 t Gallium und 2 170 t Kobalt importiert. Die nach [Rotter-2015] und [LANUV-2012, Manhardt-2012] erhobenen Potenziale sind demnach selbst bei Realisierung einer vollständigen Rückgewinnung als sehr gering einzuschätzen. Allerdings sind darin auch nur ausgewählte Gerätekategorien aus EAG enthalten. Darüber hinaus werden die betrachteten Rohstoffe z.B. auch in Windkraftanlagen oder der Elektromobilität eingesetzt. Die darin verbauten Komponenten verfügen im Vergleich zu Konsumprodukten über eine lange Lebensdauer. Dies führt dazu, dass diese Stoffströme erst in Zukunft mögliche Verwertungssysteme erreichen können. Hier gilt es, frühzeitig adäquate Recyclinginfrastrukturen aufzubauen.

Eine umfassende Quantifizierung des Recyclingpotenzials aller die betreffenden Elemente enthaltenden Produktkategorien sowie Industrieanlagen wäre für eine Abschätzung des gesamten Recyclingpotenzials in Deutschland erforderlich. Entsprechende Informationen liegen jedoch nur vereinzelt und häufig in nicht vergleichbaren Erhebungssystematiken vor.

Neben den Elementmengen zeigt Tabelle 3-1 auch, dass es entlang der Prozesskette bei den betrachteten Elementen teilweise zu erheblichen Materialver-

<sup>11</sup> Germanium blieb in der Betrachtung nach [LANUV-2012], [Manhardt-2012] unberücksichtigt.

<sup>12</sup> Vollständiger Verlust im Prozessschritt

<sup>13</sup> Gallium (Warennummer 81129289), Indium (Warennummer 81129281) und Kobalt (Warennummer 81052000)



lusten kommt. Diese belaufen sich im Bereich der Erfassung bereits auf 50 %, da nur etwa die Hälfte aller in Verkehr gebrachten Geräte den dafür bestimmten Erfassungssystemen zugeführt werden. Die Verluste in der Vorbehandlung sind in erster Linie auf Vorbehandlungsprozesse zurückzuführen, die nicht auf die Rückgewinnung der betreffenden Elemente zugeschnitten sind. Eine Reduzierung der Verluste wäre unter anderem durch eine verstärkte Anwendung manueller Demontageprozesse zur zielgerichteten Anreicherung der die Zielelemente enthaltenden Baugruppen möglich [LANUV-2012]. Im Prozessschritt der Endbehandlung kommt es schließlich zu einem vollständigen Verlust der Elemente Indium, Gallium, Neodym und Dysprosium, da die Prozesse auch hier nicht auf die Rückgewinnung dieser Elemente ausgelegt sind.

Tabelle 3-2 verdeutlicht im Vergleich zu den Massenmetallen Eisen und Aluminium noch einmal die Problemfelder bei der Rückgewinnung der Zielelemente entlang der Prozesskette aus dem gesamten EAG-Strom. Wie bereits in Tabelle 3-1 dargestellt, ist eine zielgerichtete Erfassung der elementhaltigen Geräteearten noch nicht etabliert. Auch die Identifizierung, Abtrennung und Aufkonzentrierung der elementhaltigen Komponenten wird im Vergleich zu den Massenmetallen durchgängig als mangelhaft und verbesserungsbedürftig eingestuft.

Tabelle 3-2: Darstellung der prozessschrittspezifischen Problemfelder für Systemverluste bei EAG für ausgewählte Rohstoffe nach [UNEP-2013]

Metall/ Handlungsfeld	Fe	Al	Ga	Ge	In	SEE <sup>14</sup>
Globale Erfassung erhöhen	●	●	●	●	●	●
Legierungsspezifische Sortiertechniken	●	●	○	○	○	●
Neue Trenntechniken	○	●	○	○	○	○
Metallhaltige Komponenten identifizieren	○	○	●	●	●	●
Metallhaltige Komponenten abtrennen	○	○	●	●	●	●
Neue Konzentrationstechniken	○	○	●	●	●	●
Finaler Recyclingprozess	●	●	●	●	●	●

Legende:

○	Nicht relevant	●	Stand der Technik, hohe Rückgewinnungsraten
●	Existent, aber Verbesserung nötig	●	Nicht existent, Verbesserung nötig

Die Ursachen für die beschriebenen Rohstoffverluste sind vielfältig. Als ein wesentliches Hemmnis für ein Recycling der betrachteten Elemente aus EoL-Produkten ist die dissipative Verteilung im Endprodukt zu sehen, die sich auf alle Prozessschritte von Erfassung bis Verwertung auswirkt [Rasenack-2014].

<sup>14</sup> Selten Erd-Elemente (SEE)

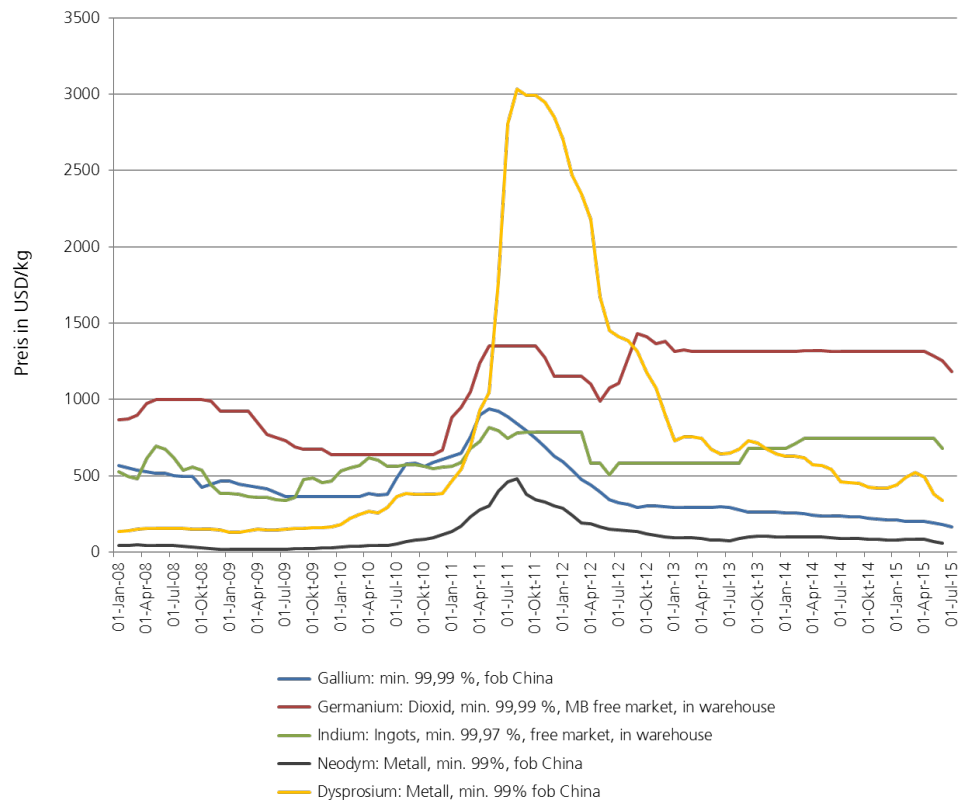
In der Erfassung werden die EAG zudem häufig nicht in die dafür vorgesehenen Sammelstrukturen eingespeist. EU-weit gehen so etwa 2/3 der Mengen für eine fachgerechte Aufbereitung verloren [Huisman et al.-2015]. Ursachen hierfür liegen unter anderem in den informellen Sammlungen sowie dem unzureichenden Bewusstsein für den Rohstoffgehalt der EAG in der Bevölkerung.

Die Verluste bei der Vorbehandlung sind neben der Dissipation sowie der Vielfalt und Variabilität der Gerätekategorien auch durch ein wenig demontagefreundliches Design der Produkte begründet. Zudem erschwert der Mangel an Informationen zu Produktzusammensetzung und -aufbau adäquate Vorbehandlungsprozesse. Diese sind in erster Linie an den gesetzlichen Vorgaben zur Schadstoffentfrachtung sowie an massenbasierten Recyclingquoten ausgerichtet. Anstelle der für eine zielgerichtete Rückgewinnung von Einzelelementen erforderlichen selektiven Zerlegung der EAG werden daher überwiegend Shreddertechnologien mit entsprechend hohen Materialverlusten eingesetzt [LANUV-2012]. Auch sind aktuell kaum spezifischen Identifikations- und Konzentrationsstechniken für dissipativ verteilte kritische Rohstoffe verfügbar [UNEP-2013].

Recyclingverfahren sind kaum auf Technologiemetalle ausgerichtet [UNEP-2013]. Hindernisse für die marktreife Entwicklung und großtechnische Anwendung von geeigneten Verfahren liegen neben der großen Produktvielfalt und kurzen Innovationszyklen vielfältig auch in den veränderlichen Rohstoffgehalten in den Produkten aufgrund von Materialsubstitutionen, als Reaktion auf Marktentwicklungen im Rohstoffbereich. Beispielhaft können hier die Entwicklungen im Bereich der Halbleitertechnologien, der optischen oder der Magnettechnologien genannt werden, in denen die hier betrachteten kritischen Elemente in ihrer Mengenanwendung reduziert oder vollständig durch andere Materialien substituiert wurden [Daub-2015].

Das Fehlen ökonomischer Anreize für eine zumeist kostenintensive Umsetzung oder Weiterentwicklung von Recyclingverfahren ist daneben auch mit limitierten Absatzmärkten für Sekundärrohstoffe zu begründen [Oakdene-2011]. Zudem können volatile Preise an den Primärrohstoffmärkten (Hochpreisphase in 2011 und 2012 sowie nachfolgende, starke Preisverringerung, vgl. Bild 3-3) Recyclinganstrengungen unwirtschaftlich machen. In nachfolgender Grafik sind die Preisverläufe der fünf relevanten Rohstoffe im Zeitraum von Januar 2008 bis Juni 2015 dargestellt [DERA-2015].

Bild 3-3:  
Preisentwicklung der  
relevanten Rohstoffe  
von Januar 2008 bis  
Juni 2015 in USD/kg  
[DERA-2015]<sup>15</sup>



Wie bereits in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.3 beschrieben, besteht auch im Bereich der Produktionsabfälle Handlungsbedarf. Hier gilt es, Rohstoffverluste in Produktions- und Verarbeitungsprozessen zu vermeiden und das Recycling aus Produktionsrückständen weiter voranzutreiben und zu optimieren. Dafür könnte beispielsweise im Falle von Indium eine Reduzierung des Verschnittes und für Gallium eine gesteigerte Rückgewinnung aus Abwässern ins Auge gefasst werden. Die ökonomische Machbarkeit einer entsprechenden Maßnahme müsste jedoch vorab an der jeweiligen Produktionsstätte geprüft werden.

<sup>15</sup> fob: free on board/frei an Bord: Nach dieser (Handels-)Klausel ist der Verkäufer verpflichtet, die Ware an Bord des vom Käufer benannten Schiffes im benannten Verschiffungshafen zu liefern. Zudem hat er ggf. die Ausfuhrgenehmigung und/oder andere behördliche Genehmigungen zu beschaffen und alle Zollformalitäten zu erledigen. Der Verkäufer ist jedoch nicht zur Erledigung der Einfuhrformalitäten sowie zur Zahlung der Einfuhrabgaben verpflichtet [IHK-2012]

**Fazit 2 »Hindernisse beim Recycling«**

## »Mangelnde Wirtschaftlichkeit«

- Notwendige Mengen für Mindestdurchsatz nicht verfügbar (insbesondere aufgrund dissipativer Verteilung und zu geringen Erfassungsmengen)
- Recyclingverfahren oftmals technisch sehr aufwendig und damit kostenintensiv
- Volatile Preise auf den Primärrohstoffmärkten, dadurch mangelnde Investitionssicherheit für Implementierung von Recyclingverfahren

## »Mangelhafte Infrastruktur«, insbesondere in Bezug auf EoL-Produkte relevant:

- Hohe Verluste im Erfassungsschritt (Ursachen: z. B. nicht fachgerechte Entsorgung durch mangelndes Bewusstsein des Bürgers und informelle Sammlungen)
- Bestehende Vorbehandlungs- und Recyclingverfahren sind auf Massen- und Edelmetalle ausgerichtet

## »Mangelhafte Verfügbarkeit von Informationen«

- Fehlende Informationen zu Zusammensetzung und Aufbau von EoL-Produkten erschweren eine optimale Gestaltung von Erfassung, Vorbehandlung und Recycling
- Mangelnde Investitionssicherheit für Implementierung von Recyclingverfahren aufgrund fehlender Informationen zum Rohstoffgehalt in Abfällen und dessen zukünftiger Entwicklung

## 4 Stand der Forschung zu Recyclingverfahren

### 4.1 Vorgehen

Der Stand der Forschung wurde, bezogen auf die in Kapitel 2 festgelegten Rohstoffe, durch ein Screening relevanter Veröffentlichungsmedien für wissenschaftliche Arbeiten erhoben:

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen
- Patente
- Datenbanken öffentlich geförderter Forschungsprojekte

Das Screening der wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurde mittels der Literaturdatenbank »ScienceDirect<sup>16</sup>« durchgeführt. Die Recherche der Patentlage erfolgte mithilfe der professionellen Patentdatenbank »PatBase« und für das Screening der öffentlich geförderten Forschungsprojekte wurden unterschiedliche Förderdatenbanken ausgewertet.

Zur besseren Einordnung der Suchergebnisse wurden diese anschließend nach den Rohstoffen, veröffentlichten bzw. entwickelten Verfahren sowie dem Stand der Verfahrensentwicklung geclustert. Folgende Unterteilung wurde für die fünf Cluster vorgenommen:

- Chemische/hydrometallurgische Verfahren
- Biotechnologische Verfahren
- Pyrometallurgische Verfahren
- Charakterisierung und Potenzialerhebung
- Sonstige<sup>17</sup>

Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht der Prozesse, die den jeweiligen Verfahrensclustern zugeordnet werden können.

Tabelle 4-1: Prozessübersicht der Verfahren

Chemisch/ hydrometallurgisch	Biotechnologisch	Pyrometallurgisch
Ionenadsorption	Biosorption	Schmelzen
Flüssig-flüssig-Extraktion	Mikrobielle Laugung »Bioleaching«	Glühen
Flüssig-flüssig-Extraktion mit ionischen Flüssigkeiten		Pyrolyse
Fest-flüssig-Extraktion		

<sup>16</sup> <http://www.sciencedirect.com/>

<sup>17</sup> Nicht eindeutig identifizierbare und kategorisierbare Projektinhalte

Chemisch/ hydrometallurgisch	Biotechnologisch	Pyrometallurgisch
Laugungsverfahren		
Superkritische Flüssigextraktion		
Fällung		
Verflüchtigung		
Elektrorefination		
Kristallisation		

Der Stand der Verfahrensentwicklung wurde in Anlehnung an das System der »Technology Readiness Level« (TRL) durchgeführt. Der »Technology Readiness Level« beschreibt eine Skala zur Beurteilung des Entwicklungsstandes einer neuen Technologie. Die Skala besteht aus neun Stufen und wurde erstmals in den 1970-80er Jahren von der NASA entwickelt. Anfangs wurde sie zur Beurteilung von Entwicklungslaufzeiten verwendet, da Probleme bei der Synchronisation der Entwicklungen aufkamen und in Defiziten der Leistung, Organisation und der Budgetplanung resultierten.

Das TRL-System wurde mit der Zeit vom »US-Department of Health and Human Services« adaptiert und zur Beurteilung der Einsetzbarkeit eines neuen Medikaments weiterentwickelt. Die einzelnen Stufen wurden inhaltlich angepasst, doch die neunstufige Skala blieb. Auch das »US-Department of Energy« adaptierte die Skala.

2012 wurde das TRL-System auch von der europäischen Kommission übernommen und angepasst. In der Folge wurden »Technology Readiness Level« auch zur Bewertung von Forschungen im Forschungsprogramm Horizon 2020 angewendet. Tabelle 4-2 zeigt die Stufen der verwendeten Technologiereifeskala [EARTO-2014].

Tabelle 4-2: HORIZON 2020 TRL-Skala und projektbezogene Einteilung

Technologiereife								
TRL 1	TRL 2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
Beobachtung des Funktionsprinzips	Beschreibung der Anwendung einer Technologie	Nachweis der Funktions-tüchtigkeit einer Technologie	Versuchsaufbau im Labor	Versuchsaufbau in Einsatzumgebung	Prototyp in Einsatzumgebung	Prototyp im Einsatz	System mit Nachweis der Funktions-tüchtigkeit im Einsatzbereich	System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes
Labor/lab environment				Demonstration in Einsatzumgebung/relevant environment		Tatsächlicher Einsatz/operational environment		

Da die einzelnen Stufen nicht exakt voneinander getrennt werden können bzw. eine detaillierte Eingruppierung innerhalb des Projektrahmens nicht möglich war, wurden zusätzlich für das Projekt drei weitere Bereiche eingeführt. Hier wird zwischen »Labor/lab environment« (TRL1-4), »Demonstration in Einsatzumgebung/relevant environment« (TRL5-6) und »Tatsächlicher Einsatz/operational environment« (TRL7-9) unterschieden.

Dieses Bewertungssystem bietet auch eine Ausgangslage für den Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung. Viele Forschungsergebnisse, gerade bei neuen Verfahrensentwicklungen, gelangen nach einem Forschungsprojekt nicht in die praktische Umsetzung. Diese Bewertung bietet eine Hilfestellung, um zu erkennen, welche Verfahren möglicherweise auch durch weitere Unterstützungen in der Praxis etabliert werden könnten. Allerdings ist diese Bewertung nicht uneingeschränkt nutzbar. Sie betrachtet z. B. keine Rückschläge im technologischen Innovationsprozess. In der Phase der Pilotproduktion kann eine Technologie vorübergehend wieder auf die Forschungsebene zurückgeworfen werden. Gründe dafür könnten u. a. Fehler im Produkt-Design aufgrund von Problemen bei der Herstellbarkeit sein.

Auch die Beurteilung von komplexen Systemen kann sich als schwierig erweisen, da das System nur einzelne Phasen im Technologielebenszyklus betrachtet und meistens nicht das Endprodukt in seiner dynamischen Anwendungsumgebung. Weitere Hemmnisse zur Betrachtung des TRL-Systems sind auch organisatorische Herausforderungen sowie Vermarktbarkeit, Produzierbarkeit und Kommerzialisierung.

#### **Hinweis zur Methodik:**

Das Screening der Datenbanken und die anschließende Auswertung wurden mit wissenschaftlicher Sorgfalt durchgeführt. Dennoch kann nicht gewährleistet werden, dass alle Veröffentlichungen, Patente oder Forschungsprojekte gefunden worden sind. Die erhobenen Daten sollten aber eine ausreichende Datenbasis zur Absicherungen der getroffenen Aussagen bieten.

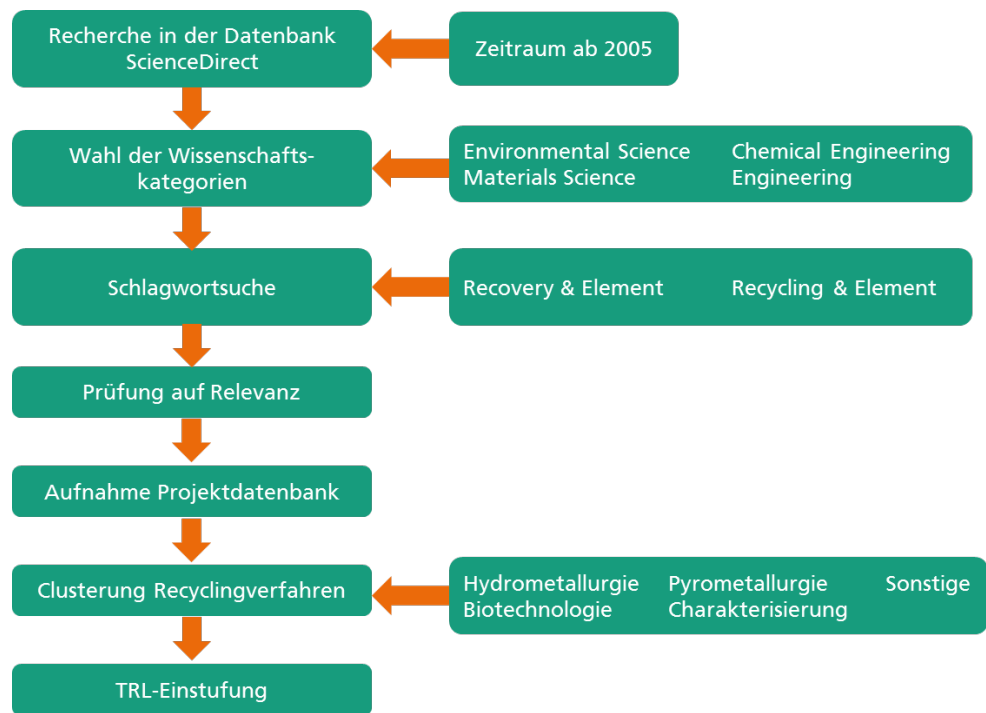
## **4.2 Literaturrecherche**

Ein breites Screening auf Recyclingprojekte in der Literaturdatenbank für wissenschaftliche Veröffentlichungen »ScienceDirect<sup>18</sup>« wurde durchgeführt. Die Recherche innerhalb der Literaturdatenbank wurde mittels zuvor festgelegter Schlagworte und Suchkriterien angegangen, um eine größtmögliche Reproduzierbarkeit innerhalb einer kontinuierlich anwachsenden Projektmenge zu erreichen. Der zeitliche Rahmen wurde von 2005 bis heute gesetzt, um zum einen die Aktualität zu gewährleisten und zum anderen alle Publikationen zu berücksichtigen, die im Zuge der steigenden Rohstoffpreise um das Jahr 2008 erstellt wurden, abzudecken. Die Auswahl wurde anschließend auf die 20 kritischen Rohstoffe für die EU eingeschränkt mit dem Fokus auf die fünf identifizierten kritischen Rohstoffe, die in der Studie betrachtet werden und allgemein SEE. Das Vorgehen der Literaturrecherche ist in Bild 4-1 dargestellt.

---

<sup>18</sup> <http://www.sciencedirect.com/>

Bild 4-1:  
Vorgehensweise  
Literaturrecherche



**Allgemeiner Hinweis zu den Ergebnissen der Auswertung:**

Für jede Suche sind zwei Ergebnisse angegeben. Unter »insgesamt« wird die Anzahl verstanden, die bei der Suche generell gefunden wurde. Unter »relevant« hingegen wird die Trefferanzahl der Literatur aufgeführt, die sich tatsächlich mit dem Recycling bzw. der Rückgewinnung des Elements beschäftigt. Eine Liste der jeweils unter dem Kriterium »relevant« eingeordneten Literaturstellen kann bei Bedarf aus dem Literaturkatalog extrahiert werden. Ein Beispiel für die Notwendigkeit dieser Unterteilung ist etwa, dass in der englischen Sprache das Wort »recovery« nicht nur für das Recycling gebraucht wird, sondern auch für die Gewinnung und Aufbereitung eines Werteelements aus Primärrohstoffen. Das Gesamtergebnis der Literaturrecherche zeigt Tabelle 4-3. Stand der Recherche ist der 17.07.2015.

Tabelle 4-3: Gesamtergebnis für die Literaturdatenbank »ScienceDirect«

Auswertung	Anzahl der Treffer
Insgesamt	726
Davon als relevant eingestuft	338

Nachfolgend sind die Treffer für die jeweiligen Zielelemente grafisch aufbereitet und je nach Wissenschaftskategorie dargestellt.



Bild 4-2:  
Anzahl der Treffer für Gallium nach Wissenschaftskategorie

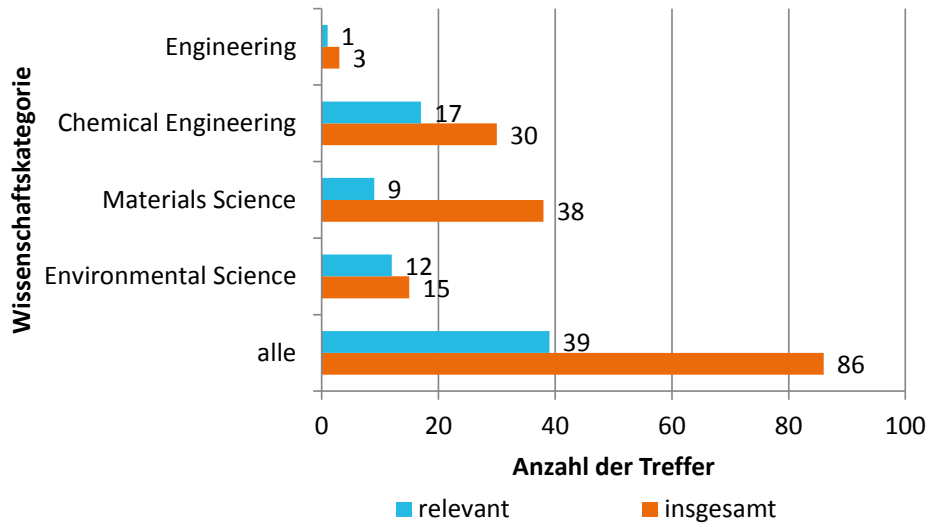


Bild 4-3:  
Anzahl der Treffer für Germanium nach Wissenschaftskategorie

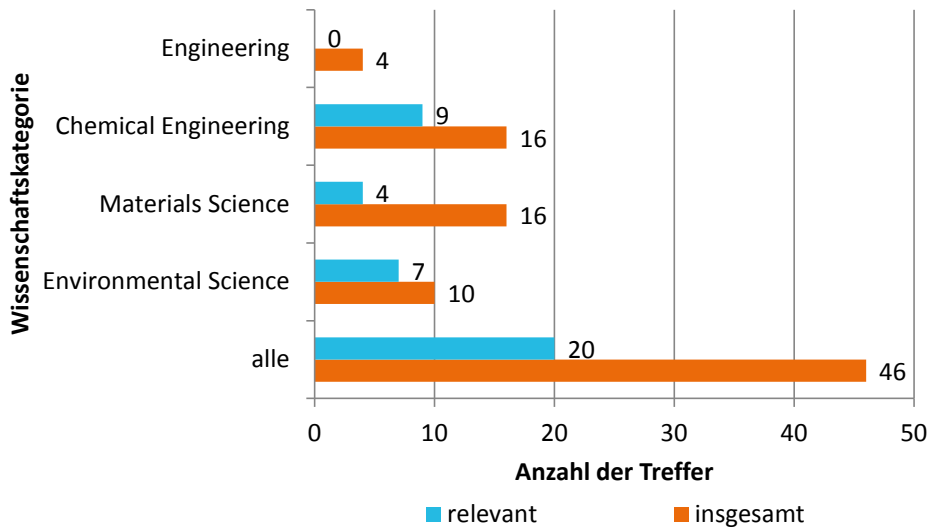


Bild 4-4:  
Anzahl der Treffer für Indium nach Wissenschaftskategorie

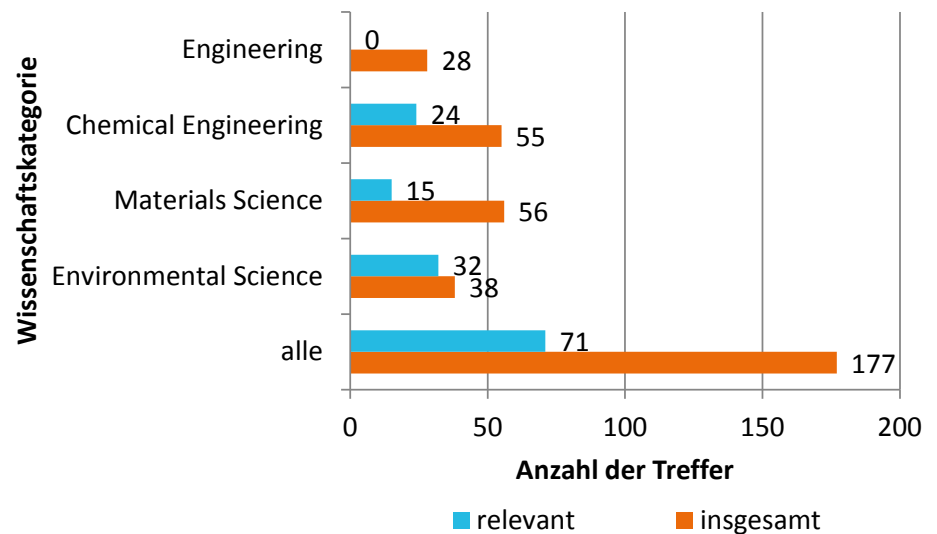


Bild 4-5:  
Anzahl der Treffer für  
Neodym nach  
Wissenschaftskategorie

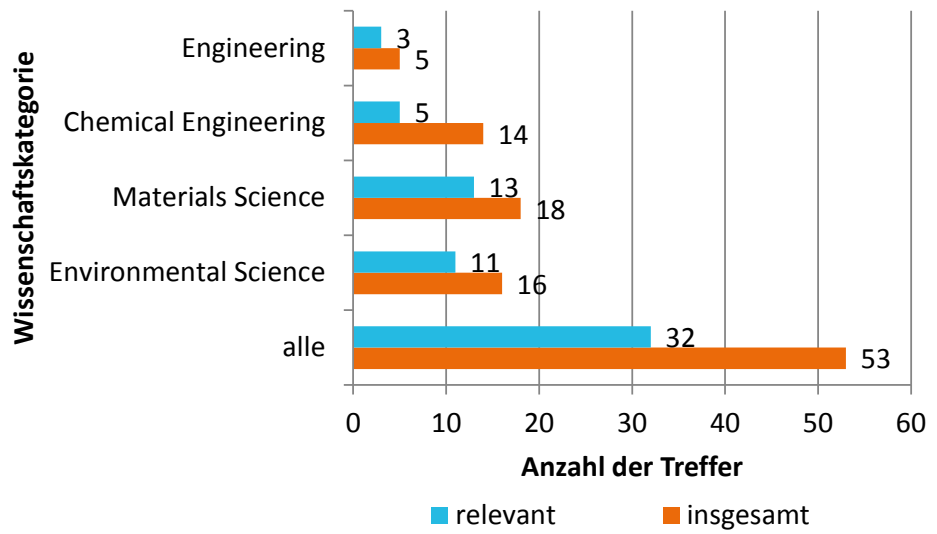


Bild 4-6:  
Anzahl der Treffer für  
Dysprosium nach  
Wissenschaftskategorie

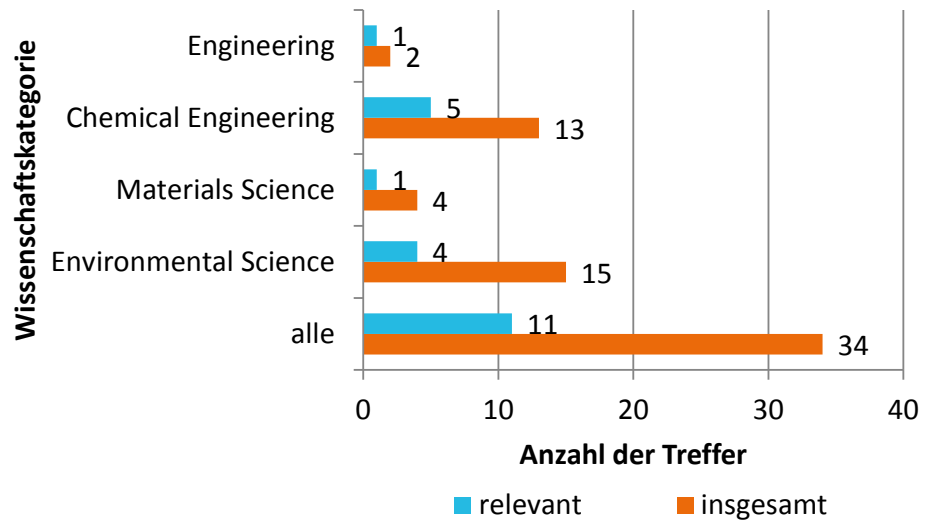
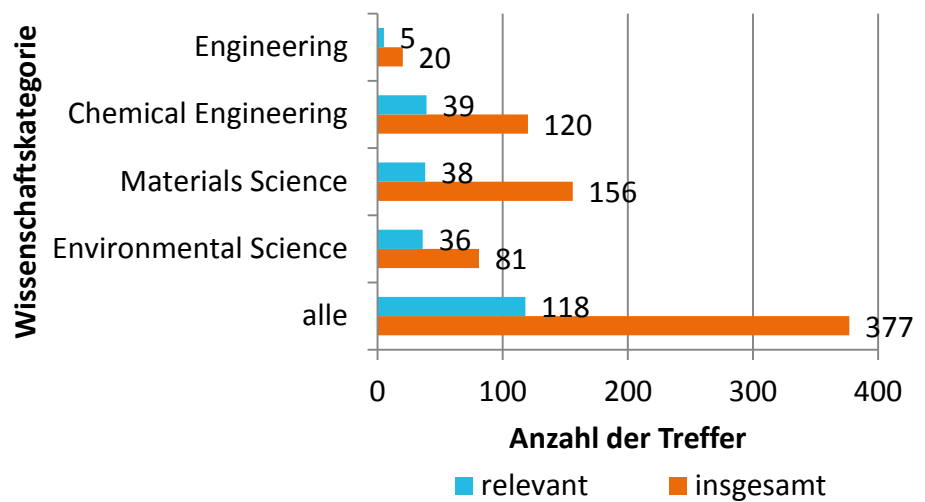


Bild 4-7:  
Anzahl der Treffer für  
SEE nach Wissen-  
schaftskategorie

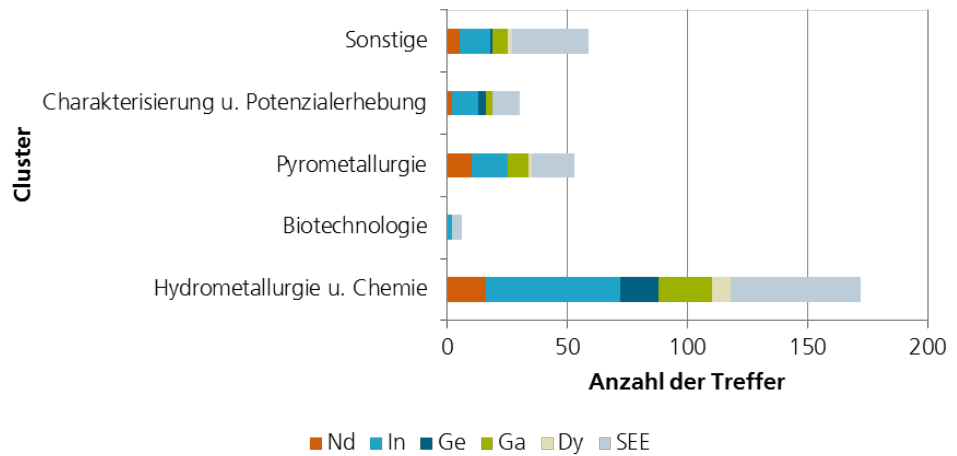


In Tabelle 4-4 und Bild 4-8 ist nachfolgend dargestellt, wie sich die Zielelemente auf die jeweiligen Verfahren aufteilen.

Tabelle 4-4: Literaturlauswertung nach Prozesscluster

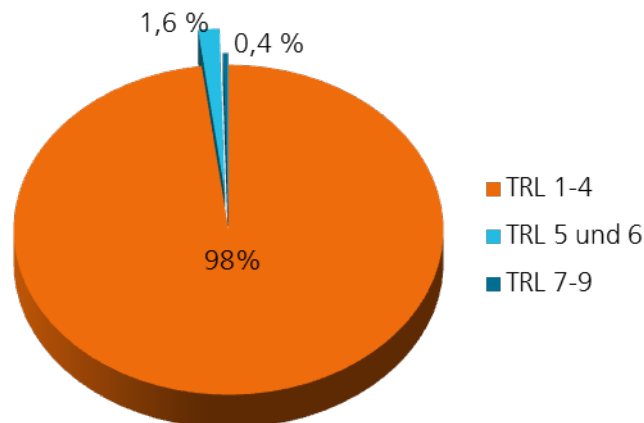
Cluster	Nd	In	Ge	Ga	Dy	SEE
Hydrometallurgie u. Chemie	16	56	16	22	8	54
Biotechnologie	0	2	0	0	0	4
Pyrometallurgie	10	15	0	9	1	18
Charakterisierung u. Potenzialerhebung	2	11	3	3	0	11
Sonstige	5	13	1	6	2	32

Bild 4-8: Literaturlauswertung nach Prozesscluster



Zur Erhebung des Entwicklungsstandes wurden die in den relevanten Artikeln beschriebenen Verfahren nach ihrem Entwicklungsstand in Anlehnung an das TRL-System eingeordnet. Hierzu wurden die technischen Versuchsbeschreibungen sowie das Abstract und die Zusammenfassung der einzelnen Artikel herangezogen. Wie Bild 4-9 zeigt, befassen sich 98 % der Veröffentlichungen mit Ergebnissen aus Laborverfahren.

Bild 4-9:  
TRL-Einstufung der  
Literaturrecherche



### 4.3 Patentrecherche

Die Patentrecherche wurde mit dem Programm »PatBase« durchgeführt. PatBase ist eine professionelle Patentdatenbank, die auf über 47 Millionen Patentfamilien zurückgreift. Hierzu wurde zunächst eine Schlagwortliste auf Deutsch und Englisch erstellt, die für eine Trunkierungssuche angepasst wurde.

Gesucht wurde in den IPC<sup>19</sup>-Klassen:

- C22B: Gewinnen oder Feinen von Metallen; Vorbehandlung von Rohstoffen (Production of refining of metals: pretreatment of raw materials)
- B09B: Beseitigung von festem Abfall (Disposal of solid waste)

Denkbar wäre grundsätzlich auch eine Einordnung der Patentanmeldungen in andere, allgemeinere IPC-Klassen, z. B. B01 (Physikalische oder chemische Verfahren oder Vorrichtungen allgemein) oder B03 (Nassaufbereitung von Feststoffen oder Aufbereitung mittels Luftsetzmaschinen oder Luftherden; magnetische oder elektrostatische Trennung fester Stoffe von festen Stoffen oder flüssigen oder gasförmigen Medien; Trennung mittels elektrischer Hochspannungsfelder). Dient das Verfahren allerdings der (Rück-)gewinnung von Metallen, müsste es i. d. R. zumindest der Klasse C22B als Nebenklasse zugeordnet sein. Deshalb wurde im Rahmen dieser Studie auf die Recherche in allgemeineren IPC-Klassen verzichtet.

Tabelle 4-5 zeigt die verwendete Schlagwortliste und die Zusammensetzung des Suchterms.

<sup>19</sup> Die Internationale Patentklassifikation (IPC) dient der Klassifikation technischer Sachverhalte. Die Zuordnung zu einer oder mehreren IPC-Klassen erfolgt nach der Anmeldung durch das jeweilige Patentamt.

Tabelle 4-5: Recherchierte Schlagworte

Schlagwörter	Englische Entsprechung	Trunkierungssuche
Neodym	neodymium	neodym*
Dysprosium	dysprosium	dysprosium*
Indium	indium	indium*
Germanium	germanium	germanium*
Gallium	gallium	gallium*
Seltene Erden/ Seltenerdmetalle	rare earth elements	seltene Erde* OR seltenerd* OR rare W2 element* OR rare earth*
kritische Rohstoffe bzw. Ressourcen	critical raw materials/resources	kritisch* Rohstoff*/Ressource* OR critical* resource*/material*
<b>AND</b>		
Rueckgewinnung	recovery	Rueckgewinn* OR recover*
Aufbereitung	treatment	Aufbereit* OR treatment*
Verwertung	utilization	Verwert* OR utiliza* OR utilisa
Regenerierung	regeneration	regener*
Wiederherstellung	remediation	Wiederher* OR remediat*

PatBase-Abkürzungen und –Operatoren:

TAC = Claims, Title, Abstract

IC = International Class

\* = Trunkierung (ohne Limit)

Wn (innerhalb von n Worten voneinander)

Das Schlagwort »recovery\*« wird im Englischen nicht nur für das generelle Recycling verwendet, sondern auch für die erstmalige Gewinnung von Metallen. Somit wurde bei einigen Suchen der Zeitraum auf Anmeldungen seit dem Jahr 2008 eingeschränkt. Hier steigt die Anzahl der Anmeldungen an, zudem gibt es bereits Ausfuhrbeschränkungen in China, deshalb kann tendenziell angenommen werden, dass diese Patente eher Recyclingverfahren als die erstmalige Gewinnung betreffen.

Ab Recherche 5 wurde nach den jeweiligen Einzelementen, Seltenen Erden und nach kritischen Rohstoffen bzw. Ressourcen gesucht. Um die Anzahl der Suchergebnisse auf ein überschaubares Maß einzugrenzen, wurde hier, wie bei Recherche 4, ohne die Schlagwörter »Aufbereit\*«, »treatment«, »Verwert\*«, »utiliza\*«, »utilisa\*« recherchiert. Des Weiteren wurde im Anschluss eine Recherche nach »Recycling« und den jeweiligen Elementen durchgeführt.

### Allgemeiner Hinweis zu den Rechercheergebnissen:

Die Suche wurde ausschließlich mit der Sucheinstellung TAC durchgeführt, d. h. in der Suche nach Ansprüchen, Titel und Abstract, um die Trefferanzahl überschaubar und bearbeitbar zu halten. Treffer in Titel, Abstract oder Patentansprüchen einer Schrift deuten üblicherweise auf eine erhöhte Relevanz hin. Finden sich die Treffer hingegen ausschließlich in der Beschreibung, ist die Relevanz i. d. R. nicht so hoch. Stand der Patentrecherche ist der 17.07.2015.

#### 4.3.1 Allgemeine Ergebnisse

Nachfolgend werden in Tabelle 4-6 die Ergebnisse der allgemeinen Recherche nach allen Elementen und Schlagworten teilweise mit ersten Einschränkungen (Ergebnisse nach 2008, Einschränkung der Schlagwörter) aufgeführt.

Tabelle 4-6: Übersicht durchgeführte Recherchen und Trefferanzahl

Recherche	Inhalt	Treffer
Recherche 1	TAC-Recherche Klassen: alle Schlagworte: alle Zeitraum: gesamt	41 141
Recherche 2	TAC-Recherche Klassen: C22B und B09B Schlagworte: alle Zeitraum: gesamt	2 537
Recherche 3	TAC-Recherche Klassen: C22B und B09B Schlagworte: alle Zeitraum: ab 2008	1 021
Recherche 4	TAC-Recherche Klassen C22B und B09B Schlagworte: ohne »Aufbereit*«, »treatment«, »Verwert*«, »utiliza*«, »utilisa*«	877

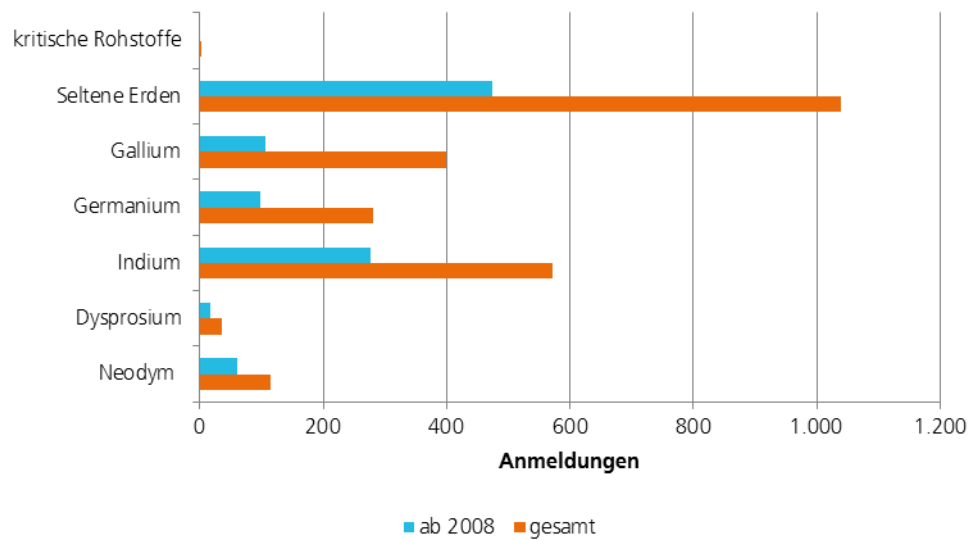
Tabelle 4-7 und Bild 4-10 geben einen Überblick über die Patentanmeldungen der einzelnen betrachteten Rohstoffe.

Tabelle 4-7: Übersicht durchgeführter Recherchen zu den einzelnen Elemente

Recherche	Element	Treffer	
		gesamt	Anmeldungen seit 2008
Recherche 5	Neodym	114	61
Recherche 6	Dysprosium	35	17
Recherche 7	Indium	571	276
Recherche 8	Germanium	280	98
Recherche 9	Gallium	400	106
Recherche 10	Seltenen Erden und Synonyme	1 040	475

Recherche	Element	Treffer	
		gesamt	Anmeldungen seit 2008
Recherche 11	Kritische Rohstoffe	1	0
Recherche 12	Recycling und Neodym	6	4
Recherche 13	Recycling und Dysprosium	0	0
Recherche 14	Recycling und Indium	6	4
Recherche 15	Recycling und Germanium	3	3
Recherche 16	Recycling und Gallium	3	3
Recherche 17	Recycling und Seltene Erden und Synonyme	25	22

Bild 4-10:  
Patentanmeldungen  
mit Bezug zu den  
Zielelementen



### 4.3.2 Rohstoffspezifische Ergebnisse »Neodym«

In den folgenden Grafiken sind für »Neodym« eine zeitliche Visualisierung und eine Länderaufteilung der Patentanmeldungen dargestellt. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen.

Bild 4-11:  
Patentanmeldungen  
mit TAC-Schlagwort  
Neodym und IPC-  
Klassen C22B oder  
B09B – zeitlicher  
Verlauf

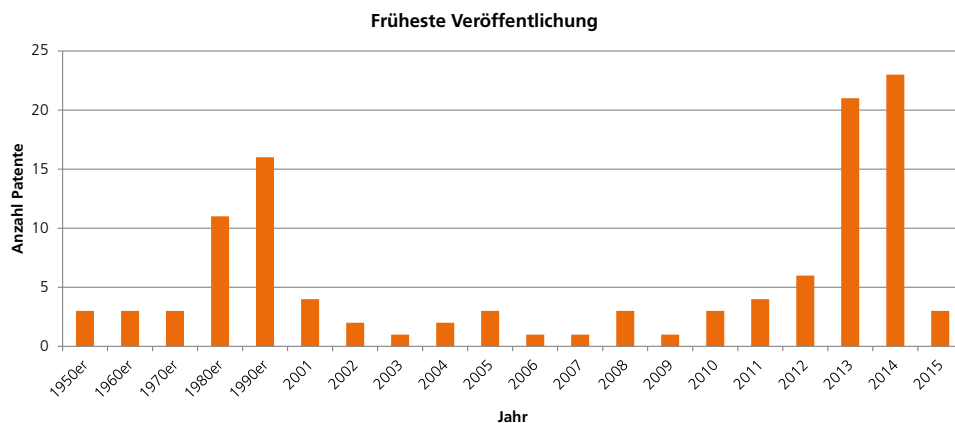


Bild 4-12:  
Patentanmeldungen  
mit TAC-Schlagwort  
Neodym und IPC-  
Klassen C22B oder  
B09B – Länder

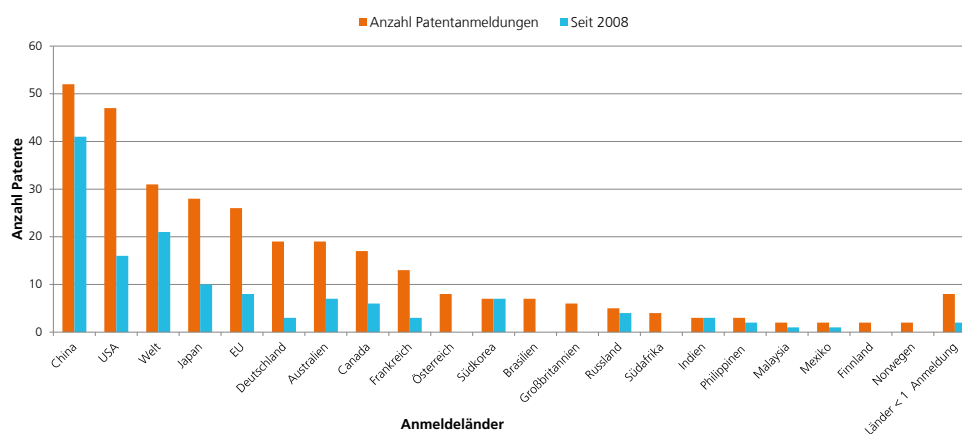


Tabelle 4-8: Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Neodym«

Unternehmen	Anzahl	Unternehmen	Anzahl
Beijing University of Technology, China	12	Beijing Non Ferrous General In, China	1
Rhone Poulenc Chimie, Frankreich	6	Baotou Xijun Rare Earth Co LTD, China	1
Shinetsu Chemicals Co, Japan	2	Atomic Energy Commission	1
Rhone Poulenc Spec Chim, Frankreich	2	Asahi Kasei Corp, Japan	1
Orbite Aluminae Inc, Frankreich	2	Asahi Chemical Ind, Japan	1
Lianyungang Zhaoyu New Material Ind Co LTD, China	2	Anhui Univ of Technology, China	1
Inst Pesquisas Tech, Brasilien	2	Anhui Tianze Mining technology Dev Co LTD, China	1
Commodore Separation Technolog, USA	2	American Can Co, USA	1



Unternehmen	Anzahl	Unternehmen	Anzahl
Commissariat Energie Atomique, Frankreich	2	Aluminum Co of America, USA	1
BASF AG, Deutschland	2	Allied Signal Inc, USA	1
Berni Tiago	1	Advanced Magnetic Processes Inc, USA	1
Beijing Nonferrous Metal, China	1		

Zu den Schlagworten »Recycling« und »Neodym« wurden sechs Anmeldungen gefunden.

### 4.3.3 Rohstoffspezifische Ergebnisse »Dysprosium«

In den folgenden Grafiken sind für »Dysprosium« eine zeitliche Visualisierung und eine Länderaufteilung der Patentanmeldungen dargestellt. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen.

Bild 4-13: Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Dyprosium und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf

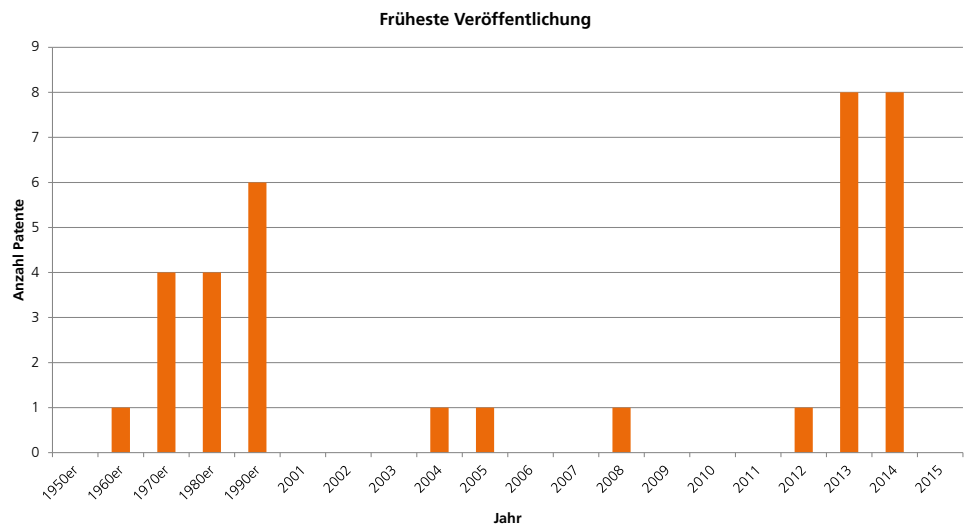


Bild 4-14: Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Neodym und IPC-Klassen C22B oder B09B – Länder

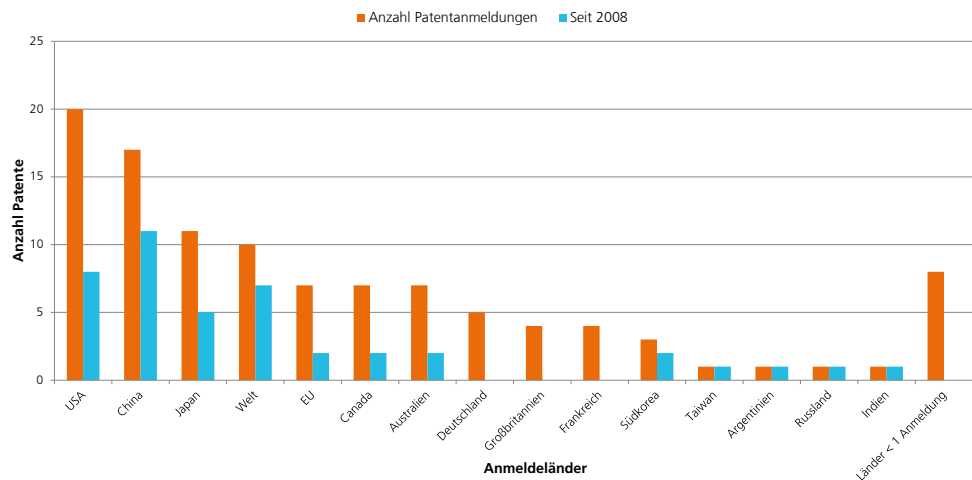


Tabelle 4-9: Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Dysprosium«

Unternehmen	Anzahl	Unternehmen	Anzahl
Beijing University of Technology, China	6	Chemical Metallurg i of Academ,	1
Orbite Aluminae Inc, Frankreich	2	Berni Tiago	1
Ind Tech Res Inst, Taiwan	1	Beijing Nonferrous Metal, China	1
Hitachi Metals LTD, Japan	1	BASF AG, Deutschland	1
Hitachi LTD, Japan	1	Asahi Kasei Corp, Japan	1
Grirem Advanced Mat Co LTD, China	1	Asahi Chemical Ind, Japan	1
GEN RES Inst for Nonferrous metals, China	1	Aluminum Co of America, USA	1
Exploration Orbite Vespa Inc, Frankreich	1	Allied Signal Inc, USA	1
Eastman Kodak Co, USA	1		

Zu den Schlagworten »Recycling« und »Dysprosium« wurden keine Anmeldungen gefunden.

#### 4.3.4 Rohstoffspezifische Ergebnisse »Indium«

In den folgenden Grafiken sind für »Indium« eine zeitliche Visualisierung und eine Länderaufteilung der Patentanmeldungen dargestellt. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen.

Bild 4-15: Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Indium und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf

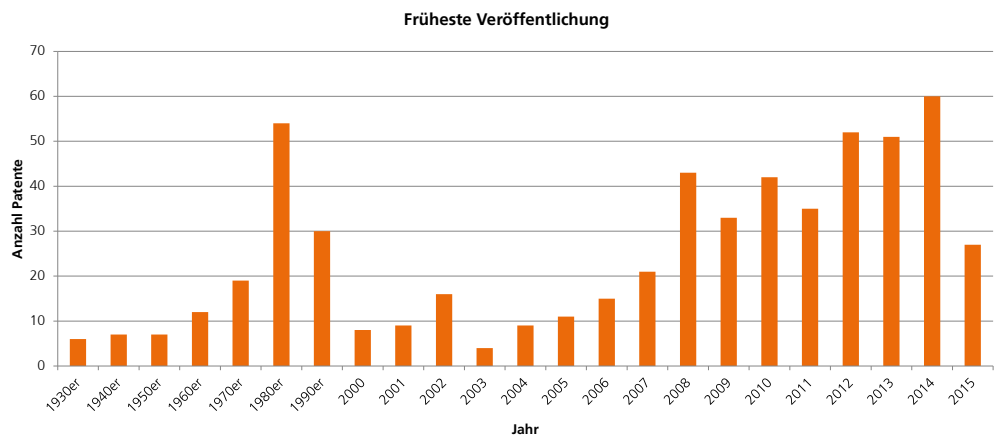


Bild 4-16:  
Patentanmeldungen  
mit TAC-Schlagwort  
Indium und IPC-Klassen  
C22B oder B09B –  
Länder

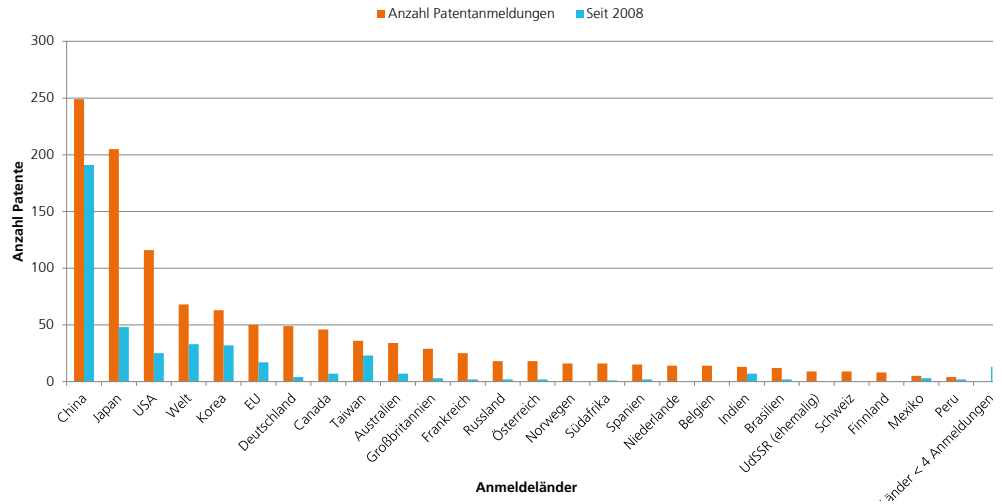


Tabelle 4-10: Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Indium«

Unternehmen	Anzahl	Unternehmen	Anzahl
Yunnan Lincang XingYuan Germanium IND Co LTD, China	12	Shiplely Co LLC, USA	3
Yunnan Dongchang Metal Proc Co LTD, China	8	Rohm and Haas Elect Materials, USA	3
Metallurgie Hoboken, Belgien	7	Penarrooya Miniere Metall, Frankreich	3
Kunming Univ of Science and Technology, China	5	Hiprey Corp	3
Hongjie Fan	5	Henan Yuguang Zinc IND Co LTD, China	3
Central South Univ, China	5	Cominco LDT, Großbritannien	3
Yangzhou Ningda Noble Metal Co LTD, China	4	Amok Soc	2
Sumitomo Chemical Co, Japan	4	Alsthom CGE Alcatel, Frankreich	2
Dowa Mining Co, Japan	4	Acec Union Miniere, Frankreich	2
US Army, USA	3		

Zu den Schlagworten »Recycling« und »Indium« wurden sechs Anmeldungen gefunden.

#### 4.3.5 Rohstoffspezifische Ergebnisse »Germanium«

In den folgenden Grafiken sind für »Germanium« eine zeitliche Visualisierung und eine Länderaufteilung der Patentanmeldungen dargestellt. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen.

Bild 4-17:  
Patentanmeldungen  
mit TAC-Schlagwort  
Germanium und IPC-  
Klassen C22B oder  
B09B – zeitlicher  
Verlauf

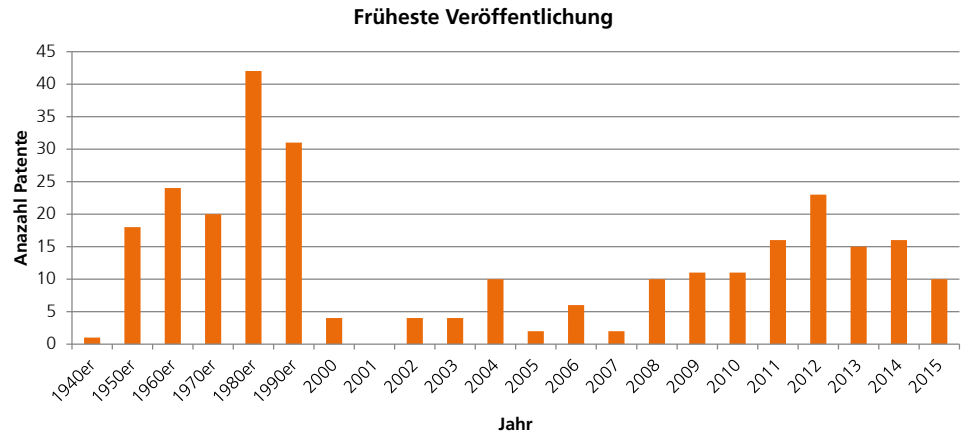


Bild 4-18:  
Patentanmeldungen  
mit TAC-Schlagwort  
Germanium und IPC-  
Klassen C22B oder  
B09B – Länder

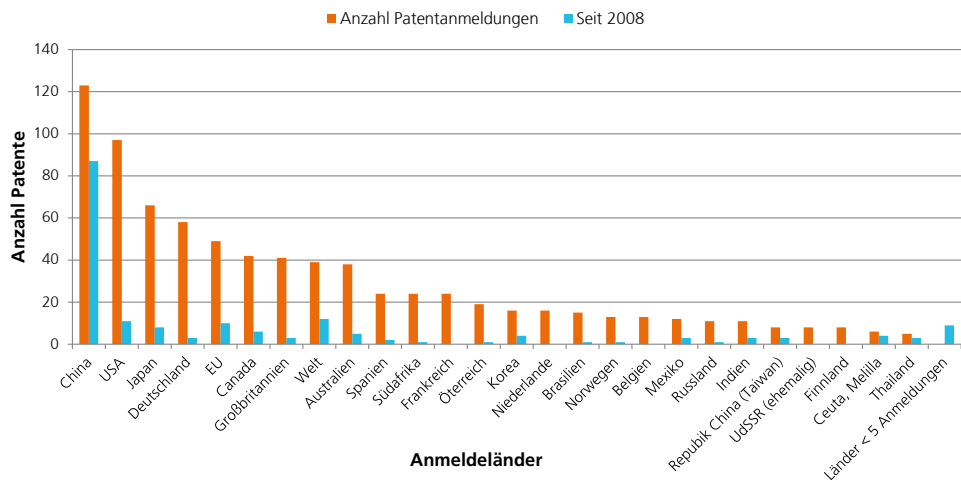


Tabelle 4-11: Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Germanium«

Unternehmen	Anzahl	Unternehmen	Anzahl
Zhuzhou smelter group Co, China	23	Dowa Metals and Mining Co LTD, Japan	6
JX Nippon Mining & Metals Corp, USA	22	Mitsui Mining and Smelting Co, Japan	6
Mitsubishi Materials Corp, Japan	19	Nikko Kinzoku KK, Japan	6
Dowa Mining Co, Japan	17	Sumitomo Metal Mining Co, Japan	6
Nippon Mining Co, Japan	15	Torecom Corp, Korea	6
Kunming Univ of Science and Technology, China	11	Univ Central South, China	6
Nikko Materials Corp, USA	11	American Smelting Refining, USA	5
Sharp KK, Japan	10	Dowa Holdings Co LTD, Japan	5

Unternehmen	Anzahl	Unternehmen	Anzahl
Univ Kunming Science and Tech, China	10	Guangxi Jinshan Indium and Germanium Co LTD, China	5
Central South Univ, China	9	Hongjie Fan	5
Henan Yuguang Zinc IND Co LTD, China	7	Ind Tech Res Inst, Taiwan	5
Laibin China Tin Smelting Co LTD, China	7	Open Joint Stock Company	5
Sumitomo Chemical Co, Japan	7		

Zu den Schlagworten »Recycling« und »Germanium« wurden drei Anmeldungen gefunden.

### 4.3.6 Rohstoffspezifische Ergebnisse »Gallium«

In den folgenden Grafiken sind für »Gallium« eine zeitliche Visualisierung und eine Länderaufteilung der Patentanmeldungen dargestellt.

Bild 4-19: Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Gallium und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf

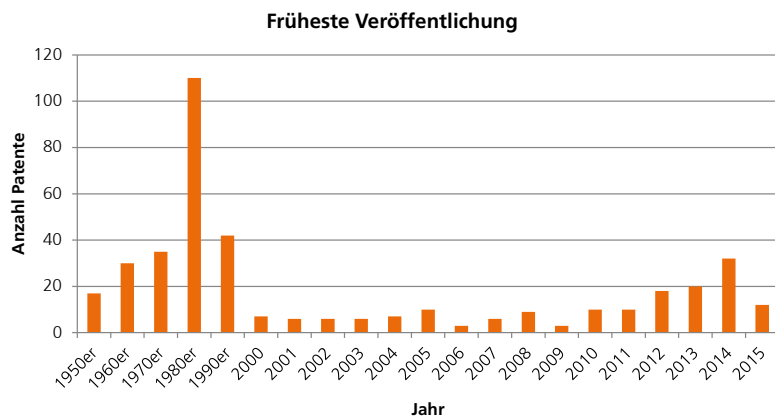
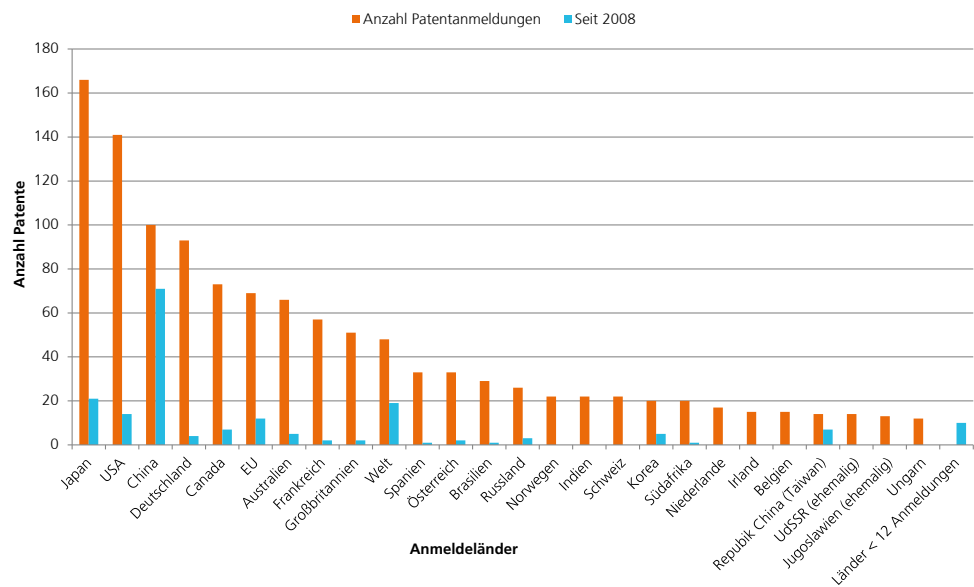


Bild 4-20: Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Gallium und IPC-Klassen C22B oder B09B – Länder



Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen.

Tabelle 4-12: Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Gallium«

Unternehmen	Anzahl	Unternehmen	Anzahl
Sumitomo Chemical CO, Japan	12	Miyoshi Yushi KK, Japan	5
Sumitomo Metal Mining Co, Japan	11	Mitsubishi Metal Corp, Japan	5
Rhone Poulenc Chimie, Frankreich	10	Mitsubishi Chem IND, Japan	5
Mitsui Aluminium Kogyo KK, Japan	9	Furukawa Co LTD, Japan	5
Siemens AG, Deutschland	8	Cominco LTD, Kanada	5
Nippon Light Metal Co, USA	8	Chiyoda Chem Eng Construct Co, Japan	5
Dowa Mining CO, Japan	8	Solar applied Materials Technology Corp, Taiwan	4
Rhone Poulenc Spec Chim, Frankreich	6	Penarroya Miniere Metall, Frankreich	4
Rhone Poulenc Ind, Frankreich	6	Pechiney Aluminum, Frankreich	4
Asahi Chemical IND, Japan	6	Commissariat Energie Atomique, Frankreich	4
Zijin Mining Group CO LTD, China	5	China Shenhua Energy Co LTD, China	4
Unitika LTD, Japan	5	Aluminium Corp of China LTD, China	4

Zu den Schlagworten »Recycling« und »Gallium« wurden drei Anmeldungen gefunden.

### Fazit 3 »Sehr hohe Steigerung der Anmeldungen in China nach 2008«

Es fällt auf, dass ab 2008 besonders viele Patentanmeldungen in China vorgenommen werden, auch für Rohstoffe, z. B. Gallium, die vorher noch nicht so stark im Fokus für den chinesischen Markt waren. Bei Seltenen Erden ist ein Zusammenhang mit den Ausfuhrbeschränkungen und der sukzessiven Verringerung der Exportquoten Chinas ab 2005 zu vermuten.

## 4.4 Forschungsprojekte

Die Auswertung wurde mithilfe eines dreistufigen Rasters durchgeführt. Die erste Stufe stellt dabei die Projekte dar, die sich mit Recyclingthemen auseinandersetzen und ist als Grundgesamtheit zu verstehen. Die Recherche innerhalb der Förderprogramme und Initiativen hat ein offenes Zeitraster und wurde mittels zuvor festgelegter Schlagworte (vgl. Tabelle 4-5) durchgeführt, um eine größtmögliche Reproduzierbarkeit innerhalb einer kontinuierlich anwachsenden Projektmenge zu erreichen.

Diese Projekte wurden im Anschluss gesondert auf die in der aktuellen EU-Rohstoffliste als »kritisch« bezeichneten Rohstoffe untersucht und stellen die zweite Stufe des Rasters dar. Als Endpunkt des dritten Rasterschritts bleiben letztlich die Projekte übrig, die sich mit dem Recycling, der Rückgewinnung oder artverwandten Themen der in Kapitel 2 identifizierten Rohstoffe Neodym, Dysprosium, Gallium, Germanium und Indium befassen. Neodym und Dysprosium sind im weiteren Verlauf unter dem Sammelbegriff »SEE« zusammengefasst, da die Mehrheit der geförderten Projekte verfahrenstechnisch keine genaue Unterscheidung innerhalb der Gruppe der SEE vornimmt. Eine Ausweisung von Projekten, die spezifisch nur die Zielelemente Dysprosium und Neodym betrachten, ist jedoch möglich.

Neben den betrachteten Elementen sind relevante Informationen zu den Projekten wie Fördergeber, Projektstatus oder Projektstart erfasst, um eine zeitliche Verteilung auszuweisen und eventuelle Rückschlüsse auf mögliche Förderpeaks zu erhalten. Die in Stufe 3 des Rasters gelisteten Projekte werden nachfolgend genauer auf die eingesetzten Technologien und den Projektinhalt hin untersucht.

Tabelle 4-13: Auswerteraster der geförderten Projekte

Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Recyclingrelevante Projekte innerhalb der Förderprogramme	Projekte, die sich mit Rohstoffen beschäftigen, die in der Aufzählung der 20 kritische Rohstoffe der EU gelistet sind	Projekte mit Bezug zu den in Kapitel 3 identifizierten Rohstoffen

Nachfolgend sind in Tabelle 4-14 die im Rahmen der vorliegenden Kurzstudie untersuchten Förderinitiativen und Förderprogramme mit der absoluten Anzahl der gelisteten Projekte auf den jeweiligen Rasterebenen dargestellt. Die Projekterfassung stellt den aktuellen Stand zum 17.07.2015 dar. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse nur eine Momentaufnahme darstellen können, da viele Förderprogramme noch laufen und in Zukunft weitere Projektbewilligungen zu erwarten sind.

Tabelle 4-14: Untersuchte Förderinitiativen und Förderprogramme in Deutschland

Förderprogramm	Fördergeber	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
r <sup>2</sup>	BMBF	22	3	0
r <sup>3</sup>	BMBF	28	10	5
r <sup>4</sup> <sup>20</sup>	BMBF	24	9	8
r+Impuls <sup>21</sup>	BMBF	k.A.	k.A.	k.A.

<sup>20</sup> Zweite Phase aktuell noch in der Zuteilungsphase

<sup>21</sup> Aktuell noch in der Zuteilungsphase

Förderprogramm	Fördergeber	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Materialforschung für die Energiewende <sup>22</sup>	BMBF	24	4	2
Materialien für Ressourceneffizienz	BMBF	32	10	4
KMU-innovativ	BMBF	61	7	2
Kooperation Rohstofftechnologien Deutschland-Frankreich	BMBF	2	2	2
CLIENT <sup>23</sup>	BMBF	5	2	0
Deutsche Bundesstiftung Umwelt	DBU	21	19	8
Umweltinnovationsprogramm	BMUB	5	4	0
ForCYCLE	StMUV <sup>24</sup>	8	3	2
IGF <sup>25</sup> (AiF <sup>26</sup> »Otto von Guericke« e.V./ZIM <sup>27</sup> )	BMWi	6	4	2
Innovationsgutscheine »go-Inno«	BMWi	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 4-15: Untersuchte Förderdatenbanken zu deutschen und europäischen Projekten

Datenbank	Betreiber	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
DFG <sup>28</sup> GEPRIS <sup>29</sup>	DFG	17	6	1
CORDIS <sup>30</sup>	EU	241	52	18
<b>Gesamt</b>		<b>535</b>	<b>154</b>	<b>64</b>

Weiterhin wurden die Förderdatenbank des BMWi, die UFORDAT<sup>31</sup>-Datenbank des Umweltbundesamtes sowie der Förderkatalog der Bundesregierung als zusätzliche Validierung und Absicherung der Ergebnisse genutzt. Da in diesen Datenbanken auch die in Tabelle 4-14 gelisteten Programme gelistet sind, ist auf eine einzelne Ausweisung der jeweiligen Stufen zu verzichten, um Doppelzählungen zu vermeiden. Unter der Kategorie »Sonstige« sind Förderungen zusammengefasst, die keinem spezifischen Programm zugeordnet sind.

Bild 4-21 zeigt die Anzahl der Projekte in den deutschen Förderinitiativen und Förderprogrammen aufgeteilt auf die drei Stufen der Auswertungsmethode.

<sup>22</sup> Dritte Phase aktuell noch in der Zuteilungsphase

<sup>23</sup> Internationale Partnerschaften für nachhaltige Klimaschutz- und Umwelttechnologien und -dienstleistungen

<sup>24</sup> Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

<sup>25</sup> Industrielle Gemeinschaftsforschung

<sup>26</sup> Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen

<sup>27</sup> Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

<sup>28</sup> Deutsche Forschungsgemeinschaft

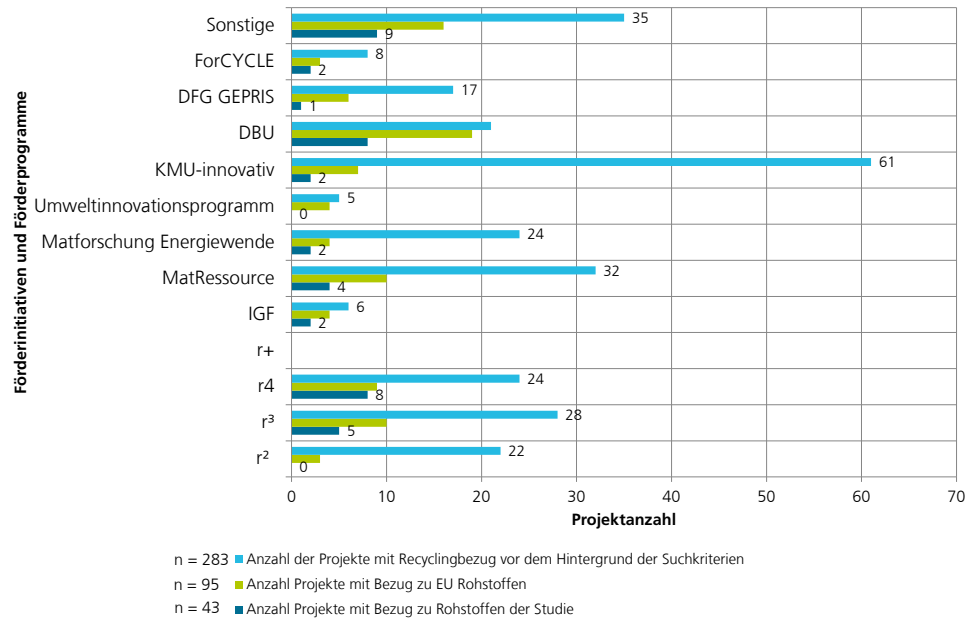
<sup>29</sup> Geförderte Projekte Informationssystem

<sup>30</sup> Community Research and Development Information Service

<sup>31</sup> Umweltforschungsdatenbank des Umweltbundesamtes



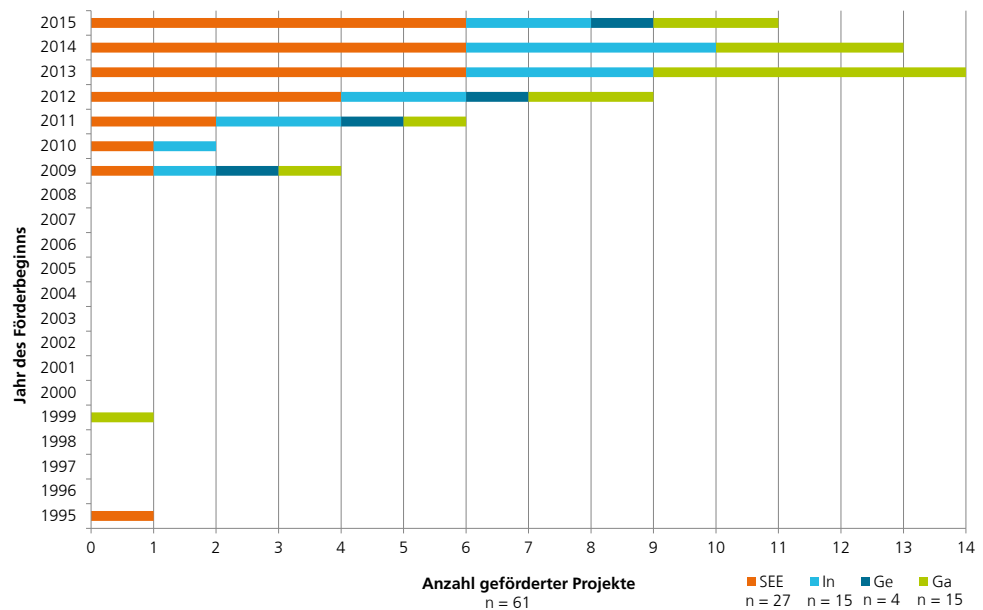
Bild 4-21:  
Förderprogramme und Förderinitiativen in Deutschland – ab 1995 (Stand 17.07.2015)



Insgesamt wurden nach dieser Analyse 283 Projekte mit Recyclingbezug durch deutsche Fördergelder unterstützt, davon rund 15 % mit Bezug zu den Zielrohstoffen Indium, Germanium, Gallium und SEE. Den dabei anteilmäßig mit 38 % am stärksten auf die Zielrohstoffe fokussierten Fördergeber stellt die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) dar. Die absolut größte Anzahl von Projekten im Recyclingbereich wurde durch die Förderinitiative KMU-innovativ des BMBF gefördert.

Nachfolgend wurden die in Stufe 3 erfassten Projekte im Hinblick auf das Jahr des Förderbeginns ausgewertet. Bild 4-22 zeigt, aufgeteilt auf die fünf Zielrohstoffe der Kurzstudie, den zeitlichen Verlauf des Förderbeginns der jeweiligen Projekte. Ausgehend vom Beginn der in Stufe 3 gelisteten Projekte, ist ein klarer Schwerpunkt innerhalb der letzten fünf Jahre zu beobachten (über 96 %), wobei im Jahr 2013 die meisten Projekte im Bereich der Zielelemente gestartet sind. Auffällig ist die Dominanz der SEE, die in 27 Projekten und damit in fast der Hälfte aller geförderten Projekte thematisiert werden. Germanium ist in lediglich rund 6 % der Projekte vertreten. Zu erwähnen ist auch, dass bereits Mitte und Ende der 1990er Jahre Projekte zu SEE und Gallium-Recycling gestartet sind, noch weit bevor die aktuell angespannte geopolitische Lage sowie der Einsatz in vielen Hochtechnologien thematisiert wurde.

Bild 4-22:  
Projektauswertung  
Deutschland nach  
definierten  
Zielelementen



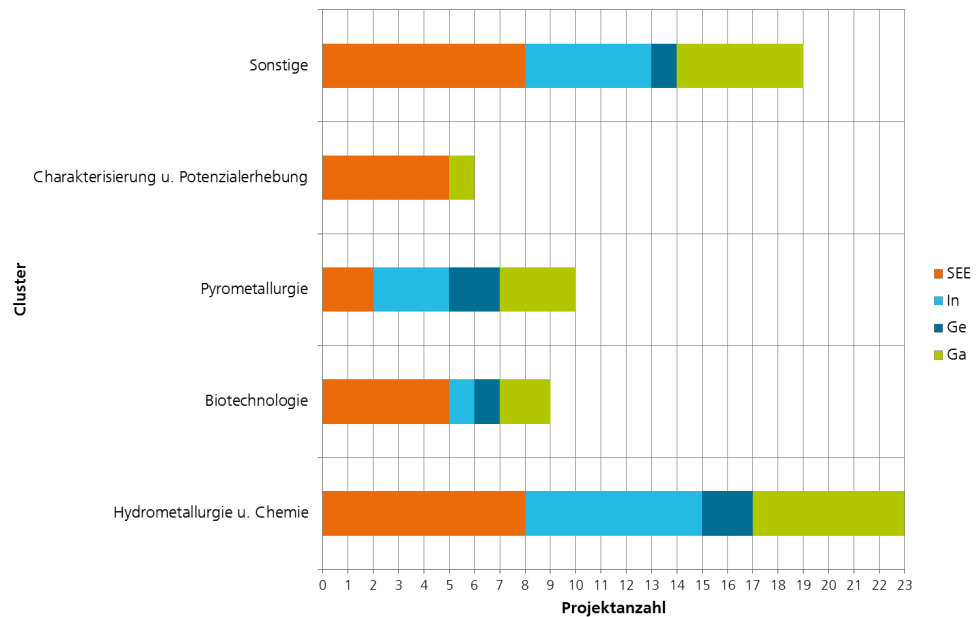
Die Forschungsprojekte, die die in Kapitel 2 festgelegten Rohstoffe betrachten und somit unter Stufe 3 des Auswertungsrasters erfasst wurden, wurden anschließend nach untersuchten Technologien gefiltert und inhaltlich in drei technische und zwei nicht-technische Cluster eingeordnet. Folgende Unterteilung wurde für die fünf Cluster vorgenommen:

- Chemische/hydrometallurgische Verfahren
- Biotechnologische Verfahren
- Pyrometallurgische Verfahren
- Charakterisierung und Potenzialerhebung
- Sonstige<sup>32</sup>

In Bild 4-23 ist dargestellt, wie sich die Zielelemente auf die jeweiligen Verfahren aufteilen, wobei eine klare Dominanz im Bereich der hydrometallurgischen Themen zu beobachten ist.

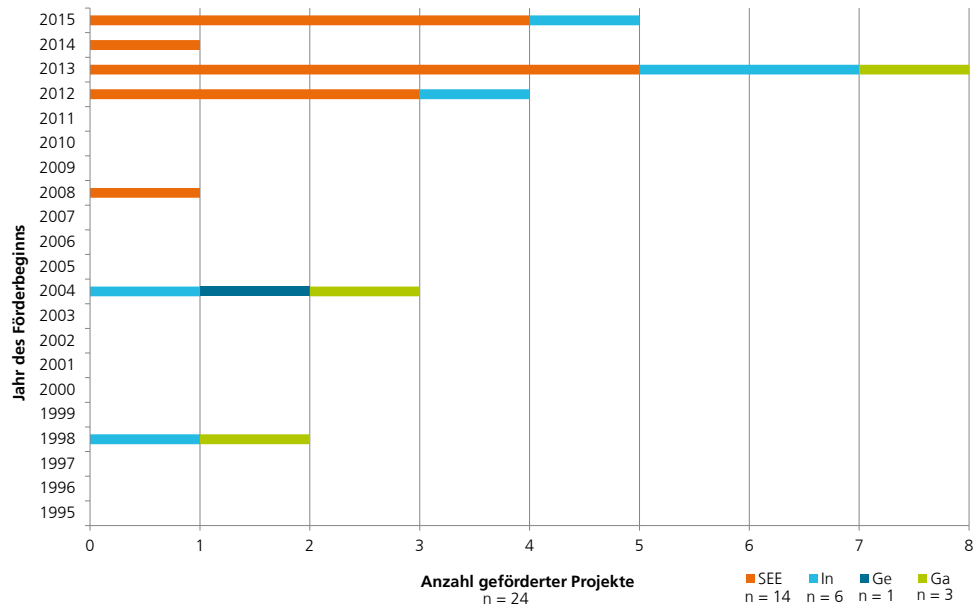
<sup>32</sup> Nicht eindeutig identifizierbare und kategorisierbare Projektinhalte

Bild 4-23:  
Projektauswertung  
Deutschland nach  
Prozessclustering – ab  
1995



Die durch die EU-Kommission geförderten Projekte sind nachfolgend separat ausgewiesen. Bild 4-24 zeigt, aufgeteilt auf die fünf Zielrohstoffe der Kurzstudie, den zeitlichen Verlauf des Beginns der im Rahmen von EU-Projekten bearbeiteten Forschungsvorhaben.

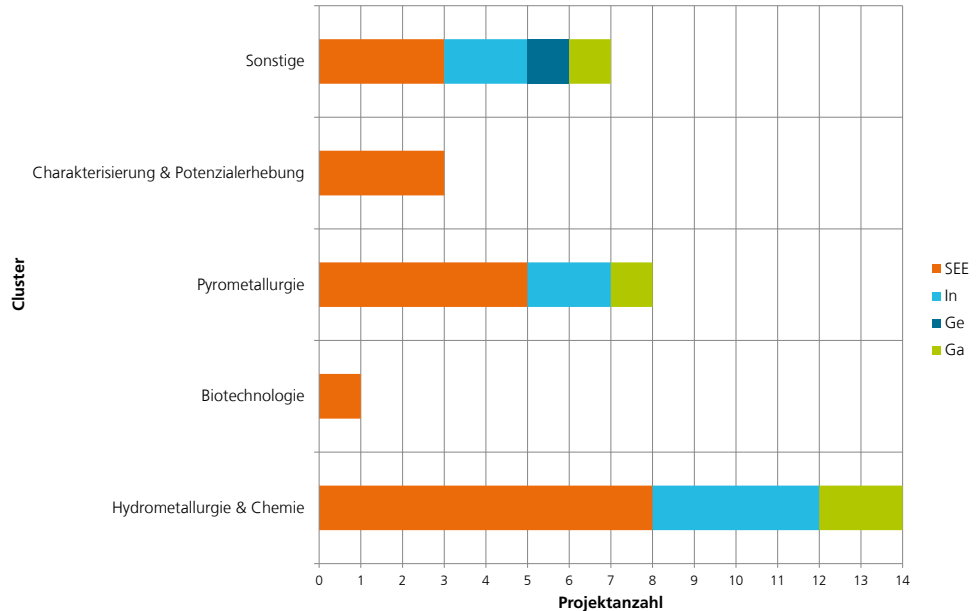
Bild 4-24:  
Projektauswertung EU  
nach definierten  
Zielelementen



Der Bereich der geförderten SEE-Projekte dominiert auch auf EU-Ebene die Förderlandschaft, wohingegen, analog zu Deutschland, die Germanium-Projekte deutlich unterrepräsentiert sind. Das Fördermaximum der gestarteten Projekte zu den identifizierten Zielelementen findet sich in der EU innerhalb der letzten drei Jahre, wobei das Jahr 2013 mit insgesamt acht Projektstarts das stärkste Jahr darstellt. Bild 4-25 zeigt nachfolgend die Aufteilung der Zielelemente auf

die gewählten Prozesscluster und verdeutlicht, wo der technische Schwerpunkt der Projekte in EU-Projekten angelegt ist.

Bild 4-25:  
Projektauswertung EU  
nach Prozessclusterung  
– ab 1995



Analog zur Verteilung der innerhalb von Deutschland geförderten Projekte ist ein Schwerpunkt im Bereich der Hydrometallurgie abzulesen. Im Gegensatz zu Deutschland sind auf EU-Ebene keine Projekte mit biotechnologischem Schwerpunkt zu verzeichnen, und auch Germanium wird bisher weder hydro-, noch bio- oder pyrometallurgisch im Rahmen eines EU-Projekts untersucht. Im Bereich Germanium besteht jedoch die Besonderheit, dass viele Anwendungen im militärischen Bereich liegen. Es wird vermutet, dass unter Geheimhaltung geforscht wird, jedoch vermehrt im Bereich der Anwendung und nicht im Bereich des Recyclings. Alle öffentlich geförderten Projekte sind jedoch durch die dargestellte Methodik erfasst.

Der Entwicklungsstand, der im Rahmen des BMBF r<sup>3</sup> geförderten Projekte wird durch die Begleitmaßnahme der Fördermaßnahme erhoben. In einer Zwischenauswertung zum April 2015 wurde der TRL von 17 Projekten abgefragt, wobei sieben Projekte aus dem Bereich Recycling stammen. 43 % dieser Projekte erwarten zum Ende des Projektes einen Entwicklungsstand bis TRL 4, jeweils 29 % erwarten eine Umsetzung in die Einsatzumgebung (TRL 5+6) bzw. in den erfolgreichen Einsatz (TRL 7-9). Laut telefonischer Auskunft zu dieser Auswertung hängt die tatsächliche Umsetzung der mit sechs und höher bewerteten Projekte stark von der Wirtschaftlichkeit der Verfahren ab [Kleeberg-2015].

**Fazit 4 »Ausrichtung prüfen und zielgerichtete Vergabe«**

Sowohl auf EU- als auch auf Bundesebene ist ein Fokus auf einzelne Elementgruppen und Technologien zu beobachten. Bei der Projektvergabe sollte daher u. U. mit einbezogen werden, wie häufig Projekte zu spezifischen Elementen bereits gefördert wurden und ob ggf. gezielt auf unterrepräsentierte Elemente geachtet werden muss.

## 5 Forschungsbedarf

### 5.1 Vorgehensweise und Hintergrund

Der weitere Forschungsbedarf wurde durch Auswertung der Ergebnisse von Kapitel 4 hergeleitet und mit weiteren Aspekten der durchgeführten Expertengespräche ergänzt und abgeglichen.

### 5.2 Forschungslücken bei den betrachteten Elementen

Bei der Auswertung der erhobenen Daten nach den Elementen zeigt sich, dass zu Fragestellungen des Recyclings von Germanium aus EoL-Produkten nur vereinzelt geforscht wird. Es gibt nur wenige Forschungsprojekte, die sich allerdings gleichmäßig über mögliche Recyclingverfahren verteilen (je zwei Projekte im Bereich Hydro- und Pyrometallurgie, ein Projekt im Bereich Biotechnologie). Dies spiegelt sich auch in der Literaturrecherche wider. Bei der Auswertung der Datenbank »ScienceDirect« wurden für das Recycling bzw. Recovery von Germanium gerade 20 als relevant eingestufte Veröffentlichungen gefunden, die in erste Linie in »Chemical Engineering« und »Environmental Science« publiziert wurden. Während sich die Forschungsprojekte gleichmäßig auf die Verfahren verteilen, werden in der wissenschaftlichen Fachliteratur in erster Linie Ergebnisse zum hydrometallurgischen Recycling von Germanium berichtet. Die geringere Forschungsaktivität bei Germanium findet sich auch bei der Patentlage wieder. Abgesehen von den Einzelergebnissen von Neodym und Dysprosium, die allerdings in der Sammelgruppe der Seltenen Erden vertreten sind, finden sich für Germanium in Kombination mit den gesuchten Verfahrensbegriffen wenige Patentanmeldungen.

Germanium wird in Glasfaserkabeln, z. B. Tiefseekabeln, in der Infrarotoptik, bei der Polymererzeugung und in der Elektronik eingesetzt. Produktionsabfälle z. B. aus der Glasfaserkabelproduktion werden bereits recycelt (siehe Kapitel 2, [Daub-2015]). Möglicherweise sind derzeit die Rückläufe aus den Produkten für ein EoL-Recycling nicht gegeben, bzw. sind diese Produkte nicht so sehr in der Wahrnehmung wie Elektro- und Kommunikationsgeräte des täglichen Bedarfs. In der Erforschung befindliche Recyclingansätze sind z. B. Flüssig-Ionenaustausch-Verfahren oder biotechnologische Verfahren (z. B. BMBF-r<sup>3</sup>-Projekt PhytoGerm).

Für die anderen in dieser Studie betrachteten Elemente werden in mehreren Forschungsprojekten Recyclingverfahren entwickelt.

### 5.3 Forschungslücken bei den betrachteten Recyclingverfahren

Die Recyclingverfahren wurden in dieser Studie nach hydrometallurgischen, biotechnologischen und pyrometallurgischen Verfahren unterteilt. Bei den Forschungsprojekten überwiegen die hydrometallurgischen Verfahren gegenüber den biotechnologischen und den pyrometallurgischen Verfahren, wobei diese in Deutschland in nahezu gleich vielen Projekten betrachtet werden. Auch im Rahmen der europäischen Förderung gibt es mehr Projekte zu hydrometallurgi-

schen Verfahren. Allerdings gibt es auf EU-Ebene, auf Basis der ausgewerteten Datenbanken, nur *ein* Projekt, das sich mit biotechnologischen Verfahren zur Rückgewinnung von Wertstoffen, in diesem Fall Seltenen Erden, beschäftigt. Auch bei der Auswertung der Literaturrecherche überwiegen die Publikationen zu hydrometallurgischen Verfahren. Veröffentlichungen zu pyrometallurgischen Verfahren betragen weniger als ein Drittel der Anzahl von Veröffentlichungen zu hydrometallurgischen Verfahren. Zu biotechnologischen Verfahren wird nur vereinzelt berichtet.

Allerdings lässt sich aus dieser Erkenntnis nicht direkt auf eine Forschungslücke im Bereich der pyrometallurgischen oder biotechnologischen Verfahren schließen. Gerade pyrometallurgische Verfahren setzen eine sehr viel aufwendigere, z. T. größer dimensionierte Forschungsinfrastruktur voraus als z. B. die hydrometallurgischen Verfahren. Pyrometallurgische Techniken sind nur in wenigen Universitäten aufgebaut, während Labore für chemische Versuche – in meist kleinem Maßstab (»Reagenzglas«) - weit verbreitet sind.

#### 5.4 Forschungslücken nach dem Entwicklungsstand

Die Auswertung der Literatur und soweit möglich der Forschungsprojekte nach dem Entwicklungsstand in Anlehnung an das TRL-System zeigt, dass nur sehr wenige Forschungsprojekte in ihrer Gesamtheit in die großtechnische Praxis umgesetzt bzw. dort angewendet werden. Es werden allerdings einzelne Methoden oder Aspekte eines Forschungsprojektes umgesetzt (z. B. betriebliche Optimierungen, Charakterisierungsverfahren). Die Umsetzung einer Verfahrensentwicklung ist mit hohen finanziellen Risiken verbunden. Da ein Großteil der Forschungsprojekte im Labormaßstab bis maximal im diskontinuierlichen Technikumsmaßstab betrieben wird, fehlen häufig grundlegende Daten für ein Upscaling oder auch für eine belastbare Machbarkeitsstudie zur Entscheidung über eine Finanzierung. Dies betrifft z. B.

- Verschleißkosten,
- tatsächlicher Verbrauch an Betriebs- und Hilfsstoffen,
- Bezugssicherheit bzw. Bezugskosten von Betriebsstoffen,
- Energieverbräuche und
- Energielastgänge.

Diese Daten wie auch Erfahrungen zur Betriebssicherheit könnten über Demonstrationsanlagen, die einen upscalefähigen Prozess abbilden, erhoben werden. An solchen Anlagen könnten ebenfalls kontinuierliche Optimierungen erforscht bzw. entwickelt werden. Diese Anlagen sind allerdings für sich betrachtet nicht wirtschaftlich. Eine Möglichkeit der Unterstützung solcher Projekte kann das BMBF-Programm *r+Impuls* bieten. Die Projektanträge der ersten Runde sind derzeit noch in der Zuteilungsphase, so dass eine Auswertung dieses Programms nicht erfolgen konnte. Es sollten allerdings Kriterien entwickelt werden, *welche* Labor- und Technikumsverfahren bis in den Demonstrationsmaßstab weiterentwickelt werden sollen. Hier herrscht angesichts der Breite der bislang geförderten Vorhaben große Unsicherheit.

## 5.5 Hemmnisse auf dem Weg in die praktische Umsetzung

Zur besseren Einordnung der theoretischen Ergebnisse und der Klärung, was nötig ist, um ein Verfahren aus der Forschung in die Praxis umzusetzen, wurden Gespräche mit Experten aus Forschung und Industrie geführt (vgl. Kap. 1). Folgende Hemmnisse konnten dabei identifiziert werden:

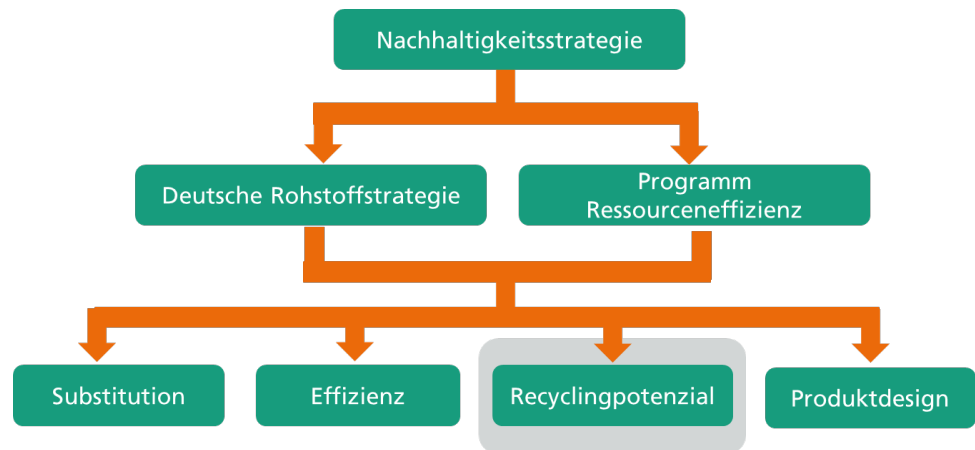
- **Dokumentation von Forschungsprojekten:** Öffentlich-zugängliche Informationen zu Forschungsprojekten sind Veröffentlichungen, Zwischen- und Abschlussberichte. Um die Ergebnisse eines Forschungsprojektes direkt weiterzuentwickeln und auf die nächste Praxisstufe zu heben, sind weitere Informationen notwendig als diese Dokumentationen i. d. R. enthalten. Häufig fehlen belastbare Massenbilanzen inklusive einer Charakterisierung aller auftretenden Stoffströme (verwendete Substanzen, erzeugte Produkte, erreichte Produktqualitäten, anfallende Reststoffe). Diese Daten sollten unter Dokumentation des Entwicklungsstandes (z. B. Laborverfahren) im Abschlussbericht dokumentiert werden. Hierzu zählen neben der genauen Bezeichnung z. B. von verwendeten Chemikalien auch die dazugehörigen Datenblätter. In der Dokumentation sollten auch, zumindest qualitativ die Bezugsquelle und die Bezugskosten von Hilfs- und Betriebsstoffen angegeben werden. So könnte bei einer Prüfung eines Abschlussberichts abgeschätzt werden, ob die Mengen z. B. an Extraktionsmitteln, die bei einem Upscaling benötigt werden, wirtschaftlich zu beziehen sind.
- **Erreichte Produktqualitäten:** Bei einer Verfahrensentwicklung ist es entscheidend, welche Produktqualitäten erzeugt werden und ob diese etablierten Absatzwegen zugeführt werden können. Wenn erst Absatzwege erschlossen werden müssen, oder eine weitere Optimierung der Produktqualität erfolgen muss, stellt sich dies als ein erhebliches Hemmnis für die praktische Umsetzung dar.
- **Einsatzmengen und -qualitäten:** Die hier betrachteten Wertstoffe sind nur in geringen Mengen in EoL-Produkten vorhanden, dafür aber teilweise über mehrere Produktgruppen verteilt. Vor dem Hintergrund der hohen Innovationszyklen dieser Produkte stellt sich die Herausforderung, wie diese Mengen zu erfassen sind und wie auf wechselnde Qualitäten und Mengen der Einsatzmaterialien einer potenziellen Anlage reagiert werden kann/soll. Hier fehlen marktreife Lösungen für Sammelsysteme und Anlagenkonzepte, deren Prozessschritte an einen Wechsel in der Materialzusammensetzung adaptiert werden können.
- **Anlagengröße:** Die bisherigen Erfahrungen der Siedlungsabfallwirtschaft basieren meistens auf Anlagen, die nach Anlagendurchsatz ausgelegt und optimiert sind. Dieser ist dann auch für die Wirtschaftlichkeit der Anlage entscheidend. Die Frage ist, ob Recyclingverfahren für kritische Rohstoffe nicht analog zur Mikro-Reaktionstechnik entwickelt werden müssten. Eine »Mikro-Recyclingtechnik« könnte eher auf die oben angesprochenen Herausforderungen der Materialschwankungen reagieren, da sie modularisiert, flexibel und adaptierbar geplant werden könnte.

## 6 Überblick über vorhandene Handlungsempfehlungen

### 6.1 Motivation und Vorgehensweise

Zur Einordnung der in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Hemmnisse, Empfehlungen und Thesen wurden zunächst Studien, Strategiepapiere und ähnliche Dokumente mit Bezug auf die Fragestellungen der Kurzstudie ausgewertet. Die Einbettung des Begriffs »Recyclingpotenzial« in die deutschen Rohstoff- bzw. Ressourceneffizienzlandschaft zeigt Bild 6-1. Anschließend wurde der Fokus auf den EU-Rahmen sowie weitere relevante Studien erweitert. Die dort adressierten Dokumente wurden daraufhin untersucht, ob es bereits Handlungsempfehlungen zum Recycling von Technologiemetallen gibt – auf entsprechenden Vorschlägen können Handlungsempfehlungen aufbauen oder an ihnen anschließen. Aus diesen Analysen werden in Kapitel 7 konkrete Handlungsempfehlungen herausgearbeitet, die bestimmte Themenbereiche als Motivation für die jeweilige Handlungsempfehlung adressieren und in Bezug auf identifizierte Forschungslücken und Hemmnisse einen neuen Nutzen liefern können.

Bild 6-1:  
Einordnung Begriff  
»Recyclingpotenzial«



### 6.2 »Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung« (2002, 2012)

#### Ziele

Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung wird als ein Prozess verstanden, in dem sich politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Gruppen im Dialog mit der Frage befassen, wie wir in Zukunft leben wollen. Sie fußt auf Managementregeln, Indikatoren und zugehörigen qualitativen sowie quantitativen Zielen, die Deutschland im Rahmen einer an Nachhaltigkeitsprinzipien ausgerichteten Entwicklung erreichen will. Zu den Zielen gehört u. a. die Rohstoffproduktivität, die sich bis 2020 gegenüber 1994 verdoppeln soll. Dies kann z. B. auch durch Recycling geschehen. Allerdings orientiert sich die Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 weniger an konkreten technischen Maßnahmen, sondern vielmehr an strategischen und managementbezogenen Handlungsbereichen und Leitlinien. Etwaige Kritikalitäten bei Mineralien und/oder (Technolo-



gie-)Metallen wurden 2002 noch nicht gesehen. In bestimmten Zeitabständen werden Fortschrittsberichte zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie vorgelegt. Der jüngste Fortschrittsbericht wurde 2012 herausgegeben [Bundesregierung-2012]. Dort wird konstatiert, dass es für viele Rohstoffe kein Nachhaltigkeitsmanagement gibt.

### **Handlungsfelder und -empfehlungen**

Die Nachhaltigkeitsstrategie und ihre Fortschrittsberichte liefern wegen ihres hohen Abstraktionsgrades keine konkreten Handlungsempfehlungen zum Recycling von Technologiemetallen. Aus ihren Handlungsfeldern leiten sich jedoch eine Vielzahl von rohstoff- und recyclingorientierten Umsetzungsprozessen ab (vgl. u. a. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm, Kapitel 6.4).

## **6.3 »Rohstoffstrategie der Bundesregierung« (2010)**

### **Ziele**

Die Rohstoffstrategie der Bundesregierung bezieht sich vor allem auf Industrierohstoffe, für die eine hohe Importabhängigkeit besteht, und will mit geeigneten rohstoffpolitischen Maßnahmen unerwünschte Marktentwicklungen begrenzen und ihre Folgen mildern. Dieser Ansatz fußt u. a. auf den Erkenntnissen, dass wichtige rohstoffverbrauchende Entwicklungs- und Schwellenländer ihre Rohstoffpolitik strategisch ausrichten, um eigene rohstoffwirtschaftlichen Interessen zu befriedigen und dass Verknappungen an den Rohstoffmärkten Preiseffekte haben, die bis zu Produktionseinschränkungen führen und Innovationen behindern können. Kernziele der Rohstoffstrategie sind daher u. a. [BMWI-2010]:

- Unterstützung der Wirtschaft bei der Diversifizierung der Rohstoffbezugsquellen,
- Verbesserung der Zusammenarbeit mit Partnerländern,
- Unterstützung der Wirtschaft bei der Erschließung von Synergien durch nachhaltiges Wirtschaften und Steigerung der Materialeffizienz und
- Weiterentwicklung von Technologien und Instrumenten zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für das Recycling.

### **Handlungsfelder und -empfehlungen**

Die Rohstoffstrategie legt u. a. Schwerpunkte auf die Effizienz bei der Rohstoffgewinnung, der Rohstoffverarbeitung sowie die Stärkung des Recyclings, wobei sie vor allem Massenstoffströme (d. h. keine dissipativ verarbeiteten Technologiemetalle) adressiert. Ein spezieller Fokus auf kritische und/oder strategische Technologiemetalle besteht nicht.

## **6.4 »Deutsches Ressourceneffizienzprogramm - ProgRess« (2012)**

### **Ziele**

*»Ziel des deutschen Ressourceneffizienzprogramms ist es, die Entnahme und Nutzung natürlicher Ressourcen nachhaltiger zu gestalten sowie die damit verbundenen Umweltbelastungen so weit wie möglich zu reduzieren«.* Der Fokus

von ProgRes liegt auf abiotischen, nicht-energetischen Rohstoffen<sup>33</sup>, ergänzt um die stoffliche Nutzung biotischer Rohstoffe. ProgRes ist eng mit der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Kap. 6.2) verknüpft, indem dort z. B. das Ziel formuliert ist, Deutschlands Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 zu verdoppeln [BMUB-2015a].

### Handlungsfelder und -empfehlungen

ProgRes ist strukturiert nach Leitideen, Handlungsfeldern, Handlungsansätzen, Maßnahmen und enthält eine detaillierte Betrachtung ausgewählter Stoffströme. **Leitidee 3** lautet: »Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland schrittweise von Primärrohstoffen unabhängiger machen, die Kreislaufwirtschaft weiterentwickeln und ausbauen«.

Innerhalb der Leitidee 3 wird zum Recycling ausgeführt: »Produktdesign, das komplexe Produkte aus leicht demontierbaren Elementen gestaltet, kann das Recycling wesentlich erleichtern. [...] Zunehmend wichtig wird die Entwicklung von Techniken, die das Recycling von bisher nicht nutzbaren, weil zum Beispiel in Kleinstmengen oder in Verbundwerkstoffen eingesetzten, kritischen Werkstoffen ermöglichen.« Damit werden die zentralen Gedanken zum Recyclingpotenzial von Technologiemetallen aus dieser Studie adressiert:

- Komplexes Produktdesign mit dissipativer Verwendung von hochspeziellen Elementen (wie es heute vielfach vorzufinden ist) erschwert das Recycling und
- Techniken zum Recycling von dissipativ verteilten Elementen sind *nicht* Stand der Technik.

Im **Handlungsfeld 4** geht es folglich darum, eine »ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft auszubauen« [BMUB-2015a].

Auch ProgRes kommt zu dem Schluss, dass die – auch als kritisch oder strategisch eingestuften - Technologiemetalle vielfach in *sehr geringen Mengen pro Produkt oder Produktkomponente* eingesetzt werden (zum Beispiel Seltene Erden in Mobiltelefonen), so dass es logistisch und technisch zu aufwendig ist, sie zurückzugewinnen und dem Stoffkreislauf wieder zuzuführen – jedenfalls solange ihre globale Verfügbarkeit zu tolerablen Preisen nicht gravierend eingeschränkt ist. Vor diesem Hintergrund möchte die Bundesregierung unter anderem folgende Maßnahmen im Bereich des Recyclings von Technologiemetallen unterstützen [BMUB-2015a]:

- Förderung des weltweiten Wissens- und Techniktransfers zur Erhöhung der Verwertung edel- und sondermetallhaltiger<sup>34</sup> Altprodukte (zum Beispiel EAG, Autokatalysatoren) → Verbesserung der Wissensbasis
- Optimierung der Sammellogistik und Behandlung für Schrotte, deren Legierungen reich an Edel- und Sondermetallen sind

<sup>33</sup> In anderen Quellen, z. B. [Destatis-2014], werden auch die fossilen energetischen Rohstoffe zur Klasse der abiotischen Rohstoffe gezählt.

<sup>34</sup> Mit Sondermetallen sind hier auch »Technologiemetalle« gemeint.

- Untersuchung und gegebenenfalls Umsetzung von Möglichkeiten zur Optimierung der Sammellogistik und Behandlung für EAG, um zukünftig auch höhere Anteile an Edel- und Sondermetallen zurückgewinnen zu können
- Förderung der Erforschung und Entwicklung neuer Recyclingverfahren

Auch in ProgRes wird den Demonstrationsprojekten große Bedeutung beigemessen. [BMUB-2015a].

ProgRes ist ein wichtiges, langfristiges Rahmenwerk auch für die Bewertung des Recyclingpotenzials von Technologiemetallen. ProgRes sieht als Ursachen für die fluktuierende Verfügbarkeit dieser und anderer Rohstoffe Preissteigerungen und Preisschwankungen, die durch steigende Nachfrage, Spekulation und politische Eingriffe verstärkt werden, sowie Unsicherheiten über die – reale, z. B. geologische – Verfügbarkeit von Rohstoffen. Aus gesellschaftspolitischer Sicht unterstützt ProgRes das Recycling von Technologiemetallen, außer es ist technisch – und damit auch ökonomisch – zu aufwendig oder es bietet gegenüber dem Primärrohstoffeinsatz oder anderen technologischen Alternativen (Substituierung, alternative konstruktive Lösungen) keinen Vorteil.

Der aktuelle Entwurf zur Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes II) vom 10. August 2015 weist kreislaufwirtschaftliche Ziele und Indikatoren aus. Hierunter fallen u. a. die Verbesserung des Altfahrzeugrecyclings durch die Separation von Bauteilen der Fahrzeugelektronik vor dem Shreddern (Ziel 15 kg pro Altfahrzeug) und die Stärkung der Sammlung und des Recyclings von Elektroaltgeräten EAG (Ziel: Dauerhafte Erhöhung der Sammelquote auf mindestens 65 %) [BMUB-2015b]. In den Handlungsansätzen 2016 bis 2019 wird unter 7.4.6 als Maßnahme die »Entwicklung von innovativen Erfassungssystemen auf Basis zu erstellender Kataster von Abfallströmen ähnlicher Metallzusammensetzung (»Pooling«)« genannt. Diese Maßnahme adressiert die Handlungsempfehlungen dieser Studie zur Informationsbereitstellung über den Lebensweg sowie zum Aufbau eines Katasters über Sekundärrohstoffquellen (siehe Kapitel 7.2). Wegen der noch erforderlichen Ressortabstimmung und der laufenden öffentlichen Konsultation wird auf ProgRes II hier nicht weiter eingegangen.

## 6.5 Rohstoffstudien der BGR/DERA

### Ziele

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) fungiert als Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Sie berät die Bundesregierung sowie die deutsche Wirtschaft in allen geowissenschaftlichen und rohstoffwirtschaftlichen Fragen. Mit der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) unterstützt sie die nationale Wirtschaft in Fragen der Verfügbarkeit und nachhaltiger Nutzung von Rohstoffen und deren aktueller Marktentwicklung. In der Publikationsreihe »DERA Rohstoffinformationen« liegen zahlreiche Schriften vor, die sich explizit mit ausgewählten, knappen Rohstoffen beschäftigen und sie in Hinblick auf Ihre Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und das Versorgungsrisiko bewerten.

### Handlungsfelder und -empfehlungen

Für folgende knappe Rohstoffe wurden bereits »DERA Rohstoffinformationen« veröffentlicht: Zink, Zinn, Wolfram, Antimon, Kupfer und Zirkon.

Die Veröffentlichungen bilden eine sehr gute, langfristig verfügbare Grundlage für den Aufbau einer Wissensbasis, die Rohstoffbedarfe in Deutschland sowie Angebot und Verbleib von Sekundärrohstoffen miteinander verknüpft. Damit können neue Geschäftschancen für die Recyclingbranche sowie ein zusätzlicher Kompetenzaufbau entstehen. Konkrete Handlungsfelder für die fünf Technologiemetalle dieser Studie liegen – noch – nicht vor.

## 6.6 Rohstoffstrategie für Europa

### Ziele

»Die Rohstoffinitiative – Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern (KOM(2008)0699)« der Europäischen Kommission wurde am 4. November 2008 veröffentlicht. Unter das dritte Ziel der Rohstoffinitiative »Senkung des Primärrohstoffverbrauchs in der EU« fällt auch das Recycling von Altstoffen und Produkten. Damit die Wiederverwendung und das Recycling von Produkten und Stoffen in der EU auf ein wirtschaftlich bedeutendes Niveau steigen können, sollten durch einen angemessenen Rechtsrahmen, allgemein anerkannte Mindeststandards und gegebenenfalls ein Zertifizierungssystem Transparenz und fairer Wettbewerb gewährleistet werden [KOM-2008].

### Handlungsfelder und -empfehlungen

Bezüglich des Recyclings soll geprüft werden, wie produktbezogene Richtlinien (z. B. Ökodesign, WEEE) geändert werden könnten, um das Recycling zu stärken, auch die Recyclingquote bei wertvollen Rohstoffen einschließlich Seltenen Erden, z. B. durch gezieltere Anforderungen an die Demontage, zu erhöhen und entsprechende Änderungen dieser Richtlinien vorzuschlagen. Des Weiteren wird vorgeschlagen:

- Projekte im Bereich der Rückgewinnung nützlicher Stoffe zu fördern,
- eine Datenbank über Bergbauabfälle zu erstellen,
- zu prüfen, wie die Europäische Investitionsbank dazu beitragen kann, das finanzielle Risiko von Investitionen in Recyclinganlagen mit innovativen Technologien zu verringern.

In der »Leitinitiative der Strategie Europa 2020 Innovationsunion« [Kom-2010] wurde u. a. die Innovationspartnerschaft »Nachhaltige Versorgung mit nicht-energetischen Rohstoffen für eine moderne Gesellschaft« geprüft. Ziel dieser Partnerschaft ist u. a. die Demonstration von zehn innovativen Pilotanlagen für Rohstoffextraktion, -verarbeitung und -recycling sowie die Suche nach Ersatzstoffen für mindestens drei Schlüsselanwendungen kritischer Rohstoffe. Eine Studie zu Pilotanlagen und innovativen Technologien wurde seitens der European Innovation Partnership durchgeführt. Die Ergebnisse der Studie sind noch nicht veröffentlicht.

## 6.7 European Rare Earths Competency Network (ERECON)

### Ziele

Das European Rare Earths Competency Network ERECON ist auf Initiative der DG Enterprise ins Leben gerufen worden und setzt sich zusammen aus Experten aus Industrie, Wissenschaft und Politik, die sich mit der Versorgungssicherheit Europas mit Seltenen Erden<sup>35</sup> beschäftigen.

### Handlungsfelder und -empfehlungen

Das ERECON-Netzwerk weist in seiner Studie [ERECON-2015] auf den zunehmenden Bedarf an Seltenen Erden aufgrund der Verbreitung von neuen Technologien (z. B. Hybridfahrzeuge, Windenergieanlagen, Beleuchtung) und die ungewisse Versorgung mit Seltenen Erden hin. Eine Wiederholung der Versorgungskrise in 2010/2011 wird als eine realistische Möglichkeit gesehen.

Die Autoren empfehlen, die Versorgung mit Seltenen Erden breiter aufzustellen. Konkrete politische Handlungsempfehlungen des ERECON-Netzwerks sind:

- Aufrechterhaltung und Stärkung der europäischen SEE-Fähigkeiten und Wissensbasis durch Forschungsförderung, wissenschaftliche und technische Bildung, sowie internationale Kooperationen
- Schaffung einer Informationsbasis als Entscheidungsgrundlage für SEE durch ein European Critical Materials Observatory
- Unterstützung von vielversprechenden Technologien durch Förderung von industriegeführten Pilotanlagen für innovative Verfahren zur Gewinnung schwerer SEE
- Kofinanzierung von Vor-Machbarkeitsstudien und bankfähigen Machbarkeitsstudien für Europäische schwere-SEE-Explorationen
- Entwicklung einer SEE-freundlichen Abfallwirtschaft durch Ökodesign, Anreizsysteme zur Sammlung prioritärer Abfallprodukte, und eine straffe Politik und Regulierung
- Erhöhung der Versorgungssicherheit und Abbau von Risiken von strategischen SEE-Investmentfällen durch eine verstärkte Kooperation zwischen europäischen Endverbrauchern und anderen Stakeholdern

Informationsdefizite über Mengen an SEE-Material, unzureichende Sammelquoten und ein recyclingunfreundliches Produktdesign werden als Hemmnisse zur Steigerung der Recyclingquoten aus EoL-Produkten gesehen.

## 6.8 Internationale Aktivitäten im Bereich der Ressourceneffizienz

### Ziele/Inhalte ENTIRE

Wie in Bild 6-1 gezeigt, ist das Thema »Recyclingpotenzial« ein Teilaspekt des Oberbegriffs »Ressourceneffizienz«. Im Forschungsbericht »ENTIRE - Entwick-

<sup>35</sup> Die in dieser Studie u. a. untersuchten Elemente Neodym und Dysprosium gehören zu Seltenenerdmetallen (SEE). Seltene Erden werden insgesamt zur Gruppe der kritischen Technologiemetalle gezählt.

lung der internationalen Diskussion zur Steigerung der Ressourceneffizienz« werden die Diskussionen und Entwicklungen im Bereich Ressourceneffizienz der UN, der OECD, der EU sowie einzelner bedeutender Länder für mineralische Rohstoffe dargestellt. Der Forschungsbericht berücksichtigt dabei ausgewählte Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette (Abbau und Aufbereitung von Rohstoffen, Grund- und Werkstoffherzeugung, Halbzeugproduktion, Produktion von Waren/Produkten, Nutzungsphase und Abfallverwertung), stellt wesentliche Motivationen für staatliches Handeln dar und leitet Handlungsfelder bzw. politische Informationen ab, mit denen eine staatliche Steuerung in einzelnen Ländern erreicht wird [TU-Clausthal-2013].

### **Handlungsfelder und –empfehlungen**

Die Handlungsfelder umfassen [TU-Clausthal-2013] fiskalische, handelspolitische und umweltpolitische Instrumente. Sie adressieren forschungspolitische Aspekte, staatliche Förderung von Bildung und Ausbildung sowie Wissens- und Know-how-Transfer.

### **Ziele/Inhalte G7-Allianz für Ressourceneffizienz**

Auf dem G7 Gipfel vom 7. bis zum 8. Juni 2015 wurde unter anderem beschlossen, eine »G7-Allianz für Ressourceneffizienz« zu gründen. Fokus der Arbeiten dieser Allianz sollen auf Abfallmanagement, dem Beginn der Wertschöpfungskette und der intelligenten Produktgestaltung liegen. Die Allianz wird als Plattform und Forum verstanden, die den Austausch und die Diskussion von länderspezifischen Lösungen im Bereich der Ressourceneffizienz bereichern und die Vernetzung der Aktivitäten zwischen den G7-Staaten verstärken soll. Geplant sind jährliche Themenworkshops zu aktuellen technischen-ökologischen, rechtlichen und sozio-ökonomischen Fragestellungen wie etwa Öko-Design, Lebenszyklusanalysen und Datenerhebung oder Förderung und Forschung im Bereich Ressourceneffizienz und deren Berücksichtigung in Bildung und Ausbildung. Besonderes Augenmerk liegt auch auf der geplanten engen Zusammenarbeit mit einschlägigen Wirtschaftsinitiativen aber auch anderen internationalen Organisationen wie dem International Resource Panel (IRP) der Vereinten Nationen [Bundesregierung-2015].

### **Handlungsfelder und -empfehlungen**

- Themenworkshops und Videokonferenzen
- Synthesebericht
- Internationaler Austausch von »best practice« Lösungen

**Einschätzung:** Außer den fiskalischen und handelspolitischen Instrumenten im ENTIRE-Programm haben die restlichen Handlungsfelder alle einen Bezug zu den hier untersuchten fünf Technologiemetallen. Sie sind analog zu den geplanten Bemühungen der G7 allerdings sehr abstrakt angelegt und ließen sich auch auf andere Technologiefelder übertragen bzw. dort anwenden. Insbesondere die Vorschläge zu Information, Bildung/Ausbildung sowie Wissens- und Know-how-Transfer werden in dieser Studie wieder aufgegriffen und auch durch die G7-Allianz für Ressourceneffizienz adressiert.

## 6.9 Zukunftsbetrachtungen und Innovationspotenzial: Industrie 4.0 - Rohstoffwende

### Ziele/Inhalte

Das Industrie 4.0-Konzept, d. h. die hochgradig vernetzte Echtzeit-Kommunikation zwischen Maschinen, kann auch in der Entsorgungswirtschaft Innovationsprozesse auslösen, mit denen es gelingt, mehr Technologiemetalle zu detektieren und sie in den Kreislauf zurückzuführen. In der Broschüre zur BMBF-Hightech-Strategie Zukunftsbild »Industrie 4.0« wird die Entsorgungswirtschaft der Zukunft wie folgt charakterisiert [BMBF-2013]: *»Auf Basis der digitalen Produktgedächtnisse hat sich ein lukratives Geschäft im Recycling entwickelt. Selbst komplizierte technische Geräte, wie Smartphones oder Computer, werden im Jahr 2025 zu geringen Kosten in ihre Komponenten zerlegt und entsorgt. Technologisch komplexe Verwertungsverfahren erlauben es, Wertstoffkreisläufe zu schließen und zu optimieren. Die damit verbundene Kostensenkung ist betriebswirtschaftlich effizient und zugleich ein wirksamer Beitrag zur sorgsamem Ressourcennutzung.«*

### Handlungsfelder und -empfehlungen

Eine im Bauteil gespeicherte Information über Inhaltsstoffe und deren Recyclingmöglichkeiten würde Recyclingmöglichkeiten deutlich verbessern, allerdings müssten für diese (Forschungs-)Vision die Hersteller einzelner Bauteile bezüglich ihrer Produktverantwortung und eines recyclinggerechten Designs voraussichtlich höhere Aufwendungen<sup>36</sup> auf sich nehmen. Wie eine kostengünstige, bauteilintegrierte Informationsbereitstellung aussehen kann, ist nicht beschrieben – und stellt auch eine noch kaum bearbeitete Forschungsfrage dar.

Die integrierte Technologie-Roadmap 2025+ für Automation betrachtet die Thematik »Nachhaltige Rohstoffversorgung« und »Recycling als Rohstoffquelle« aus Sicht weiterer Zukunftsmärkte für die Automationsbranche [ZVEI-2015]. Die Autoren sehen dabei die Vernetzung von autonomen, sich situativ selbst steuernden, selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Demontage-, Sortier- und Aufbereitungsprozessen zur Rückgewinnung von Wertstoffen im Vordergrund. Als Haupttreiber für die Entwicklung der Recyclingwirtschaft wird die Abfall- und Umweltpolitik erkannt, als Innovationshemmnis die volatilen Preise der Rohstoffmärkte. Neue Potenziale werden in den bisher nicht kommerziell zur Verfügung stehenden Verfahren zur Rückgewinnung von Technologiemetallen und große Potenziale in der Weiterentwicklung der Demontage komplexer Produkte gesehen.

Im ersten Policy Paper »Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft« stellt das Öko-Institut sein Projekt, in dem eine umfassende Strategie zur Rohstoffwende erarbeitet werden soll, vor. In einem Ausblick über die Instrumente für eine Rohstoffwende werden für die Nachfrageseite auch die Themen Substitution, Lebensdauererlängerung und Recycling erwähnt. Unter die Steuerungsansätze fallen u. a. Informationen (z. B. Pro-

<sup>36</sup> Und zwar weniger für die technische Umsetzung der Informationsbereitstellung, als vielmehr für die qualitätsgesicherte Beschaffung der Daten zur stofflichen Zusammensetzung.

duktdeklarationen), freiwillige Vereinbarungen und Selbstverpflichtungen, ordnungsrechtliche Standards, Preis- sowie Mengensteuerungen [Buchert-2015]. Als ein rohstoffspezifisches Ziel wird auch hier die Steigerung der EoL-Recyclingrate, z. B. für Neodym, gesehen. Weitere Anforderungen an das Produktdesign sowie Instrumente der Kennzeichnung wären zur Förderung des Recyclings denkbar [Buchert-2015].

Das Industrie 4.0-Konzept bietet somit für das Recycling von Technologiemetallen erhebliche Möglichkeiten, heutige Hemmnisse (wie z. B. die Wissenslücke zu verbauten Massen an Technologiemetallen) zu überwinden. Industrie 4.0 (im internationalen Bereich eher »smart factory« oder »smart manufacturing« genannt) erobert sich in der Stückgutfertigung gerade erste Anwendungen (als Fortschreibung der Automatisierungstechnik). Die Umsetzung des Konzepts in der Entsorgungswirtschaft ist dagegen nicht weit fortgeschritten, hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, aber mittel- bis langfristig bieten sich auch Chancen auf marktkompatible Innovationen »made in Germany«.

### **6.10 Zusammenfassung vorhandene Handlungsfelder und Handlungsempfehlungen**

Die dargestellten Handlungsfelder/Handlungsempfehlungen aus den untersuchten politischen Papieren sowie Studien ähneln und überschneiden sich. Dies überrascht nicht, da die Publikationen meist eine systemanalytische Herangehensweise wählen, d. h. das »Recyclingsystem« inkl. der darin vorgefundenen Beziehungen zwischen den Systemelementen analysieren und Verbesserungen vorschlagen. Sie gehen zwar meistens von dem Leitgedanken »Ressourceneffizienz« aus, lassen sich aber analog auch auf das Recycling von Technologiemetallen übertragen. Sie sind meistens strategisch, d. h. mittel- bis langfristig und teilweise systemorientiert angelegt. Einen sehr breiten und zur Aufgabenstellung dieser Studie komplementären Katalog an Handlungsansätzen liefert ProgRess I aus dem Jahr 2012, an den die Handlungsempfehlungen dieser Studie anschließen können.

Das Industrie 4.0-Konzept bietet für das Recycling von Technologiemetallen (und die Kreislaufwirtschaft insgesamt) erhebliches Innovations- und Verwertungspotenzial. Um es zu erschließen, müssen gut funktionierende Netzwerke zwischen Produkt-/Bauteilherstellern und Akteuren der Kreislaufwirtschaft aufgebaut werden.

### **6.11 Rechtliche Entwicklungen mit Einfluss auf das Recyclingpotenzial der betrachteten Technologiemetalle**

Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, kommt es bereits im Erfassungsschritt zu wesentlichen Verlusten. Die Novelle der WEEE-Richtlinie 2012/19/EG und der aktuell vorliegenden Entwurf zur Novelle des ElektroG sehen daher eine Steigerung der Sammelmengen auf 45 % ab 2016 und auf 65 % ab 2019 der durchschnittlich in den letzten drei Jahren in Verkehr gebrachten Mengen vor [ElektroG-2015]. Im Jahr 2013 belief sich die Sammelquote auf ca. 43 % [BMUB-2015d]. Für das Jahr 2014 liegen noch keine abschließenden Zahlen vor [EUWID-2015]. Zur Erfüllung der neuen Zielvorgaben wurde eine Rücknahmepflicht von EAG über



den Handel und eine Beweislastumkehr beim Nachweis der Funktionsfähigkeit exportierter Altgeräte im ElektroG verankert [ElektroG-2015].

Zur Verringerung von Verlusten im Vorbehandlungsschritt ist die Berücksichtigung von Demontage- und Recyclingfreundlichkeit bereits im Produktdesign erforderlich. Die Pflicht zu einer entsprechenden Produktkonzeption bei Elektro- und Elektronikgeräten ist in § 4 ElektroG, sofern Umwelt- und Sicherheitsaspekte dem nicht entgegenstehen, bereits adressiert [ElektroG-2005]. In dem aktuell vorliegenden Entwurf zur Novelle des ElektroG ist darüber hinaus die Anforderung der »leichten Entnehmbarkeit« von Batterien und Akkumulatoren aus der EU-Batterie-RL enthalten [Entwurf Novelle ElektroG-2015]. Weitergehende Anforderungen an die Demontagefreundlichkeit anderer Bauteile sind jedoch auf europäischer Ebene zu regeln, da bei einer nationalen Regelung länderspezifische Marktzugangshemmnisse entstehen würden. Daher sollen diese in der sogenannten Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) adressiert werden [EU-2012]. Basierend auf dieser Richtlinie zur »umweltgerechten Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte« können Durchführungsmaßnahmen erlassen werden, in denen auch Ökodesign-Vorgaben festgelegt werden können (Art. 15, Satz 6 [EU-2009]). Zu den Ökodesign-Parametern nach Anhang 1 ist auch eine recycling- und wiederverwendungsfreundliche Produktgestaltung genannt (1.3 (h), [EU-2009]). Jedoch finden sich beispielsweise in der aktuell vorliegenden Durchführungsmaßnahme für die ressourcenrelevante Geräteart »Computer und -server« noch keine konkreten Anforderungen. Allerdings ist eine Betrachtung der Aspekte Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit bei der Überprüfung der Verordnung 3,5 Jahre nach Inkrafttreten vorgesehen (Art. 9, [EU-2013]). Die Möglichkeiten, über diese Ermächtigung für bestimmte Gerätearten konkrete Vorgaben zu erlassen, die europaweit gelten, sollten daher in zukünftigen Durchführungsmaßnahmen gezielt genutzt werden. Eine Ausweitung auf nicht energieverbrauchsrelevante Produkte sollte in Betracht gezogen werden, auch wenn dies aktuell nicht vorgesehen ist [BMUB-2015c].

Für eine auf das Recycling kritischer Rohstoffe besser adaptierte Prozesskette von der Erfassung bis zur Verwertung ist zudem eine deutliche Verbesserung der Informationsverfügbarkeit zu Rohstoffgehalten und des Aufbaus von EAG erforderlich. Dieser Aspekt wird bei den Informationspflichten der Hersteller bezüglich der Wiederverwendung sowie Behandlung der in Verkehr gebrachten Produkte nach § 13 Abs. 6 [ElektroG-2005] bzw. § 28 Abs. 1 [Entwurf Novelle ElektroG-2015] adressiert. Jedoch gilt hier die Einschränkung, dass die Informationsbereitstellung nur dann erfolgen muss, wenn die Verwertungsanlagen ansonsten nicht den Bestimmungen des Gesetzes nachkommen können. Die gesetzlichen Anforderungen an den Behandlungsprozess werden jedoch bereits erfüllt. Aus Sicht des BMUB besteht insofern aktuell kein Konkretisierungsbedarf [BMUB-2015d]. Im Falle einer umfangreichen Bereitstellung von Herstellerinformationen zu Aufbau und Demontagefähigkeit jedes auf den Markt gebrachten Neugerätes wären zudem der hohe Verarbeitungsaufwand der Herstellerinformationen bei den Erstbehandlungsanlagen sowie die Wahrung von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen auf Herstellerseite zu diskutieren.

Zusätzlich zu den Aspekten Produktdesign und Informationsbereitstellung sind auch konkrete Behandlungsvorschriften für EAG für eine gesteigerte Rückge-

winnung von Technologiemetallen relevant. Daher findet sich in der Novelle des ElektroG unter anderem eine Verordnungsermächtigung dazu, weitergehende Anforderungen an die Behandlung von EAG zu definieren. Die derzeitigen Anforderungen an eine selektive Behandlung nach Anhang III [ElektroG-2005] bzw. Anlage 4 [Entwurf Novelle ElektroG-2015] des ElektroG ist auf Schastoffentfrachtung fokussiert. Recyclingaspekte gewinnen gegenüber der Schadstoffentfrachtung aber zunehmend an Bedeutung, so dass es Ziel des BMUB ist, die bestehenden Behandlungsanforderungen unter Aspekten der Rückgewinnung von Technologiemetallen im Rahmen einer eigenständigen Verordnung weiterzuentwickeln [BMUB-2015d]. Konkrete Vorgaben in eine BehandlungsV sind allerdings nur dann sinnvoll, wenn die dafür erforderlichen Behandlungsschritte u. a. bereits technisch machbar und auch verhältnismäßig sind [BMUB-2015d]. Mit einem ersten Entwurf der BehandlungsV wird aktuell Ende 2017 gerechnet [BMUB-2015d]. In die Ausgestaltung fließen dabei unter anderem die Projektergebnisse der aktuellen Forschungsvorhaben »Repro«<sup>37</sup> und »UPgrade«<sup>38</sup> sowie die eines vom Umweltbundesamt im Jahr 2015 beauftragten Forschungsvorhabens, welches im Titel die Behandlung von EAG unter »Ressourcen- und Schadstoffaspekten« adressiert, ein [BMUB-2015d, UBA-2015]. In dem Vorhaben des UBA werden Leiterplatten bzw. nicht näher definierte, ressourcenrelevante Bauteile in ausgewählten EAG, Flachbildschirme, Kunststoffe sowie Photovoltaikmodule berücksichtigt [UBA-2015].

Bei der Betrachtung bestehender rechtlicher Vorgaben mit Bezug zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe kann des Weiteren auch die derzeit laufende Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens bei der Rückgewinnung des Elements Phosphor Anregungen geben. Für die Rückgewinnung des in Klärschlamm enthaltenen Phosphor sind einige Verfahren im Pilotmaßstab entwickelt worden, die jedoch aktuell aufgrund eines zu niedrigen globalen Rohphosphatpreises und teilweise hohen Chemikalieneinsatzes in Deutschland großtechnisch nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Hier ist eine Novellierung der bestehenden AbfKlärV Ende 2015 geplant, die nach derzeitigem Stand voraussichtlich u. a. folgende Vorgaben enthalten könnte:

- Pflichten zur P-Rückgewinnung ab bestimmtem P-Gehalt von Schlämmen, Verbot der Mitverbrennung
- Pflicht zur separaten Lagerung bzw. unmittelbaren Düngemittelaufbereitung von Monoverbrennungssaschen
- Vermischungs- und Verdünnungsverbot [Bergs-2015].

<sup>37</sup> »RePro« Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten. Auftraggeber: Umweltbundesamt (FKZ 3711 95 318). Projektpartner: Ökopol GmbH (Leitung, Koordination), Fraunhofer ISI, TU Darmstadt, TU Hamburg-Harburg, ELPRO GmbH, Fraunhofer IWKS, TCM GmbH, Adamec Recycling GmbH.

<sup>38</sup> »UPgrade« Integrierte Ansätze zur Rückgewinnung von Spurenmetallen und zur Verbesserung der Wertschöpfung aus Elektro- und Elektronikgeräten. Gefördert im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme »r<sup>3</sup> - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien«. Projektpartner: Technische Universität Berlin (Leitung), LASU Fachhochschule Münster, Altenburger Maschinen Jäckering GmbH, GRS Batterien, Jöst GmbH Co. KG, Loser Chemie GmbH, Remondis Elektrorecycling GmbH, SIMS I M+R GmbH, Recyclingzentrum Frankfurt, Fraunhofer IVV, INFA Institut e. V., Labor für Strömungstechnik und -simulation an der FH Münster

Die tatsächlichen Auswirkungen einer Umsetzung auf das Phosphorrecycling sind zwar noch nicht absehbar, jedoch zeigt dieses Beispiel, wie die Implementierung von Recyclingverfahren durch Rechtsvorschriften forciert werden kann. Durch die analoge Übertragung dieser Regelungen für Klärschlämme bzw. seines Phosphorinhalts auf andere kritische Rohstoffe könnte auch dort das Hemmnis mangelnder Wirtschaftlichkeit von Recyclingkonzepten gemindert werden.

## 7 Handlungsempfehlungen

Nach Auswertung des Stands der Rückgewinnung (Kapitel 3), des Stands der Forschung (Kapitel 4) sowie den identifizierbaren Forschungslücken (Kapitel 5) zu den in Kapitel 2 für die Betrachtung in dieser Studie ausgewählten Elementen Indium (In), Germanium (Ge), Gallium (Ga), Neodym (Nd) und Dysprosium lassen sich folgende **Kernaussagen** treffen:

- 1) Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es in Deutschland kein wirtschaftliches Recycling der betrachteten Elemente aus EoL<sup>39</sup>-Produkten. Das Recyclingpotenzial ist verglichen mit dem aktuellen Bedarf gering bis nicht vorhanden und lässt sich nur mit großen Unsicherheiten ermitteln.
- 2) Es gibt keinen speziellen Bedarf an recycelten Sekundärrohstoffen zur Sicherung der Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft. Der heutige Bedarf wird über (aktuell kostengünstige und ausreichend verfügbare) Primärrohstoffe und relativ »einfach« zu recycelnde Produktionsabfälle bedient.
- 3) Es gibt kaum aktuelles geschütztes technisches Know-how in Form von Schutzrechten in Deutschland. Die Schutzrechte liegen in anderen Ländern (z. B. China), bei ausländischen Unternehmen und werden für die Anwendung in anderen Ländern angemeldet. Bei Bedarf könnten strategische Partnerschaften geschlossen werden.
- 4) Verfahrensentwicklungen aus der Forschung zur Rückgewinnung der betrachteten Technologiemetalle gelangen aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit und großer Marktunsicherheiten bezüglich ihrer langfristigen Verfügbarkeit nur vereinzelt vom Labor-/Technikumsmaßstab in die großtechnische Anwendung. Damit fehlen wichtige Betriebserfahrungen.

Für eine kurzfristige Perspektive zum *heutigen* Zeitpunkt würde als naheliegende Handlungsempfehlung somit resultieren:

- Weitere Beobachtung der Märkte und der Rohstoffverfügbarkeit (primär, sekundär) für die hier betrachteten und weitere kritische Rohstoffe, z. B. durch die BGR/DERA
- Regelmäßige Befragungen zur Rohstoffversorgung und Bezugslage durch den BDI, den ZVEI und andere Branchenverbände bei ihren Mitgliedern
- Fortlaufende Dokumentation und Auswertung nationaler und internationaler Forschungsergebnisse sowie der internationalen Schutzrechtslage, um bevorstehende Technologiesprünge frühzeitig zu erkennen
- Erneute Beschäftigung mit dem Thema »Recycling von kritischen Rohstoffen« erst bei Anzeichen einer erneuten Verknappung bzw. sprunghaften Preisanstiegen bei primären Rohstoffen (z. B. mittels dann durchzuführender Stakeholderdialoge mit der betroffenen Industrie und der Wissenschaft)

<sup>39</sup> EoL: **End-of-Life**; in geringem Umfang findet ein produktionsintegriertes Recycling aus Effizienzgründen statt

Als mögliche Folge eines solchen Vorgehens würde zum Zeitpunkt einer erneuten Verknappung der dann vorhandene Entwicklungsstand heimischer Rückgewinnungsverfahren dem heutigen Stand (überwiegend Labormaßstab) entsprechen. Die Kompetenz und die Netzwerke für eine direkte Anknüpfung an den heutigen Kenntnisstand wären möglicherweise durch unvollständige Dokumentation der Ergebnisse, fehlende Entwicklungskontinuität und Fluktuation der Wissensträger nicht mehr ausreichend vorhanden. Forschungsarbeiten müssten ggf. zu diesem Zeitpunkt neu aufgenommen werden, um die nächsten Entwicklungsschritte gehen zu können. Hierdurch würde ein Zeitverzug entstehen, der einer direkten Kompensation fehlender Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe entgegensteht. Daraus könnte im Ernstfall eine physische Rohstoffverknappung für die deutsche Wirtschaft resultieren. Ein Ausweg wäre dann, Rohstoffe *und* Recyclingverfahren auf dem internationalen Markt – wahrscheinlich zu hohen Preisen – einzukaufen und/oder die Substitutionsforschung zu intensivieren.

Die nachfolgenden Handlungsempfehlungen sind daher als *systemorientierte Vorschläge* zu verstehen, die zum *mittel- bis langfristigen Kompetenzerhalt/-aufbau* und zur schrittweisen Implementierung einer Recyclingwirtschaft für kritische Rohstoffe beitragen, um die Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft widerstandsfähiger gegen plötzliche Preisanstiege und volatile Marktbedingungen zu machen. Diese Vorschläge decken die Verbesserung der Wissensbasis (Handlungsempfehlung 1-3), die weitere Nutzung rechtlicher Möglichkeiten (Handlungsempfehlung 4), den Technologieausbau (Sammlung und Rückgewinnung) in einen gut in die Industrie zu übertragenden Entwicklungsstand und die Förderung dieses Technologieausbaus (Handlungsempfehlung 5-7) sowie einen material- und technologiespezifischen Kompetenzaufbau und die Vernetzung von Kompetenzen (Handlungsempfehlung 8 und 9) ab. Zum Teil nehmen die Vorschläge Bezug auf bereits in anderen Papieren vorgeschlagene Empfehlungen (vgl. Kap.6), zum Teil adressieren sie konkrete neue Vorschläge, die sich speziell aus der Analyse im Rahmen dieser Studie ergeben haben. Unter der Überschrift »Maßnahmen« werden erste Vorschläge zur Umsetzung der Handlungsempfehlungen unterbreitet. Diese Maßnahmen können in nachfolgenden Dialogprozessen weiter geschärft und priorisiert sowie zu einer Roadmap weiterentwickelt werden.

Neben Maßnahmen aus den konkreten Handlungsempfehlungen kann allgemein eine stärkere Bewusstseinsbildung für Fragen des Recyclings in der Bevölkerung die Anstrengungen unterstützen. Da es sich hierbei eher um eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe handelt, wird sie nicht unter den Handlungsempfehlungen adressiert. So könnte ein verstärktes Bewusstsein für den Wertstoffgehalt in Elektroaltgeräten in der breiten Gesellschaft die Sammlung und Erfassung dieser Geräte befördern. Daneben muss allerdings auch die entsprechende bürgernahe Sammelinfrastruktur zur Verfügung stehen. Sowohl die Europäische Union als auch die Bundesregierung fordern in ihren zentralen Papieren zu Forschungsinstrumenten (EU Horizon 2020, Hightech-Strategie der Bundesregierung, im BMBF-Foresight-Zyklus 2) die Einbindung bzw. Partizipation der Gesellschaft in Wissenschaft und Forschungsprozesse. Auch für den Bereich »Nachhaltige Entwicklung« nimmt Partizipation eine zentrale Schlüsselrolle ein. Partizipation bildet somit die Schnittmenge zwischen forschungsgetriebenen Innovationen einerseits und sozialen Innovationen andererseits.

## 7.1 Handlungsempfehlung 1

### **Handlungsempfehlung 1: »Information über verbaute Wertstoffe in Produkten und Bauteilen über den gesamten Lebenszyklus verbessern«**

Adressierter Themenbereich:

Industrie 4.0, Design for Recycling, Produktverantwortung

Konkreter Nutzen:

Wissenslücke zu Massen und oder Konzentrationen von Stoffen in komplexen Produkten und Bauteilen wird behoben, Systemverständnis und Investitionssicherheit werden verbessert

### **Motivation und Beschreibung**

Im Rahmen der durchgeführten Recherchen und Interviews wurde deutlich, dass zur Erschließung des Recyclingpotenzials der betrachteten Technologiemetalle bessere Erkenntnisse über in Produkten und Bauteilen enthaltene Stoffe sowie deren Massen und/oder Konzentrationen hilfreich wären. Optimiert würde dieser Ansatz, wenn diese Informationen möglichst über den gesamten Lebenszyklus erhalten blieben und – idealerweise – elektronisch auslesbar wären. In einer mittel- bis langfristigen Perspektive wäre es daher günstig, wenn Bauteile oder Produkte, die einen bestimmten Minimalgehalt an »kritischen« Rohstoffen überschreiten, als recyclingwürdige Bauteile erkennbar, automatisiert detektier- und sortierfähig wären. Eine kostengünstige, technisch realisierbare Informationsbereitstellung zur Optimierung des Recyclings (und ggf. später auch dem Schutz vor Produktpiraterie) ist derzeit nicht verfügbar, für andere – weniger komplexe - Anwendungen aber durchaus bereits im Markt eingeführt<sup>40</sup>. Intelligente, kostengünstige und aktive Systeme adressieren vor allem die Verknüpfung des Recyclings zu Innovationen aus den Bereichen Industrie 4.0, Design for Recycling und Produktverantwortung. Das Industrie 4.0-Konzept bietet für das Recycling von Technologiemetallen Möglichkeiten, heutige Hemmnisse (wie z. B. die Wissenslücke zu verbauten Massen an Technologiemetallen) zu überwinden. Die Umsetzung des Konzepts in der Entsorgungswirtschaft ist dagegen nicht weit fortgeschritten, hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf, aber mittel- bis langfristig bieten sich auch Chancen auf marktkompatible Innovationen »made in Germany«.

Zur Verbesserung der Situation wäre eine stärkere Kooperation zwischen öffentlicher Hand, Wirtschaft und Wissenschaft hilfreich, um geeignete Forschungs- und Innovationsprojekte auf den Weg zu bringen. Wegen des wettbewerblichen Charakters dieses bislang nicht marktverfügbaren Ansatzes sollte der Anstoß durch die öffentliche Hand erfolgen.

<sup>40</sup> Z. B. Internet der Dinge, Zertifikatssysteme bei biobasierten Produkten zum Nachweis von Bestandteilen und nachhaltiger Herstellung, Kunststofftypenkennzeichnung auf Verpackungen

### Mögliche Maßnahmen

- Stakeholderdialoge und Runde Tische zur Problembeschreibung, Lösungsfindung und Projektentwicklung
- Machbarkeitsstudie zur Datengenerierung und zu geeigneten Technologien, Innovationen und Industrie 4.0-Konzepten, um die Informationsbereitstellung kostengünstig und unbürokratisch zu realisieren und Wirkungen abzuschätzen
- Erarbeitung von Daten- und Übertragungsstandards für die Informationsbereitstellung und das – automatisierte – Auslesen der Informationen
- Einbringung der Standards in nationale und internationale Normungs- und Standardisierungsgremien
- Erprobung des Konzeptes im Rahmen eines Demonstrationsprojektes für ein konkretes (Referenz-)Produkt entlang seines Lebenszyklus, Erarbeitung von Umsetzungskonzepten für weitere Produktgruppen

## 7.2 Handlungsempfehlung 2

### Handlungsempfehlung 2: »Langfristiger Aufbau eines virtuellen Katasters für Sekundärrohstoffe in langlebigen<sup>41</sup> Produkten (virtual feedstocks)«

Adressierter Themenbereich:

Urban Mining, Industrie 4.0, Design for Recycling, Produktverantwortung

Konkreter Nutzen:

Verbesserung der Informationslage und Wissensgewinn zu Materialien und Stoffen, die im anthropogenen Lager vorhanden sind und zu dem Zeitpunkt, ab dem diese dem Recycling möglicherweise wieder zur Verfügung stehen

### Motivation und Beschreibung

Innerhalb der r<sup>3</sup>-Fördermaßnahme wurden Projekte zur Kartierung urbaner, sekundärer Rohstoffquellen, z. B. zu Gebäuden (vgl. Projekt PRRIG) und Halden (vgl. Projekte REStrateGIS, SMSB, ROBEHA) gefördert. Diese Daten sollten, soweit es der Datenschutz zulässt, gebündelt und weiter ergänzt werden. Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Handlungsempfehlung 1 könnte ein Ressourcenkataster über EoL-Produkte, deren Zusammensetzung und Nutzungsdauer aufgebaut werden, welches eine bessere Planungsgrundlage über Stoffströme in der Zukunft zulässt. Des Weiteren können abfallschlüsselscharfe Analyseergebnisse zu kritischen Rohstoffen ein solches Kataster abrunden. Die Abfallanalysendatenbank (ABANDA) des Landes Nordrhein-Westfalen ist ein Beispiel für eine abfallschlüsselbezogene Zusammenstellung von Analysenwerten, die seit 1993 gepflegt wird [LANUV-2015]. Allerdings decken die erhobenen Analysendaten nicht den Anteil an den Elementen Indium, Gallium, Germanium, Neodym und Dysprosium bzw. generell an kritischen Rohstoffen ab.

<sup>41</sup> Langlebig entspricht einer Nutzungsdauer > 1 Jahr

Neben Erkenntnissen über die Zusammensetzung bzw. zum Inventar von EoL-Produkten und anderen Urban-Mining-Stoffströmen ist die Nutzungsdauer der Produkte ein wichtiger Faktor, um abschätzen zu können, wann Stoffströme für ein Recycling zur Verfügung stehen. Allerdings werden Erwartungen zur Marktverbreitung eines Produktes, die über Prognosemodelle in ein solches Kataster einfließen sollten, nicht immer bestätigt. Im Bereich der PV-Technologie wurde vor ca. vier Jahren noch ein Marktanteil an Dünnschicht-Modulen von 40 % prognostiziert. U. a. aufgrund der effizienter gewordenen und preisgünstigeren kristallinen Si-Module liegt der Marktanteil an Dünnschichtmodule heute gerade bei 7 % [Melber-2015]. Somit werden auch die galliumhaltigen Rückläufe aus diesen Produkten geringer sein, als geplant. Solche Bedingungen können über dynamische Modellierungsansätze in das Kataster eingebunden werden, welches dann zu einem »virtual feedstock«, also zu einer Datenbank für anthropogene Lager, wird. Dieser Ansatz hat Forschungs- und Entwicklungscharakter.

### Mögliche Maßnahmen

- Schaffung einer Datengrundlage über Mengen und Zusammensetzungen von Produkten und Urban Mining-Stoffströmen für Prognosen über erwartbare Stoffströme und deren Wertstoffgehalte (Indium, Germanium, Gallium ...)
- Verbindung der Materialströme mit räumlichen Informationen zur Erstellung von Rohstofflandkarten
- Erarbeitung bzw. Weiterentwicklung dynamischer Stoffstrommodellierungen

## 7.3 Handlungsempfehlung 3

### Handlungsempfehlung 3: »Wissensbasis zu Rohstoffbedarfen und Verknüpfung mit Angebot und Verbleib von Sekundärrohstoffen«

Adressierter Themenbereich:

Rohstoffsituation, Versorgungssicherheit, rohstoffspezifischer Bedarf

Konkreter Nutzen:

Datengrundlage zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen für Deutschland; Findung neuer Geschäftschancen durch Verknüpfung von Rohstoffnachfrage und Sekundärrohstoffangebot

### Motivation und Beschreibung

Die Ableitung der kritischen Rohstoffe für diese Studie (siehe Kapitel 2) erfolgt analog zu der Methodik der EU. Unsicherheiten entstehen bei der Übertragbarkeit auf Deutschland durch die vorhandene oder zugängliche Datenlage. Teilweise konnte nur auf globale Verteilungen für Anwendungen der betrachteten Technologiemetalle zugegriffen werden, die nicht repräsentativ für Deutschland sein müssen. Vorhandene statistische Datenbanken wurden mit einer anderen Zielstellung erstellt und sind nicht zugeschnitten auf die Beurteilung der wirtschaftlichen Bedeutung von einzelnen Rohstoffen. Für eine spezifischere Betrachtung der deutschen Rohstoffkritikalität wäre es notwendig zu untersu-



chen, welchen Bedarf an relevanten Rohstoffen die deutschen Industrieunternehmen tatsächlich haben und wie sich diese Bedarfe auf die verschiedenen Anwendungsgebiete und Wirtschaftszweige verteilen. Die Daten sind bislang für die beschriebene Aufgabe zu ungenau: Produktgruppen werden zusammengefasst dargestellt, eine spezifische Erfassung/Veröffentlichung von Elementen oder Materialien mit »kritischen« Wertstoffen erfolgt nicht detailliert. Einige Daten werden aufgrund von Geheimhaltungsvorgaben (z. B. geringe Anzahl an Unternehmen, deren Zahlen aus der Statistik zurückgerechnet werden könnten) aggregiert erfasst. Kenntnisse über die tatsächliche Materialzusammensetzung entsprechender Halb- und Fertigwaren, die nach Deutschland importiert und oftmals nur endmontiert werden, aber dennoch eine Wertschöpfung im Land erzielen, sind kaum vorhanden bzw. nicht öffentlich zugänglich.

Neben der vorhandenen Informationsgrundlage ist die tatsächliche Versorgungslage mit Rohstoffen entscheidend für die Berechnung der Versorgungssicherheit. Diese ist allerdings auch Schwankungen unterworfen und teilweise von wenigen Akteuren bestimmt. Während in [ERECON-2015] noch angenommen wird, dass der nicht-chinesische Bedarf an leichten Seltenen Erden mittelfristig durch die nicht-chinesischen Standorte Mountain Pass (USA) und Mount Weld (Australien) bedient werden kann, hat sich diese Einschätzung heute geändert [Forbes-2014], [WSJ-2015].

Die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen sollte idealerweise dem Rohstoffbedarf der Hersteller entsprechen. Dies betrifft insbesondere die Qualitäten der Sekundärrohstoffe (z. B. Reinheit, chemische Bindungsform [oxydisch, metallisch], Konfektionierung), kann aber auch die zu bereitstellenden Mengen betreffen. Idealerweise sollte ein Sekundärrohstoff die gleichen Eigenschaften wie ein Primärrohstoff aufweisen, um diesen ohne Anpassungen in der Produktion ersetzen zu können bzw. diesem zumischen zu können. Durch die datenmäßige Verknüpfung der Nachfrageseite (produzierende Industrie) mit der Angebotsseite (Sekundärrohstofflieferanten) sollte sichergestellt werden, dass die erforderlichen Spezifikationen eingehalten werden können.

### **Mögliche Maßnahmen**

- Anpassung der statistischen Datengrundlage, z. B. über Stakeholderdialoge und Runde Tische zur Festlegung, welche Daten zusätzlich erhoben bzw. ausgewiesen werden sollen und können
- Bedarfslage und Stoffstromanalyse für Primärrohstoffe für Deutschland; Erhebung des spezifischen Rohstoffbedarfs (nach festgelegten Qualitäten) für Industriezweige bzw. Anwendungsgebiete in Zusammenarbeit mit Branchenverbänden
- Detaillierte Stoffstromanalysen für ausgewählte Rohstoffe zur Abbildung des spezifischen Bedarfs einzelner Industriezweige (Rohstoffimporte, Import von Halb- und Fertigwaren, Qualitäten, Verbrauch, Produkte etc.) im Rahmen spezifischer Studien in Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft

- Fortsetzung und Ausbau des Monitorings der Rohstoffmärkte (primär und sekundär inkl. Abgleich der geforderten Sekundärrohstoffqualitäten), z. B. durch BGR/DERA

## 7.4 Handlungsempfehlung 4

### **Handlungsempfehlung 4: »Bestehende und geplante Rechtsvorschriften konsequenter für die Verbesserung des Recyclings kritischer Rohstoffe nutzen«**

Adressierter Themenbereich:

Design for Recycling, Produktverantwortung, Verfahrensinnovation, Informationen zu Rohstoffpotenzialen

Konkreter Nutzen:

Verbesserung des Recyclings aus EoL-Produkten durch recyclingfreundliches Design, Informationen zu Rohstoffgehalten, gerätespezifischen Behandlungsvorschriften sowie Rückgewinnungsvorgaben für kritische Elemente

### **Motivation und Beschreibung**

In bestehenden Rechtsvorschriften sind bereits Ansätze enthalten, die eine Steigerung des Recyclings kritischer Rohstoffe befördern können (siehe dazu Kapitel 6.11). So ist unter anderem im neuen ElektroG sowie der Ökodesign-Richtlinie die Forderung enthalten, recyclinggerechtes und demontagefreundliches Design in die Produktentwicklung einzubeziehen. Jedoch existieren bislang kaum konkrete Vorgaben dazu.

»Design for Recycling« ist indes in der Produktion ein relevanter Kostenfaktor, da eine demontagegerechte Baustruktur häufig eine aufwendigere Fertigung verlangt. Diese höheren Kosten lassen sich in der Produktionskette von einem Zulieferer von Einzelbauteilen, über den Einkauf des Herstellers bis zum Endverbraucher in der Regel schwer weitergeben. Einzelne Bauteile z. B. der Automobilzulieferindustrie könnten bereits heute recyclinggerechter gebaut werden, dies ist jedoch auch eine Frage der Preisgestaltung [Fischer-2015]. Vergleichbare Schwierigkeiten gibt es in der Halbleiterindustrie. Allerdings liegt hier der Preisdruck direkt bei den Rohstofflieferanten [Daub-2015]. Durch konkrete europaweite Vorgaben zum recyclinggerechten Design für rohstoffrelevante Produkte und Baugruppen, beispielsweise in den gerätegruppenspezifischen Durchführungsmaßnahmen nach Ökodesign-Richtlinie, könnten hier deutliche Verbesserungen erreicht werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass recyclinggerecht konstruierte Produkte im globalen Handel marktfähig bleiben müssen.

Wie bereits in Handlungsempfehlung 1 beschrieben, ist zudem die Verfügbarkeit von Informationen zu Aufbau und stofflicher Zusammensetzung von EAG eine wichtige Voraussetzung, um Erfassungs-, Vorbehandlungs- und Verwertungsstrukturen auf kritische Metalle hin aufzubauen und zu verbessern. Bezüglich der Bereitstellung dieser Informationen werden im ElektroG und in der Ökodesign-Richtlinie die Hersteller bereits angesprochen. Darüber hinausge-

hende Informationspflichten gibt es derzeit nicht. Langfristig sollten diese Informationspflichten unter dem Vorbehalt der wirtschaftlichen Zumutbarkeit konkreter ausgestaltet werden und damit für alle Produktgruppen einheitliche Informationen u.a. auch zum Gehalt kritischer Rohstoffe liefern.

Des Weiteren ist seitens des Gesetzgebers geplant, spezifische Behandlungsvorschriften für EAG in einer Behandlungsverordnung festzuhalten, die neben der Schadstoffentfrachtung auch auf Ressourcenaspekte abzielen (siehe hierzu Kapitel 6.11). In diesem Kontext könnte auch die Rückgewinnung kritischer Metalle adressiert werden, um für nachfolgende Recyclingstrukturen erforderliche Mengenströme bereitzustellen.

Des Weiteren ist derzeit eine Pflicht zur Zuführung von rohstoffhaltigen Abfällen zu geeigneten Recyclingverfahren im Bereich Klärschlamm in der Diskussion, um Recyclingverfahren, die noch nicht wirtschaftlich betrieben werden können, dennoch mit den erforderlichen Mengenströmen zu versorgen. Derartige Vorgaben könnten u. U. auch im Bereich der kritischen Rohstoffe in EoL-Produkten hilfreich sein, um Hindernisse im Hinblick auf eine wirtschaftliche Betriebsweise zu überwinden.

### **Mögliche Maßnahmen**

- Durch normierte Vorgaben bezüglich der durch die Hersteller beizubringenden Informationen zur Produktzusammensetzung könnte die Auswertbarkeit der Daten in der Erstbehandlung verbessert werden
- Im Rahmen der Konsultation für Durchführungsmaßnahmen im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie sollten Vorschläge zu konkreten Vorgaben zum recyclinggerechten Produktdesign eingebracht und die Möglichkeit einer Ausweitung auf nicht energieverbrauchsrelevante Produkte überprüft werden
- Bei der geplanten Behandlungsverordnung nach ElektroG sollte die Aufnahme von Maßnahmen zur gezielten Anreicherung von kritischen Metallen geprüft werden
- Langfristig und in Abhängigkeit von der Versorgungssituation und des Rohstoffbedarfs der Wirtschaft könnten mögliche Vorgaben zur verpflichtenden Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen aus Geräten oder Baugruppen ab gewissen Elementkonzentrationen analog der aktuellen Diskussion im Bereich Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen in Betracht gezogen werden

## 7.5 Handlungsempfehlung 5

### **Handlungsempfehlung 5: »Verbessern der Sammlung und Erfassung, Verhindern von Dissipationseffekten«**

Adressierter Themenbereich:

Urban Mining, Produktverantwortung, Verbleib kritischer Rohstoffe im Inland

Konkreter Nutzen:

Intelligente Sammlung und Erfassung von werthaltigen Stoffströmen verringert unwiederbringliche Materialverluste, vermindert unsachgemäße Entsorgung und erhöht die EoL-Recyclingquote.

### **Motivation und Beschreibung**

Die Forderung nach verbesserter Sammlung und der Vermeidung von Materialverlusten wird bereits in früheren Strategiepapieren gestellt und ist auch im Rahmen der Bearbeitung der vorliegenden Studie in vielen Experteninterviews und Literaturstudien bestätigt worden.

Nahezu ein Drittel aller EAG in der EU werden nicht ordnungsgemäß entsorgt [Huisman et al.-2015]. Vorschläge zu Änderungen der Sammlung gerade auch im EAG-Bereich werden in der wissenschaftlichen Öffentlichkeit und der Politik diskutiert. Die Novelle der WEEE-Richtlinie 2012/19/EG und des für Deutschland geltenden ElektroG sieht eine Steigerung der Sammelmengen vor, die ab 2016 auf 45 % und ab 2019 auf 65 % der durchschnittlich in den letzten drei Jahren in Verkehr gebrachten Mengen festgesetzt wurde. In 2013 betrug die deutsche Sammelquote ca. 43 %, Zahlen für 2014 liegen noch nicht abschließend vor (vgl. Kap. 6.11).

Auch durch den Export von Nd- und Dy-haltigen Produkten, insbesondere bei Werkzeugmaschinen und Industriemotoren, geht Material verloren. Bauteile wie Rotor und Stator, die im Zuge einer Überholung oder Reparatur ausgetauscht werden, werden häufig voneinander getrennt, in unterschiedlichen Schrottfractionen gesammelt und gelangen in die jeweiligen Kreisläufe des Stahl- oder Kupferrecyclings.

Für die fünf ausgewählten kritischen Rohstoffe bzw. -gruppen sind keine adäquaten stoffspezifischen Erfassungsstrukturen im EAG-Bereich vorhanden. Doch auch wenn Materialien in Fraktionen mit vergleichbaren Zielmetallkonzentrationen vorliegen und materialspezifisch erfasst werden, können Verluste auftreten. SEE-haltige Produktionsrückstände, die in Deutschland anfallen (vorwiegend Schleifschlämme, Splitter, Schrotte), werden nach China exportiert und dort der Aufbereitung zugeführt. Der Rohstoff geht damit der heimischen Industrie verloren und die Wertschöpfung wird ausgelagert.

In einer Reihe von Forschungsprojekten wird die gezielte Demontage von Bauteilen und die Zusammenfassung von Bauteilgruppen, die einen gefragten Rohstoff enthalten, und die gesammelte Weiterleitung dieser Mengen zu einer Aufbereitungsanlage diskutiert. Im Bereich der Neodym-Rückgewinnung aus

Magneten ist z. B. im BMBF-r<sup>4</sup>-Projekt SEMAREC für die Erfassung der Abfälle die Kooperation mit anderen EAG-Aufbereitungsunternehmen oder auch Unternehmen der Datenträgervernichtung angedacht. Darüber hinaus werden weitere Stoffströme (z. B. Servomotoren der Automobilindustrie, Magneten aus Windenergieanlagen) für eine potenzielle Nutzung geprüft [Bergamos-2015].

### Mögliche Maßnahmen

- Stakeholderdialoge zur Diskussion relevanter Stoffströme, die aus Sicht einer optimierten Aufbereitung gemeinsam erfasst werden sollten; dabei auch Berücksichtigung bisher wenig betrachteter industrieller Produkte z. B. Werkzeugmaschinen und Industriemotoren
- Monitoring und wiederkehrende Prüfung der Sammelmengen von EAG, um nicht zertifizierte, unsachgemäße Entsorgung zu vermindern
- Bereits bei der Erfassung und Sammlung möglichst Fraktionen mit vergleichbaren Zielmetallkonzentrationen erzeugen, um die anschließende Aufbereitung so kosten- und energieintensiv wie möglich zu gestalten (z. B. durch Vorgaben und/oder intelligente Erfassungstechnik)
- Weiterentwicklung von spezifischen Identifikations- und Konzentrations-techniken für kritische Rohstoffe im Rahmen vorhandener Förderprogrammatiken

## 7.6 Handlungsempfehlung 6

### Handlungsempfehlung 6: »Realisierung von Demonstrationsanlagen in Zusammenarbeit von öffentlicher Hand, Wirtschaft und Wissenschaft«

Adressierter Themenbereich:

Forschung und Entwicklung, Behebung von Forschungslücken, Daten- und Planungsgrundlagen, Verfahrensinnovation

Konkreter Nutzen:

Weiterentwicklung von aussichtsreichen FuE-Projekten von TRL-Level 4 bis mindestens TRL 6-7 inkl. Daten zu Betriebsverhalten sowie Betriebs-/ Investitionskosten, Verfügbarkeit von innovativen Recyclingverfahren, belastbare Datengrundlage für Investitionsentscheidung

### Motivation und Beschreibung

Wie in Kapitel 4.4 gezeigt, haben seit 2012 FuE-Projekte zum Recycling von den in dieser Studie betrachten Elementen sowohl auf nationaler wie auch auf europäischer Ebene nennenswert zugenommen. Demnach müsste mittlerweile das wissenschaftlich-technische Know-how deutlich angewachsen sein. Die entwickelten Technologien haben jedoch kaum einen TRL > 4 bis 5 erreicht, sind also von einer industriellen Umsetzung noch entfernt. Um diese Lücke zu schließen, muss in der Technologieentwicklung in der Regel die Skala »Demonstrationsmaßstab« erreicht werden.

Für die Planung von Demonstrationsanlagen ist eine ausreichende Datengrundlage<sup>42</sup> eine wichtige Voraussetzung. Veröffentlichte Daten (z. B. in Abschlussberichten) sind aber häufig nicht belastbar genug. Für eine Planung relevante Daten sind z. B.

- schlüssige, nach Möglichkeit hochskalierbare Massenbilanzen
- verwendete Einsatzstoffe (inkl. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen) im entwickelten Verfahren und Informationen über diese Einsatzstoffe (Datenblätter, Preise, Toxizität, Herkunftsland/Verfügbarkeit)
- Verschleißkosten
- Berücksichtigung besonderer Sicherheitsvorkehrungen
- belastbare Abschätzung des Energiebedarfs und der Energieform
- Abschätzung zu Investitionskosten einer kommerziellen Anlage
- Geschäftsmodelle (Betriebs-/Investitionskosten, Markt, erwartbare Umsätze, Finanzierung, Marketing/Vertrieb) zu den entwickelten Verfahren

Diese Daten sollten – möglichst standardisiert - am Ende einer Verfahrensentwicklung aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten in den entsprechenden Abschlussberichten dokumentiert werden.

Weitere Hemmnisse erhöhen das Investitionsrisiko für den Bau und Betrieb von Anlagen zur Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen: Aufgrund der stark gefallen Preise für Primärmaterialien sowie der starken Preisschwankungen (siehe Kapitel 3) kann eine wirtschaftliche Rückgewinnung der Zielmetalle häufig nur dann erfolgen, wenn neben den »kritischen« Rohstoffen auch andere Wertstoffe gewonnen werden, welche dann die Deckungsbeiträge für den wirtschaftlichen Betrieb des Gesamtverfahrens liefern [Melber-2015], [Meskers-2015]. Neben den Erlösen für die Produkte müssen allerdings auch die Entsorgungskosten für verbleibende Reststoffe berücksichtigt werden. Da gerade die hier betrachteten Materialien nur in geringen Mengen/Konzentrationen vorhanden sind, können auch die Reststoffmengen sehr groß werden. Hier können auch vermeintlich geringe Entsorgungskosten zu Kostentreibern werden, welche die Wirtschaftlichkeit einer Anlage beeinträchtigen.

Ein weiteres Hemmnis kann sich aus der Genehmigungssituation für eine Anlage ergeben. Gerade die Zeiträume, bis Genehmigungen erteilt werden, können sowohl in Forschungs- als auch bei Anlagenbauprojekten zu Verzögerungen führen [Goldmann-2015], [Melber-2015].

### **Mögliche Maßnahmen**

- Entwicklung und Bereitstellung von standardisierten Vorgaben für eine verbesserte Dokumentation von FuE-Ergebnissen (Massenbilanzen etc.); → Zusammenarbeit mit ggf. vorhandenen Begleitforschungsprojekten

<sup>42</sup> Im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des BMUB existieren hierfür Vorlagen, die ggf. auf andere Programme übertragbar sind.

- Vereinfachung und Beschleunigung von Genehmigungsverfahren - zumindest für Demonstrationsanlagen
- Ggf. nach weiterer Prüfung Aufbau einer neuen Forschungslinie »Mikro-Recyclingtechnik«<sup>43</sup> (z. B. durch eine erste Machbarkeitsstudie und erste orientierende Forschungsprojekte)
- Entwicklung von übertragbaren Geschäfts-/Finanzierungsmodellen, um Demonstrationsanlagen für den wirtschaftlichen Betrieb aufzurüsten und zu adaptieren<sup>44</sup>
- Schaffung von Projektstrukturen, welche die frühzeitige Kooperation von Wissenschaftlern und Experten des Business Development zur Kommerzialisierung von FuE-Ergebnissen vorsehen

## 7.7 Handlungsempfehlung 7

### Handlungsempfehlung 7: »Bessere ressortübergreifende Verzahnung und Abstimmung von Fördermaßnahmen sowie Begleitung bei Verwertung und Markteinführung«

Adressierter Themenbereich:

Förderprogramme, Marktumsetzung von Forschungsergebnissen

Konkreter Nutzen:

Umsetzung von Forschungsprojekten in die industriennahe Forschung

### Motivation und Beschreibung

Die Umsetzung einer Verfahrensentwicklung kann mit hohen finanziellen Risiken verbunden sein und ein Großteil der Forschungsprojekte gelangt nicht über den Labormaßstab oder maximal den diskontinuierlichen Technikumsmaßstab hinaus (siehe Handlungsempfehlung 6 und Kapitel 4.4). In den begleitenden Experteninterviews wurde daher auch die Schnittstelle zwischen Forschungsergebnissen und praktischer Umsetzung diskutiert. Hier kristallisierten sich folgende Schwierigkeiten heraus:

- Fehlende bzw. nicht geeignete Datengrundlage nach Abschluss eines Forschungsprojektes
- Finanzielles Risiko aufgrund der schwierigen wirtschaftlichen Situation im Vergleich zu primären Rohstoffen (siehe Kapitel 3 und Steckbriefe im Anhang: Preisverfall der Rohstoffe, Volatilität der Märkte)

<sup>43</sup> Hintergrund für diese Idee ist: Bislang scheitert die Umsetzung von Demonstrationsanlagen mit größeren Durchsätzen (upscaling) an der Unsicherheit bezüglich verfügbarer Stoffströme und Wirtschaftlichkeit. Ein Forschungsansatz könnte sein, nicht über *größere*, sondern über *kleinere* Anlagen nachzudenken (analog der Mikroreaktionstechnik in der Chemie), die kleine Stoffströme mit relativ geringerem Investitionsrisiko modular aufbereiten können. Erste Projekterfahrungen für so einen Ansatz sind vorhanden: <http://www.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/produktion-dienstleistung/fertigungstechnologien-verfahren/molecular-sorting.html>.

<sup>44</sup> z. B. im Rahmen des »exist-Programms« des BMWi

- Unzureichende Fördermechanismen zur Umsetzung großer, industrienaher Demonstrations-/Innovationszentren

Wegen dieser Schwierigkeiten und den in Handlungsempfehlung 6 diskutierten Unsicherheiten ist eine rein privatwirtschaftliche Investition in Demonstrationsanlagen zur Erschließung des möglichen Recyclingpotentials eher unwahrscheinlich. Um das unternehmerische Risiko zu reduzieren und Anschubhilfe für Demonstrationsanlagen zu leisten, kann die Begleitung durch fokussierte, öffentliche Fördermaßnahmen – auch als PPP<sup>45</sup>-Konstruktionen – hilfreich sein.

Möglicherweise können die neuen Förderinstrumente des BMBF r+Impuls (Stand 07/2015: erste Zuteilungsphase in Bearbeitung, siehe Kapitel 4.4) und die »Nationale Roadmap für Forschungsinfrastrukturen<sup>46</sup>« (veröffentlicht am 28. August 2015) Maßnahmen zur Umsetzung von Demonstrationsanlagen sein. Erfahrungen zu den Programmen liegen zum Zeitpunkt des Redaktionsschluss für diese Kurzstudie nicht vor.

Die benötigten Projektmittel sind bei Demonstrationsprojekten alleine aufgrund der Anlagengrößen höher als bei klassischen Forschungsprojekten. Des Weiteren können je nach Projektgestaltung unterschiedliche fachliche Themengebiete betroffen sein. Das höhere finanzielle Risiko aufgrund des höheren Projektvolumens sowie mögliche thematische Überschneidungen könnten durch ressortübergreifende Förderinstrumente oder ressortübergreifenden Abstimmungen abgefangen werden. Allerdings sollte das Risiko hoher Fördersummen durch eine sorgfältige Auswahl der zu fördernden Projekte begrenzt werden. In den Förderanträgen sollte nachvollziehbar dargelegt werden, dass ein entsprechender Technologielevel für eine praktische Umsetzung erreicht ist bzw. plausibel erreicht werden kann und wie die Voraussetzungen für eine Kommerzialisierung geschaffen werden können (siehe Handlungsempfehlung 6).

### Mögliche Maßnahmen

- Erarbeitung eines Kriterienkatalogs als Entscheidungsgrundlage für Fördergeber, welche Labor- bzw. Technikumsverfahren in Innovationsprojekten demonstriert werden sollen. Die Erarbeitung könnte einzeln oder in Kooperation zwischen Fördergebern, Projektträgern, FuE-Einrichtungen und ggf. Begleitforschungsmaßnahmen erfolgen
- Stakeholderdialoge bzw. Runde Tische mit Industrie, Wissenschaft und Fördermittelgebern zur Diskussion, wie geeignete Förderinstrumente ausgestaltet werden sollten (z. B. Ausgestaltung von Förderinstrumenten, die für strategische Projekte eingesetzt werden können und nicht an ein bestimmtes Förderprogramm gebunden sind)
- Ressortübergreifende Forschungsprogramme als PPP-Konstruktionen zur Realisierung von aussichtreichen, industriegeführten Demonstrationsanlagen und/oder -standorten
- Ressortübergreifender Austausch zur Koordinierung der Förderinstrumente

<sup>45</sup> PPP: **P**ublic-**P**riate-**P**artnership

<sup>46</sup> Quelle: <http://www.bmbf.de/de/22519.php>



## 7.8 Handlungsempfehlung 8

### Handlungsempfehlung 8: »Materialspezifischer Kompetenzaufbau«

Adressierter Themenbereich:

Förderung von Bildung und Ausbildung, Netzwerke, strategische Partnerschaften

Konkreter Nutzen:

Förderung der Ausbildung von Fachkräften von Morgen und des Aufbaus von Know-how, Stärkung der Fähigkeit von Innovationen aus der heimischen Industrie und der heimischen Wertschöpfung

### Motivation und Beschreibung

Ein wichtiger Aspekt, der sowohl in der Rohstoffstrategie des Bundes [BMW-2010] und im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm [BMUB-2015] als auch in Gesprächen mit Experten aufgegriffen wird, ist der Themenkomplex Bildung, Wissensmanagement, Lehre und deren Auswirkungen auf den Wissensstand in Deutschland und die Verfügbarkeit von qualifizierten Fachkräften gerade auch im metallurgischen Bereich.

Zur weiteren Entwicklung und im späteren Verlauf auch für den Betrieb der im Labor entwickelten Verfahren werden Fachkräfte aus den Bereichen Metallurgie und Chemie benötigt. In den Studiengängen Metallurgie und Werkstofftechnik decken die jährlichen Absolventenzahlen den Bedarf jedoch nicht [Rabensaat-2007]. Hier sollten die in den letzten Jahren wieder gestiegenen Anstrengungen der universitären Bildung weiter ausgebaut werden. Eine ähnliche Entwicklung ist in Deutschland auch auf dem Gebiet der Elektrochemie zur stofflichen Produktion zu verzeichnen. Obwohl elektrochemische gegenüber konventionellen chemischen Produktionsverfahren Vorteile aufweisen, sind sie in Deutschland in den letzten 20 Jahren kaum weiterentwickelt worden, Innovationssprünge sind deshalb auch nicht erfolgt. Sowohl die akademische Lehre und Forschung als auch die berufsbegleitende Angebote an Weiterbildung für Fachkräfte wurden kontinuierlich reduziert [Enquete-NRW-2015a], [GDCH-2010], [Waldvogel-2014]. Auch identifizierte Forschungslücken, wie etwa im Bereich Germanium, können durch solche Strukturen aufgefangen werden.

Materialspezifische Kompetenz zeigt sich darüber hinaus auch in der Zahl von Patentanmeldungen. Das Monitoring der Anmeldungen in den für das Recycling relevanten Kategorien und deren Auswertung zeigt etwa, dass insbesondere im Bereich der SEE hohe Anmeldezahlen zu verzeichnen sind, besonders ab 2008 (vgl. Kapitel 4.3). Der geringe Anteil deutscher Unternehmen sowie Anmeldungen für den deutschen Wirtschaftsraum verdeutlicht, dass ein vernetzter Kompetenzaufbau (vgl. Handlungsempfehlung Nr. 9) notwendig wäre.

### Mögliche Maßnahmen

- Schaffung von disziplinübergreifenden Lehrstühlen (ggf. als Stiftungsprofessuren) und Integration des Themas in Lehrpläne von allgemeinbildenden Schulen und Berufsschulen

- Schaffung einer virtuellen Kompetenz-/Wissensplattform, z. B. analog <http://www.biotechnologie.de>
- Forschungslücke Germanium durch spezifische Forschungsprogramme schließen
- Patentanmeldungen im Bereich kritischer Rohstoffe kontinuierlich analysieren um ggf. frühzeitig Länder und/oder Unternehmen zu identifizieren, die besonders aktiv sind und im Idealfall strategische Partnerschaften anstreben

## 7.9 Handlungsempfehlung 9

### Handlungsempfehlung 9: »Vernetzung von Kompetenzen und Branchen stärken (Schnittstelleninnovationen)«

Adressierter Themenbereich:

Zusammenarbeit, Netzwerke, Kompetenzaufbau, Verfahrensinnovationen

Konkreter Nutzen:

Durch systematische Zusammenarbeit von verschiedenen Fachdisziplinen, wie z. B. Abfallwirtschaft, Bergbau, chemischer Industrie und Metallurgie, entsteht ein Kompetenzspektrum für Schnittstelleninnovationen

### Motivation und Beschreibung

Betrachtet man die industriehistorische Entwicklung in Deutschland, ist festzustellen, dass überwiegend Massenstoffströme bewegt, verarbeitet und gehandelt wurden. Kritische Rohstoffe/Technologiemetalle sind aber nur in geringen Massen/Konzentrationen in Produkten vertreten, so dass die bewegte bzw. gehandelte Masse sehr gering ist. Deswegen fehlen vielfach Erfahrungswerte zum prozesstechnischen Umgang. Gerade in der heutigen Branchenstruktur der Abfallwirtschaft fehlen auch Kompetenzen zu den notwendigen Behandlungsverfahren (Hydro- oder Pyrometallurgie). Diese Kompetenzen sind – neben neuen Anwendungen – in anderen Branchen vorhanden. Hier sollte die systematisierte Zusammenarbeit zwischen der Abfallwirtschaft, dem Bergbau, der chemischen Industrie und der Metallurgie forciert werden.

Mit den EIT KIC Raw Materials auf EU-Ebene, GERRI auf Bundesebene und Initiativen auf lokaler Ebene sind erste Beispiele initiiert worden, die eine Zusammenarbeit unterschiedlicher Akteure, z. B. aus Wissenschaft und Industrie und über Fachbereiche hinweg, fördern. Eine dauerhafte, koordinierte und systematisierte Zusammenarbeit ist gerade auch bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis wünschenswert.

### Mögliche Maßnahmen

- Stakeholderdialoge und Runde Tische zur Themen- und Strukturfindung
- Identifikation, Bewertung und Einbindung/Nutzung/Erweiterung bestehender Netzwerke (EIT KIC Raw Materials, GERRI, REWIMET, ProcessNet Fachgemeinschaft »Sustainable Production, Energy, and Resources« – Fachgrup-

pe »Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung«, VDI Richtlinienarbeit etc.)

- Entwicklung von geeigneten Netzwerkstrukturen und -formaten zur Vorbereitung von Schnittstelleninnovationen
- Entwicklung einer wiederkehrenden Veranstaltung mit anwendungsnahen Beispielen für disziplinübergreifende Zusammenarbeit und Schnittstelleninnovationen

## 8 Quellenverzeichnis

- [Achzet-2012] Achzet, B.: Empirische Analyse von preis- und verfügbarkeitsbeeinflussenden Indikatoren unter Berücksichtigung der Kritikalität von Rohstoffen: disserta Verlag, Hamburg 2012
- [Ayres-2014] Ayres, R. U.; Villalba Mendez, G.; Talens Peiró, L.: Recycling Rare Metals, in: Worrel, E.; Reuter, A. (Hrsg.): Handbook of Recycling, State-of-the-art for practitioners, analysts and scientists, Oxford, Amsterdam, 2014, 27-38
- [Bast-2014] Bast, U.; Blank, R.; Buchert, M.; Elwert, T.; Finsterwalder, F.; Hörnig, G.; Klier, T.; Langkau, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Müller, J.-O.; Thüringen, C.; Treffer, F.; Walter, T.: Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben – MORE, 2014
- [Bergamos-2015] Bergamos, M.: Mündliche Auskunft zum Projekt SEMAREC am 20.07.2015
- [Bergs-2015] Bergs, Claus-Gerhard: Klärschlammverordnung und Phosphorstrategie des Bundes, Stuttgart, 25. Juni 2015.
- [Bernhardt-2011] Bernhardt, W.: Seltene Erden – Werkstoffe mit Zukunft. MSE Newsletter der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V. Online verfügbar unter: <http://www.dgm.de/dgm-info/newsletter/2011/12/images/nachricht18.pdf>
- [Bertau-2013] Bertau M., Müller A., Fröhlich P., Katzberg M.: Industrielle Anorganische Chemie, 4. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2013
- [Blank-2015] Blank, R.: Mündliche Auskunft vom 13.07.2015 zum Thema Neodym- und Dysprosium Recycling aus Magneten
- [BMBF-2013] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Zukunftsbild »Industrie 4.0« [http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild\\_Industrie\\_40.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf), zuletzt aufgerufen am 12.08.2015
- [BMBF-2015] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Pressemitteilung: Deutsche halten Wissenschaft für einen Jobmotor. 28.07.2015
- [BMUB-2015a] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes), Stand: 2012, 2. Auflage, Berlin, 2015
- [BMUB-2015b] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) II: Fortschrittsbericht 2012-2015 und Fortschreibung 2016-2019, Stand: 10.08.2015, Entwurf, Berlin, 2015
- [BMUB-2015c] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Hintergrundinformationen zu Ökodesign. URL: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Redaktionsservice/Dokumente/0825\\_4\\_oekodesign.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Redaktionsservice/Dokumente/0825_4_oekodesign.pdf) (abgerufen am 31. August 2015). Bonn,

- 2015
- [BMUB-2015d] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Mündliche Auskunft Frau Heike Schröder, Referat WR II 3, am 31. August 2015.
- [BMWV-2010] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.): Rohstoffstrategie der Bundesregierung – Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen, Berlin, 2010
- [Böni-2015] Böni, H.; Wäger, P.; Figi, R.: Rückgewinnung von kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung, In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. (Hrsg.), Recycling und Rohstoffe, Band 8, TK Verlag, Neuruppin 2015, 443-462
- [Bublies-2006] Bublies T.: Ressourcengeographie des Metalls Indium, Universität Augsburg, Institut für Geographie, Band 1, Bayerlein GmbH, Neusäß, 2006
- [Buchert-2015] Buchert, M. et al.: 1. Policy Paper: Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft. Darmstadt, 22.07.2015
- [Bundesregierung-2002] Deutsche Bundesregierung (Hrsg.): Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, 2002
- [Bundesregierung-2012] Deutsche Bundesregierung (Hrsg.): Nationale Nachhaltigkeitsstrategie – Fortschrittsbericht 2012, Berlin 2012
- [Bundesregierung-2015] Deutsche Bundesregierung (Hrsg.): Annex zur Abschlusserklärung G7-Gipfel, 7.–8. Juni 2015. URL: [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/\\_Anlagen/G8\\_G20/2015-06-08-g7-abschluss-annex-deu.pdf;jsessionid=AF358814A87B99AA87D0F7F6BA32451F.s2t2?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/G8_G20/2015-06-08-g7-abschluss-annex-deu.pdf;jsessionid=AF358814A87B99AA87D0F7F6BA32451F.s2t2?__blob=publicationFile&v=6) (abgerufen am 03. September 2015). Schloss Elmau, 2015
- [Butcher-2014] Butcher, T.; Brown, T.: Kapitel 7 – Gallium, in: Gunn, G.(Hrsg.): Critical Metals Handbook, Chichester, 2014
- [DERA-2011] Babies, H.-G.; Buchholz, P.; Homberg-Heumann, D.; Huy, D.; Messner, J.; Neumann, W. et al.: DERA Rohstoffinformationen, Deutschland Rohstoffsituation 2010, Unter Mitarbeit von Karin Borchers und Bernard Wehenpohl, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2011
- [DERA-2013] Huy, D.; Anrduleit, H.; Babies, H.-G.; Elsner, H.; Homberg-Heumann, D.; Meßner, J.; Röhling, S.; Schauer, M.; Schmidt, S.; Schmitz, M.; Szurlies, M.: Deutschland – Rohstoffsituation 2013. Unter Mitarbeit von Hofrichter, W.; Tallig, A.; Wehenpohl, B.. Hg. V. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2014
- [DERA-2015] Schriftliche Auskunft der Deutschen Rohstoffagentur (DERA ) vom 06.08.2015 zu Rohstoff Monatspreisen verschiedener Spezifikationen für den Zeitraum Januar 2008 bis Juni 2015

- [Destatis-2008] Statistisches Bundesamt (Destatis): Klassifikation der Wirtschaftszweige, mit Erläuterungen, Wiesbaden, Dezember 2008
- [Destatis-2014] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Umweltnutzung und Wirtschaft – Bericht zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2014, Wiesbaden, 2014
- [Destatis-2015] Statistisches Bundesamt (Destatis): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen für das Jahr 2014, Fachserie 18, Reihe 1.4, Detaillierte Jahsergebnisse 2014, Wiesbaden, Mai 2015
- [Duwe-2015] Duwe, C.: Telefonische Auskunft zum geplanten Sekundärrohstoffzentrum am 31.08.2015
- [EARTO-2014] European Association of Research and Technology Organisations: The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO recommendations. 30.04.2014  
[http://www.earto.eu/fileadmin/content/03\\_Publications/The\\_TRL\\_Scale\\_as\\_a\\_R\\_I\\_Policy\\_Tool\\_-\\_EARTO\\_Recommendations\\_-\\_Final.pdf](http://www.earto.eu/fileadmin/content/03_Publications/The_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf), letzter Zugriff: 19.08.2015
- [EC-2010] European Commission (EC) (Hrsg.): Report in critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, Brüssel, Juli 2010
- [EC-2014] European Commission (EC) (Hrsg.): Report in critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, Brüssel, Mai 2014
- [ElektroG-2005] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG). In: BGBl I 2005, 762. 16. März 2005.
- [ElektroG-2015] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Referentenentwurf – Gesetz zur Neuordnung des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG). URL:  
[http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/elektrog\\_novelle\\_entwurf\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/elektrog_novelle_entwurf_bf.pdf) (abgerufen am 31. August 2015).
- [Enquete-NRW-2015a] Die Präsidentin des Landtags Nordrhein-Westfalen - Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren (Hrsg.), Präsentation des Abschlussberichts, Düsseldorf, 22. Mai 2015
- [EP-2011] Europäische Parlament: Entschließung des Europäischen Parlaments vom 13. September 2011 zu einer erfolgreichen Rohstoffstrategie für Europa (2011/2056(INI)). Amtsblatt der Europäischen Union C 51 E/21
- [ERECON-2015] Koroshy, J.; Tiess, G.; Tukker, A.; Walton, A. (Editor): Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options. 2015
- [EU-2009] Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von

- Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 31.10.2009, L 285/10-35
- [EU-2012] Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 24.7.2012, L 197/38-71
- [EU-2013] Verordnung (EU) Nr. 617/2013 der Kommission vom 26. Juni 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Computern und Computerservern. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 27.6.2013, L 175/13-33
- [EUWID-2015] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): Sammelquote für E-Schrott in Deutschland noch hinter gesetzlichen Vorgaben. In: EUWID Recycling und Entsorgung. Ausgabe 32/2015 vom 4. August 2015. Jahrgang 23. Seiten 1-2.
- [Fischer-2015] Fischer, H.: Mündliche Auskunft vom 21.07.2015 zur Anwendung von Neodym und Dysprosium in Magneten sowie zum Magnetrecycling
- [Forbes-2014] Worstall, T.: Why Lynas Corp Is Struggling; The Great Rare Earth Shortage is Truly Over, Contribution to Forbes Online, 03.08.2014.  
<http://www.forbes.com/sites/timworstall/2014/08/03/why-lynas-corp-is-struggling-the-great-rare-earth-shortage-is-truly-over/>, zuletzt aufgerufen am 11.08.2015
- [GDCh-2010] GDCh, VCI, DBG, DECHEMA und GfKORR (Hrsg.): »Elektrochemie: Herausforderungen an die Lehre in der Chemikerausbildung«, Positionspapier, Frankfurt, 2010
- [Gibson-2011] Gibson C., Hayes T.: Indium and gallium overview, commissioned by South American Silver Corp, Edison Investment research, Sector research, London, England, 2011
- [Gille-2012] Gille, G.; Meier, A.: Recycling von Refraktärmetallen, In: Thomé-Kozmiesky, K. J. und Goldmann, D. (Hrsg.), Recycling und Rohstoffe, Band 5, TK Verlag, Neuruppin 2012, 537-560
- [Goldmann-2015] Goldmann, D.: Mündliche Auskunft im Gespräch zu Forschungsprojekten und deren Umsetzung am 29.07.2015
- [Graedel-2011] Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K. et al.: What Do We Know About Metal Recycling Rates? In: Journal of Industrial Ecology 15 (3), 2011, 355–366
- [Gutzmer-2012] Gutzmer, J.: Warum gibt es Probleme mit der Versorgung strategischer Rohstoffe? Vortrag auf dem 4. Symposium Freiburger Innovationen, Freiberg, 2012
- [Hagelüken-2013] Hagelüken, C.: Stoffliche Voraussetzungen der Energiewende – Einflussfaktoren auf die Rohstoffverfügbarkeit, Vortrag im Rahmen des Ressourceneffizienz – Kolloquiums am 20. Juni 2013, Pforzheim 2013
- [Handelsblatt Online-2015] Handelsblatt Online: Molycorp – Letzter US-Produzent Seltener Erden ist pleite, 25.06.2015. <http://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/>

- molycorp-letzter-us-produzent-seltener-erden-ist-pleite/11969016.html, zuletzt aufgerufen am 22.07.2015
- [Hönderdaal-2012] Hoenderdaal, S.; Tercero Espinoza, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Graus, W.: Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? In Energy 49, Nr. 1, 2013, 344-355
- [Huisman et al.-2015] Huisman, J.; Botezatu, I.; Herreras, L.; Liddane, M.; Hintsu, J.; Luda di Cortemiglia, V.; Leroy, P.; Vermeersch, E.; Mohanty, S.; van den Brink, S.; Ghenciu, B.; Dimitrova, D.; Nash, E.; Shryane, T.; Wieting, M.; Kehoe, J.; Baldé, C.P.; Magalini, F.; Zanasi, A.; Ruini, F.; and Bonzio, A.: Countering WEEE Illegal Trade (CWIT) Summary Report, Market Assessment, Legal Analysis, Crime Analysis and Recommendations Roadmap, Lyon, Frankreich, August 2015
- [IHK-2012] Industrie- und Handelskammer zu Berlin (IHK): Incoterms®2010, Berlin, November 2012
- [ISE-2013] Institut für Seltene Erden und Metalle ISE: Seltene Erden landen im Müll, online verfügbar unter: <http://institut-seltene-erden.org/seltene-erden-landen-im-mull/>, zuletzt abgerufen am 16.07.2015
- [IZT/ISI-2009] Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT / Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung ISI: Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Einfluss des branchenspezifischen Rohstoff-bedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Karlsruhe, Berlin, 2009
- [IZT-2011] Erdmann, L.; Behrendt, S.; Feil, M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland. Unter Mitarbeit von Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und adelphi AG. Hg. v. KfW Bankengruppe. Berlin, 2011
- [Jorgenson-2006] Jorgenson, J.D., U.S. Geological Survey (USGS): Germanium Recycling in the United States in 2000, 2006
- [Kagermann-2013] Kagermann, H. et al.: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Gefördert vom BMBF, 2013
- [Kammer-2009] Kammer, U.: Recycling von seltenen Metallen und deren Verbindungen In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. (Hrsg.), Recycling und Rohstoffe, Band 2, TK Verlag, Neuruppin 2009, 647–656
- [Kingsnorth-2013] Kingsnorth, D.: Rare Earths: Is Supply Critical in 2013? AusIMM 2013 Critical Minerals Conference, Perth, Western Australia, 4./5.06.2013
- [Kleeberg-2015] Kleeberg, K.; Höck, M.; Schneider, K.: Beispielabbildung zu TRLs in r<sup>3</sup> (Auswahl) – nicht veröffentlicht; ergänzt mit telefonsicher Auskunft von Frau Kleeberg am 16.07.2015
- [KOM-2008] Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Die Rohstoffinitiative – Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern. Brüssel, 4.11.2008
- [KOM-2010] Europäische Kommission: Leitinitiative der Strategie Europa 2020



- Innovationsunion. Brüssel, 4.10.2010
- [KRESSE-2014] Wuppertal Institut (Arnold, K.; Friege, J.; Krüger, C. et al.): KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, 2014
- [LANUV-2012] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Buchert, M.: Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV Fachbericht 38, Recklinghausen 2012
- [Luidold-2013] Luidold, S.; Poscher, A.; Kaindl, M.: Recycling von Seltenen Erden aus Sekundärrohstoffen, in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Goldmann, D.(Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 6, Neuruppin, 2013, 533-544
- [Manhardt-2012] Manhardt, A.: Ressourcenfieber – Seltene Erden & kritische Metalle, Vortrag in der Reihe „Wissenschaft für jedermann“, Deutsches Museum, München, 2012
- [Melber-2015] Melber, A.: Mündliche Auskunft zum Projekt PhotoRec am 28.07.2015
- [Melcher-2014] Melcher, F.; Buchholz, P.: Kapitel 8 – Germanium, in: Gunn, G.(Hrsg.): Critical Metals Handbook, Chichester, 2014
- [Meskers-2015] Meskers, C.: Mündliche Auskunft im Gespräch zum Projekt REStrateGIS der Fördermaßnahme r<sup>3</sup> am 12.08.2015
- [Meyer-2012] Meyer, F.: Recycling von Neodym aus NeFeB-Magneten in Elektroaltgeräten – Potenziale und mögliche Recyclingverfahren. Bachelorarbeit an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg, 2012
- [Moskalyk-2003] Moskalyk, R. R.: Gallium – the backbone of the electronics industry, In: Minerals Engineering, Volume 16, Issue 10, Oktober 2003, 921.929
- [Neukirchen-2014] Neukirchen, F.; Ries, G.: Die Welt der Rohstoffe – Lagerstätten, Förderung und Wirtschaftliche Aspekte, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [Oakdene-2011] Oakdene Hollins Ltd. Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England, Annexes, Final report. Hg. V. European Pathway to Zero Waste und Environment Agency, 2011
- [Öko-Institut-2011] Öko-Institut e.V.: Study on rare earths and their recycling, Final Report for The Greens / EFA Group in the European Parliament, Darmstadt, 2011
- [Öko-Institut-2014] Öko-Institut e.V.: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Freiburg, Stuttgart, 2014
- [Polinares-2012] Polinares, Fact Sheet: Indium, EU policy on natural resources, POLINARES working paper n. 39 March 2012, 6 Version: 1.10 Status: POLINARES Consortium, 2012
- [Rabensaat-2007] Rabensaat, R.: Fachkräfte dringend gesucht. In: Die Welt vom 07.11.2007, [http://www.welt.de/welt\\_print/article1337863/Fachkraefte-dringend-gesucht.html](http://www.welt.de/welt_print/article1337863/Fachkraefte-dringend-gesucht.html), letzter Zugriff am 13.08.2015
- [Rasenack-2014] Rasenack, K.; Goldmann, D.: Herausforderungen des Indium-Recyclings aus LCD-Bildschirmen und Lösungsansätze, Berliner Recycling- und

- Rohstoffkonferenz, Berlin, 24. – 25.03.2014, Veröffentlicht in: Recycling und Rohstoffe, Band 7, Hrsg.: K.-J. Thome-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, 205-215
- [RNE-2011] Rat für Nachhaltige Entwicklung (RNE) (Hrsg.): Wie Deutschland zum Rohstoffland wird, Berlin, 2011
- [Rombach-2011] Rombach, G.: Rohstoffversorgung durch Aluminiumrecycling. – Der Europäische Ansatz und die globale Realität. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 4, TK Verlag, Neuruppin 2011, 235–245
- [Rombach-2014] Rombach, E.; Friedrich, B.: Recycling of Rare Metals, in: Worrel, E.; Reuter, A. (Hrsg.): Handbook of Recycling, State-of-the-art for practitioners, analysts and scientists, Oxford, Amsterdam, 2014, 125-150
- [Rotter-2015] Rotter, V.S.; Ueberschaar, M.; Geiping, J.; Chancerel, P.; Flamme, S.: Potenziale zum Recycling wirtschaftsstrategischer Metalle aus Elektroaltgeräten – Ergebnisse aus dem Upgrade Projekt, in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 8, TK-Verlag Neuruppin, 2015, S. 249 – 267
- [Röwer-2014] Röwer, G.: Konsequenzen der modernen Germaniumchemie, In: Kausch, P.; Bertau, M.; Gutzmer, J.; Matschullat, J. (Hrsg.): Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2014
- [StaLa BW-2013] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Schriftliche Auskunft vom 31.07.2013 zum Außenhandel Baden-Württembergs und Deutschlands 2010 nach ausgewählten Rohstoffen und Warennummern
- [Steinbach-2012] Steinbach, V.: Die Bedeutung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe und die Rolle der DERA, Vortrag auf dem 4. Symposium Freiburger Innovationen, Freiberg, 2012
- [Tolcin-2015] Tolcin A., U.S. Geological Survey (USGS), Mineral Commodity Summaries, Indium, Januar 2015, online verfügbar unter: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2015-indiu.pdf>
- [TU-Clausthal-2013] Technische Universität Clausthal und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: ENTIRE – Entwicklungen der internationalen Diskussion zur Steigerung der Ressourceneffizienz. 177 Seiten, Berlin, Clausthal-Zellerfeld, Hannover, 2013
- [UBA-2013] Umweltbundesamt (UBA): Daten zur inländischen Entnahme von Rohstoffen und Materialimporten. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/rohstoffe-als-ressource/inlaendische-entnahme-von-rohstoffen>, Dessau-Roßlau, August 2013
- [UBA-2015] Umweltbundesamt: Leistungsbeschreibung: Anforderung an die Behandlung spezifischer Elektroaltgeräte unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. Dessau-Roßlau, 28. April 2015
- [UNEP-2009] Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D.: Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potenzial. Öko-Institut e.V. im Auftrag von United Nations Environment Programme & United Nations University (UNEP), Berlin 2009

- [UNEP-2011] United Nations Environment Programme (UNEP): Recycling Rates of Metals – a status report. Paris, Mai 2011
- [UNEP-2013] Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.: Metal Recycling. Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. United Nations Environment Programme (UNEP), 2013
- [USGS-2010] U.S. Geological Survey (USGS): Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells. Circular 1365. Unter Mitarbeit von Bleiwas, D. I., Reston, 2010
- [USGS-2015a] U.S. Geological Survey (USGS): 2013 Minerals Yearbook – Indium [Advance Release]. Bearbeitung durch Tolcin, A., August 2015
- [USGS-2015b] U.S. Geological Survey (USGS): 2013 Minerals Yearbook – Germanium [Advance Release]. Bearbeitung durch Guberman, D., August 2015
- [USGS-2015c] U.S. Geological Survey (USGS): 2013 Minerals Yearbook – Gallium [Advance Release]. Bearbeitung durch Jaskula, B., Juni 2015
- [USGS-2015d] U.S. Geological Survey (USGS): 2012 Minerals Yearbook – Rare Earths [Advance Release]. Bearbeitung durch Gambogi, J., Februar 2015
- [Waldvogel-2014] Waldvogel, S.R. (Universität Mainz): Stellungnahme zum Fragenkatalog der Enquete-Kommission II »Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen« zum Thema »Elektrochemische Verfahren«, Düsseldorf, 2014
- [Wilts-2014] Wilts, H.; Lucas, R.; von Gries, N.; Zirnbiegl, M.: Recycling in Deutschland – Status Quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze, Studie im Auftrag der KfW Bankengruppe, Wuppertal, November 2014
- [Wittmer-2011] Wittmer, D.; Scharp, M.; Bringezu, S.; Ritthoff, M.; Erren, M.; Lauwigi, C.; Giegrich, J.: Umweltrelevante metallische Rohstoffe, Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projektes „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes), Teil 1: Abschlussbericht, Wuppertal, 2011
- [WSJ-2015] The Wall Street Journal, Brickley, P.: Molycorp Insists Mountain Pass Facility Won't Completely Shut Down, 16.07.2015  
<http://www.wsj.com/articles/molycorp-insists-mountain-pass-facility-wont-completely-shut-down-1437066324>, zuletzt aufgerufen am 11.08.2015
- [Zepf-2015] Zepf, V.: Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen Erden – quantitative Ergebnisse für Deutschland, in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 8, Neuruppin, 2015
- [ZVEI-2015] ZVEI-Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.): Recycling als Rohstoffquelle. Frankfurt, Januar 2015

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Darstellung der Ausgangsdaten für die Ermittlung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes am Beispiel Silizium [EC-2014]	9
Tabelle 3-1:	Darstellung der Gehalte sowie der durch Erfassung, Vor- und Endbehandlung bedingten Systemverluste am Beispiel Notebooks für ausgewählte Rohstoffe nach [LANUV-2012, Manhardt-2012]	22
Tabelle 4-1:	Prozessübersicht der Verfahren	27
Tabelle 4-2:	HORIZON 2020 TRL-Skala und projektbezogene Einteilung	28
Tabelle 4-3:	Gesamtergebnis für die Literaturdatenbank »ScienceDirect«	30
Tabelle 4-4:	Literaturlauswertung nach Prozesscluster	33
Tabelle 4-5:	Recherchierte Schlagworte	35
Tabelle 4-6:	Übersicht durchgeführte Recherchen und Trefferanzahl	36
Tabelle 4-7:	Übersicht durchgeführter Recherchen zu den einzelnen Elemente	36
Tabelle 4-8:	Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Neodym«	38
Tabelle 4-9:	Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Dysprosium«	40
Tabelle 4-10:	Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Indium«	41
Tabelle 4-11:	Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Germanium«	42
Tabelle 4-12:	Übersicht der wichtigsten anmeldenden Unternehmen »Gallium«	44
Tabelle 4-13:	Auswerteraster der geförderten Projekte	45
Tabelle 4-14:	Untersuchte Förderinitiativen und Förderprogramme in Deutschland	45
Tabelle 4-15:	Untersuchte Förderdatenbanken zu deutschen und europäischen Projekten	46

## 10 Bildverzeichnis

Bild 1-1:	Projektstruktur und Vorgehen	4
Bild 2-1:	Methodik und Ergebnis der Kritikalitätsbewertung der EU, eigene Darstellung, nach [EC-2014]	6
Bild 2-2:	Wirtschaftliche Bedeutung der Rohstoffe für Deutschland, eigene Berechnungen	10
Bild 2-3:	Gegenüberstellung des Versorgungsrisikos [EC-2014] und der wirtschaftlichen Bedeutung der Rohstoffe für Deutschland, eigene Berechnung	11
Bild 3-1:	Systemverluste während des Lebenszyklus von Indium im Jahr 2010, eigene Darstellung nach [Ayres-2014]	16
Bild 3-2:	Arbeitsschritte bei der GaAs-Waferproduktion und -verarbeitung mit anteiligen Galliumströmen nach [Stelzer-2013]	18
Bild 3-3:	Preisentwicklung der relevanten Rohstoffe von Januar 2008 bis Juni 2015 in USD/kg [DERA-2015]	25
Bild 4-1:	Vorgehensweise Literaturrecherche	30
Bild 4-2:	Anzahl der Treffer für Gallium nach Wissenschaftskategorie	31
Bild 4-3:	Anzahl der Treffer für Germanium nach Wissenschaftskategorie	31
Bild 4-4:	Anzahl der Treffer für Indium nach Wissenschaftskategorie	31
Bild 4-5:	Anzahl der Treffer für Neodym nach Wissenschaftskategorie	32
Bild 4-6:	Anzahl der Treffer für Dysprosium nach Wissenschaftskategorie	32
Bild 4-7:	Anzahl der Treffer für SEE nach Wissenschaftskategorie	32
Bild 4-8:	Literaturauswertung nach Prozesscluster	33
Bild 4-9:	TRL-Einstufung der Literaturrecherche	34
Bild 4-10:	Patentanmeldungen mit Bezug zu den Zielelementen	37
Bild 4-11:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Neodym und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf	38
Bild 4-12:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Neodym und IPC-Klassen C22B oder B09B – Länder	38
Bild 4-13:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Dysprosium und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf	39
Bild 4-14:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Neodym und IPC-Klassen C22B oder B09B – Länder	39
Bild 4-15:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Indium und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf	40

Bild 4-16:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Indium und IPC-Klassen C22B oder B09B – Länder	41
Bild 4-17:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Germanium und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf	42
Bild 4-18:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Germanium und IPC-Klassen C22B oder B09B – Länder	42
Bild 4-19:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Gallium und IPC-Klassen C22B oder B09B – zeitlicher Verlauf	43
Bild 4-20:	Patentanmeldungen mit TAC-Schlagwort Gallium und IPC-Klassen C22B oder B09B – Länder	43
Bild 4-21:	Förderprogramme und Förderinitiativen in Deutschland – ab 1995 (Stand 17.07.2015)	47
Bild 4-22:	Projektauswertung Deutschland nach definierten Zielelementen	48
Bild 4-23:	Projektauswertung Deutschland nach Prozessclusterung – ab 1995	49
Bild 4-24:	Projektauswertung EU nach definierten Zielelementen	49
Bild 4-25:	Projektauswertung EU nach Prozessclusterung – ab 1995	50
Bild 6-1:	Einordnung Begriff »Recyclingpotenzial«	54

## 11 Abkürzungsverzeichnis

ABANDA	Abfallanalysendatenbank
A <sub>s</sub>	Prozentualer Anteil der Verwendung in einer Branche
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BGR	Bundeanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BWS	Bruttowertschöpfung
CI(G)S	Kupfer-Indium-(Gallium)-Diselenide (Copper-Indium-Gallium Selenide)
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DERA	Deutschen Rohstoffagentur
Dy	Dysprosium
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräten
EoL	End of Life
EU	Europäische Union
FuE	Forschung und Entwicklung
FPD	Flat-Panel Display
Ga	Gallium
GaAs	Galliumarsenid
GaAsP	Galliumarsenidphosphid
GaP	Galliumphosphid
Ge	Germanium
HCl	Chlorwasserstoff (Salzsäure)
In	Indium
InGaN	Indiumgalliumnitrid
IPC	Internationale Patentklassifikation
ITO	Indium-Zinn-Oxid
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode

LSE	Leichte Seltene Erden
NaOH	Natriumhydroxid (Natronlauge)
Nd	Neodym
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
OSR	Schrottanteil (Old Scrap Ratio)
PET	Polyethylenterephthalat
PGM	Platingruppenmetalle
PPP	Public-Private-Partnership
Q <sub>s</sub>	Bruttowertschöpfung
RA	Recyclinganteil
RR	Recyclingrate
SEE	Seltene Erdelemente
SiGe	Silizium-Germanium-Legierungen
SSE	Schwere Seltene Erden
TAC	Title-Abstract-Claims
TRL	Technology Readiness Level
UBA	Umweltbundesamt
WB <sub>s</sub>	Wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes für Deutschland
WEEE	Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive)
WZ	Wirtschaftszweig



## 12 Anhang

### 12.1 Steckbrief Indium (Chemisches Zeichen: In)

Anwendung und Preise		
Anwendungsgebiete [EC-2014]	Davon Schlüsseltechnologien	Branchen [eigene Recherchen]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flachbildschirme (56%)</li> <li>▪ Lötmittel (10%)</li> <li>▪ Photovoltaik (8%)</li> <li>▪ Wärmeleitmaterial (6%)</li> <li>▪ Batterien (alkalisch) (5%)</li> <li>▪ Legierungen, andere Verbindungen (4%)</li> <li>▪ Verbindungen Halbleiter und LED<sup>1)</sup> (3%)</li> <li>▪ Andere Anwendungen (8%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ITO<sup>2)</sup> auf Displays</li> <li>▪ CIS<sup>3)</sup> Dünnschicht-Solarzellen</li> <li>▪ Weiße LED<sup>1)</sup> (InGaN<sup>4)</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27)<sup>5)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen (WZ 26)<sup>5)</sup></li> <li>▪ Metallerzeugung und -bearbeitung (WZ 24)<sup>5)</sup></li> <li>▪ Herstellung sonstige Waren (WZ 32)<sup>5)</sup></li> </ul>
<p><sup>1)</sup> Light Emitting Diode</p>	<p><sup>2)</sup> Indiumzinnoxid</p> <p><sup>3)</sup> Kupfer-Indium-Diselenid</p> <p><sup>4)</sup> Indiumgalliumnitrid</p>	<p><sup>5)</sup> WZ nach Destatis - Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008</p>

#### Jährliche Produktionskapazität weltweit

1 215 Tonnen in 2013 [USGS-2015a]

#### Preise

**Preisentwicklung primär 2008 bis 2015 (USD/kg)**  
**Indium: Ingots, min. 99,97 %, free market, in warehouse**  
**[BGR-2015]**

**Preise 2015**  
**Durchschnittspreis primär, Juni 2015 (USD/kg)[BGR-2015]**

Indium: ingots, min. 99,97%, free market, in warehouse 677,22

**Ankaufspreis verschiedener Qualitäten Stand 15.07.2015 (Euro/kg), [metallankauf.org]**

Indium Barren 309,00  
 [99,9999%] mit Analyse in OVP<sup>6)</sup>

Indium Barren 164,50  
 [99,999%] und Indium-Bruch ohne Analyse

Indium Legierungen 42,10  
 (z.B. Bismut, Indium, Zinn)

<sup>6)</sup> OVP: Originalverpackung

## Recyclingverfahren und -verluste

### Literaturangaben zu Recyclingraten [%]

End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	< 1 [UNEP-2011]
End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	0 [Kammer-2012]
Recyclinganteil (RA)	> 25-50 [UNEP-2011]
Schrottanteil (OSR)	< 1 [UNEP-2011]

### Recyclingverfahren (marktreif)

Es existieren marktreife Verfahren zum Recycling von Produktionsabfällen (Neuschrotten), die aber fast ausschließlich im asiatischen Raum (China, Japan, Korea) Anwendung finden

### Recyclingverfahren (Entwicklung)

Input / Stoffstrom

Indium-Recycling aus Schrott elektronischer Ausrüstung bzw. Elektroaltgeräten (Altschrott/EoL)

Indium-Recycling aus Photovoltaikzellen (Altschrott/EoL)

Hindernisse

- Fehlende Recycling-Technologien in Deutschland [LANUV-2012]
- Dissipative Anwendung im Endprodukt [Rasenack-2014, LANUV-2012]
- Volatile Preise [Schwarz-Schampera-2014]
- Mangelhafte Recyclinginfrastruktur
- Unwirtschaftlichkeit [UNEP-2009]
- Mangelhafte Recyclinginfrastruktur
- Unwirtschaftlichkeit [UNEP-2009]
- Technologie findet erst seit kurzem Anwendung → derzeit noch kein relevanter Abfallstrom, gewinnt in der Zukunft jedoch an Bedeutung [Schwarz-Schampera-2014]

### Rohstoffverluste

- Recyclingprozesse nur bedingt auf Technologiemetalle ausgerichtet, dissipativ verteilte Rohstoffe gehen dabei verloren. Aussagen zu konkreten Verlustmengen können hierbei nicht getroffen werden. Dies gilt insbesondere für die weniger bedeutsamen Anwendungsgebiete, da hierfür keine detaillierten Stoffstromanalysen vorliegen.
- Eine mangelhafte Recyclinginfrastruktur (Erfassung, Aufbereitung, Verwertung) führt zu teils erheblichen Rohstoffverlusten. Darüber hinaus erschweren Beschädigungen und Verunreinigungen eine fachgerechte Aufbereitung und führen zu weiteren Prozessverlusten.

## 12.2 Steckbrief Germanium (Chemisches Zeichen: Ge)

Anwendung und Preise		
Anwendungsgebiete [EC-2014]	Davon Schlüsseltechnologien	Branchen [eigene Recherchen]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Telekommunikation / Glasfaseranwendungen (30%)</li> <li>▪ Katalysatoren für die Polymererzeugung (25%)</li> <li>▪ Infraroptik (25%)</li> <li>▪ Elektronik und Solartechnologien (15%)</li> <li>▪ Andere Anwendungen (5%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Glasfasertechnologie</li> <li>▪ Nachtsichtgeräte</li> <li>▪ Photovoltaik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren (WZ 22)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen (WZ 26)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Herstellung von sonstigen Waren (WZ 32)<sup>1)</sup></li> </ul>

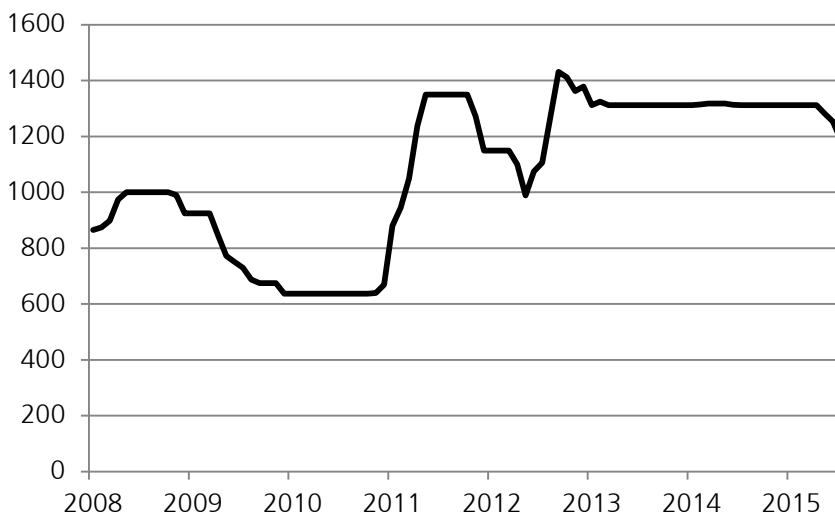
<sup>1)</sup>WZ nach Destatis - Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008

### Jährliche Produktionskapazität weltweit

155 Tonnen in 2013 [USGS-2015b]

### Preise

**Preisentwicklung primär 2008 bis 2015 (USD/kg)**  
**Germanium: Dioxid, min. 99,99 %, MB free market, in warehouse [BGR-2015]**



**Preise 2015**  
**Durchschnittspreis primär, Juni 2015 (USD/kg) [BGR-2015]**

Germanium: Dioxid min. 99,99%, MB free market, in warehouse 1.253,75

**Ankaufspreis verschiedener Qualitäten Stand 15.07.2015 (Euro/kg) [metallankauf.org]**

Germanium Barren, min. 99,9999% mit Analyse OVP<sup>3)</sup> 725,90

Germanium ohne Analyse und Germanium-Bruch 376,00

<sup>3)</sup>Originalverpackung

## Recyclingverfahren und -verluste

### Literaturangaben zu Recyclingraten [%]

End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	< 1 [UNEP-2011]
End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	0 [Kammer-2012]
End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	0 [EC-2014]
Recyclinganteil (RA)	> 25-50 [UNEP-2011]
Schrottanteil (OSR)	< 1 [UNEP-2011]

### Recyclingverfahren (marktreif)

Es existieren marktreife Verfahren zum Recycling von Produktionsabfällen (Neuschrotten). Die primäre und sekundäre Verarbeitung erfolgt zusammen und findet somit nur in den entsprechenden Förderländern statt [Jorgenson-2006].

### Recyclingverfahren (Entwicklung)

Input / Stoffstrom	Hindernisse
Recycling von post-consumer Schrott aus Gehaltigen Glasfaserkabeln und im Bereich optischer Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dissipative Anwendung [Melcher-2014]</li> <li>▪ Fehlende Infrastruktur / Recyclingverfahren [UNEP-2009]</li> <li>▪ Abfallstrom hat den Markt noch nicht erreicht [UNEP-2009]</li> </ul>
Germaniumrecycling durch Flüssig-Ionen-Austausch-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In der Entwicklungsphase, noch keine näheren Informationen bekannt</li> </ul>

### Rohstoffverluste

- Germanium geht in seiner Anwendung als Katalysatormetall bei der PET-Herstellung in das Polymer über und somit in diesem Anwendungsfall vollständig verloren
- Deutschland deckt einen Großteil seines Kohlebedarfs durch Importe. Das in der Kohle enthaltene und durch den Verbrennungsprozess in die Flugasche übergehende Germanium geht derzeit verloren
- Aufgrund der Verwendung von Germanium in strategischen / militärischen Anwendungen gibt es keine verfügbaren Daten zu Verlusten in diesem Sektor

### 12.3 Steckbrief Gallium (Chemisches Zeichen: Ga)

Anwendung und Preise		
Anwendungsgebiete [EC-2014]	Davon Schlüsseltechnologien	Branchen [eigene Recherchen]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Integrierte Schaltungen (41%)</li> <li>▪ LED<sup>1)</sup> (25%)</li> <li>▪ Legierungen, Batterien und Magnete (17%)</li> <li>▪ Solar (17%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Integrierte Schaltkreise (IC)</li> <li>▪ LED<sup>1)</sup></li> <li>▪ Dünnschicht-Photovoltaik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27)<sup>2)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen (WZ 26)<sup>2)</sup></li> </ul>

<sup>1)</sup> Light Emitting Diode

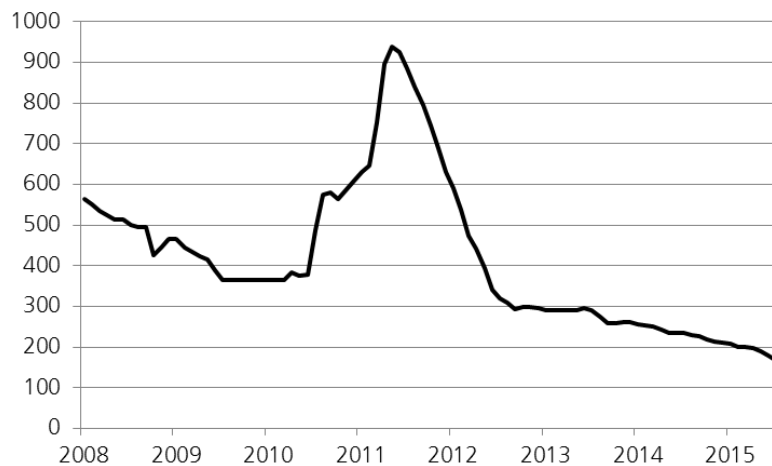
<sup>2)</sup>WZ nach Destatis - Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008

#### Jährliche Produktionskapazität weltweit

570 Tonnen in 2013 [USGS-2015c]

#### Preise

**Preisentwicklung primär 2008 bis 2015 (USD/kg)**  
**Gallium: min. 99,99 %, fob China [BGR-2015]**



#### Preise 2015

**Durchschnittspreis primär, Juni 2015 (USD/kg)[BGR-2015]**

Gallium: min. 99,99%, fob<sup>3)</sup> China 178,33  
<sup>3)</sup>free on board

**Ankaufspreis verschiedener Qualitäten Stand 15.07.2015 (Euro/kg) [metallankauf.org]**

Gallium Metall min. 99,9% 81,60

Indium-Gallium Legierung, rein (Indium min. 50%) 96,90

Indium-Gallium Legierung mit Verunreinigungen 75,20

## Recyclingverfahren und -verluste

### Literaturangaben Recyclingraten [%]

End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	< 1 [UNEP-2011]
End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	0 [Kammer-2012]
End of Life Recyclingrate (EoL-RR)	0 [Jaskula-2015]
Recyclinganteil (RA)	> 10-25 [UNEP-2011]
Schrotanteil (OSR)	< 1 [UNEP-2011]

### Recyclingverfahren (marktreif)

Input / Stoffstrom	Hindernisse
Gallium-Recycling aus Verarbeitungs- bzw. Produktionsrückständen (Neuschrott)	Sehr hoher Chemikalieneinsatz (NaOH, HCl), jedoch neue Technologien mit Membranverfahren in Entwicklung [Stelter-2013]

### Recyclingverfahren (Entwicklung)

Input / Stoffstrom	Hindernisse
Gallium-Recycling aus Elektroaltgeräten (Altschrott(EoL))	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Neue Produkttechnologien: fehlende Infrastruktur und Technologie für Recycling [UNEP-2009]</li> <li>▪ Geringe Mengen im Endprodukt (ppm Bereich) bzw. dissipative Anwendung [Stelter-2013]</li> <li>▪ Störstoffe Al, Fe erhöhen den Recyclingaufwand und machen Verfahren unwirtschaftlich [Stelter-2013]</li> </ul>
Gallium-Recycling aus Solarmodulen (CIGS) <sup>4)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Technologie findet erst seit kurzem Anwendung → derzeit noch kein relevanter Abfallstrom, gewinnt in der Zukunft jedoch an Bedeutung [Butcher-2014]</li> </ul>

<sup>4)</sup> Kupfer, Indium, Gallium, Selen

### Rohstoffverluste

- Recyclingprozesse nur bedingt auf Technologiemetalle ausgerichtet, dissipativ verteilte Rohstoffe gehen dabei verloren. Aussagen zu konkreten Verlustmengen können hierbei nicht getroffen werden, da nur für wenige Recyclingprozesse (z. B. UMICORE) Prozessverluste angegeben werden.
- Bei der Galliumarsenid Waferproduktion und -verarbeitung gehen etwa 15% des eingesetzten Galliums verloren (Reste aus Recycling der Produktionsrückstände bzw. der Abwasserneutralisation → Deponierung) [Stelter-2013]
- Eine mangelhafte Recyclinginfrastruktur (Erfassung, Aufbereitung, Verwertung) führt zu teils erheblichen Rohstoffverlusten

### 12.4 Steckbrief Neodym (Chemisches Zeichen: Nd)

Anwendung und Preise		
Anwendungsgebiete [Zhang-2013]	Davon Schlüsseltechnologien	Branchen [eigene Recherchen]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Magnete (76%)</li> <li>▪ Metallurgie (8%)</li> <li>▪ Batterie Legierungen (5 %)</li> <li>▪ Keramik (3,5 %)</li> <li>▪ Glass Additive (1,5 %)</li> <li>▪ Autokatalysatoren (1 %)</li> <li>▪ Andere Anwendungen (5 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Magnetanwendungen</li> <li>▪ Festkörperlaser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen (WZ 26)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Metallerzeugung und -bearbeitung (WZ 24)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (WZ 23)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen (WZ 29)<sup>1)</sup></li> </ul>

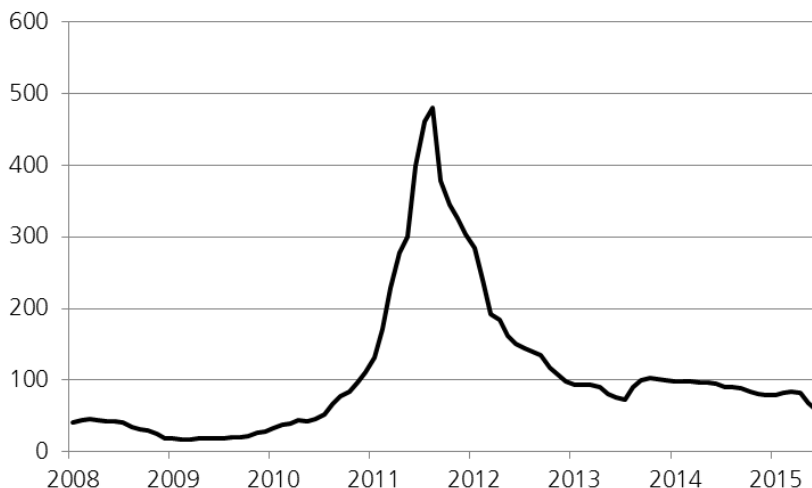
<sup>1)</sup>WZ nach Destatis – Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008

#### Jährliche Produktionskapazität SEE weltweit

112 000 Tonnen in 2013 [USGS-2015d]

#### Preise

**Preisentwicklung primär 2008 bis 2015 (USD/kg)  
Neodym: Metall, min. 99%, fob China [BGR-2015]**



#### Preise 2015

**Durchschnittspreis primär, Juni 2015 (USD/kg)[BGR-2015]**

Neodym (metal) min. 99% fob <sup>2)</sup>	59,00
China	

**Ankaufspreis verschiedener Qualitäten Stand 15.07.2015 (Euro/kg) [metallankauf.org]**

Neodym Metall min, 99%	39,50
------------------------	-------

<sup>2)</sup>free on board

## Recyclingverfahren und -verluste

### Literaturangaben zu Recyclingraten [%]

End of Life Recyclingrate (EoL-RR) < 1 [UNEP-2011]

Recyclinganteil (RA) > 1-10 [UNEP-2011]

### Recyclingverfahren (marktreif)

Input / Stoffstrom

Neodym-Recycling aus Magneten  
(meist pre-consumer Schrott, Magnetsplitter,-schlamm)

Recycling von Neodym aus Batterien

Hindernisse

- Nur gewisser Recyclinganteil in neuen Magneten verwendbar (verminderte Qualität)
- bestimmte Verfahren liefern nur Dy-Nd Gemische und keine reinen Produkte
- Anfallen schädlicher Abfälle
- Hohe Investition für Recyclingtechnik/-anlage nötig [Meyer-2012]
- Entstehung schädlicher Abfallprodukte
- Focus des Recyclings liegt nicht auf den Seltenen Erden sondern Nickel und Kobalt [Luidold-2013]

### Recyclingverfahren (Entwicklung)

Input / Stoffstrom

Neodym-Recycling aus Magneten  
(Windturbinen, Motoren)

Neodym-Recycling aus elektronischen Altgeräten  
(z. B. Computer, Kopfhörer)

Hindernisse

- kein funktionierender Markt für post-consumer Magnetschrotte
- fehlende Schrottströme mit SE Magneten [Öko-Institut -014]
- lange Produktlebensdauer Windturbinen (20 Jahre) [Böni-2015, Zepf-2015]
- Technologie findet erst seit kurzem Anwendung → derzeit noch kein relevanter Abfallstrom, gewinnt in der Zukunft jedoch an Bedeutung
- Recyclingtechnologie und Infrastruktur noch in der Entwicklung [Rombach-2014]
- Fehlende Separierungs- und Aufbereitungsprozesse [Rademaker-2013]
- Geringer Marktpreis von Neodym
- Nd nicht im Fokus des Recyclings
- Export der Produkte [ISE-2013]
- Hoher Zerlegeaufwand (Zeit und Kosten) [Böni-2015]
- Dissipative Anwendung im Endprodukt [Öko- Institut-2011]
- Export der Produkte [ISE-2013]



### **Rohstoffverluste**

- Recyclingprozesse nur bedingt auf Technologiemetalle ausgerichtet, dissipativ verteilte Rohstoffe gehen dabei verloren.
- Eine mangelhafte Recyclinginfrastruktur (Erfassung, Aufbereitung, Verwertung) führt zu teils erheblichen Rohstoffverlusten
- Rohstoffverluste bei den weniger gängigen Anwendungsgebieten mangels Stoffstromanalyse unbekannt
- Rohstoffverluste durch Exporte ins Ausland (Elektroaltgeräte, Industriemotoren)

## 12.5 Steckbrief Dysprosium (Chemisches Zeichen: Dy)

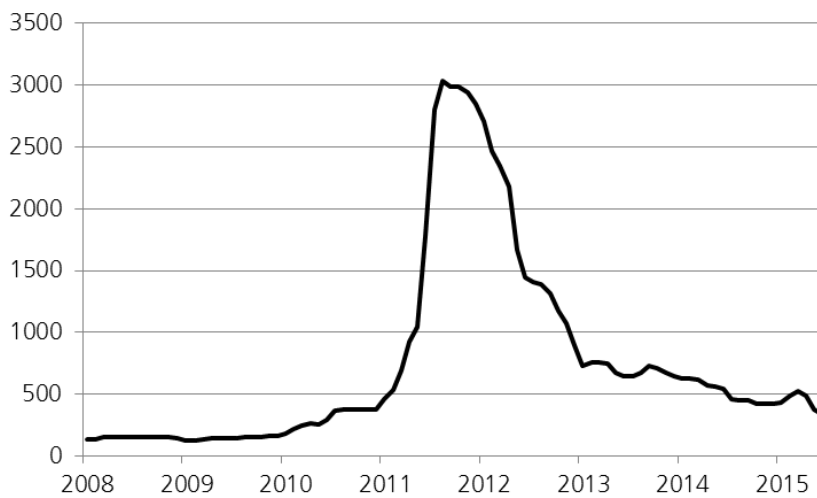
Anwendung und Preise		
Anwendungsgebiete [Hoenderdaal-2012]	Davon Schlüsseltechnologien	Branchen [eigene Recherchen]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Magnete (95%)</li> <li>▪ Vielschicht Keramikkondensatoren, Terfenol-D Produktion und andere Anwendungen (5%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Windkraftanlagen</li> <li>▪ Elektromotoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27)<sup>1)</sup></li> <li>▪ Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen (WZ 26)<sup>1)</sup></li> </ul>
<p><sup>1)</sup>WZ nach Destatis – Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008</p>		

### Jährliche Produktionskapazität SEE weltweit

112 000 Tonnen in 2013 [USGS-2015d]

### Preise

**Preisentwicklung primär 2008 bis 2015 (USD/kg)**  
**Dysprosium: Metall, min. 99% fob China [BGR-2015]**



### Preise 2015

**Durchschnittspreis primär, Juni 2015 (USD/kg) [BGR 2015]**

Dysprosium:  
 Metall, min. 99%, fob<sup>2)</sup> China 339,29

**Ankaufspreis verschiedener Qualitäten Stand 15.07.2015 (Euro/kg) [metallankauf.org]**

Dysprosium, min. 99%, stückig 270,00

<sup>2)</sup>free on board

## Recyclingverfahren und -verluste

### Literaturangaben zu Recyclingraten [%]

End of Life Recyclingrate (EoL-RR) < 1 [UNEP 2011]

Recyclinganteil (RA) > 1-10 [UNEP-2011]

### Recyclingverfahren (marktreif)

Input / Stoffstrom

Dysprosium-Recycling aus Magneten  
(meist pre-consumer Schrott, Magnetsplitter, -schlamm)

Hindernisse

- Nur gewisser Recyclinganteil in neuen Magneten verwendbar (verminderte Qualität)
- bestimmte Verfahren liefern nur Dy-Nd Gemische und keine reinen Produkte
- Anfallen schädlicher Abfälle
- Hohe Investitionskosten [Meyer-2012]

### Recyclingverfahren (Entwicklung)

Input / Stoffstrom

Dysprosium-Recycling aus alten Magnetschrotten  
(Windturbinen, Motoren)

Hindernisse

- kein funktionierender Markt für post-consumer Magnetschrotte
- fehlende Schrottströme mit SE Magneten [Öko-Institut-2014]
- lange Produktlebensdauer Windturbinen (20 Jahre) [Böni-2015, Zepf-2015]
- Technologie findet erst seit kurzem Anwendung → derzeit noch kein relevanter Abfallstrom, gewinnt in der Zukunft jedoch an Bedeutung
- Recyclingtechnologie und Infrastruktur in der Entwicklung [Rombach-2014]
- Fehlende effiziente Separierungs- und Aufbereitungsprozesse [Rademaker-2013]
- Geringer Marktpreis von Dysprosium
- Dy nicht im Fokus des Recyclings
- Export der Produkte [ISE-2013]
- Hoher Zerlegeaufwand [Böni-2015]
- Dissipative Anwendung [Öko Institut-2011]
- Export der Produkte [ISE-2013]

Dysprosium Recycling aus elektronischen Altgeräten  
(z. B. Computer, Notebooks)

### Rohstoffverluste

- Recyclingprozesse nur bedingt auf Technologiemetalle ausgerichtet, dissipativ verteilte Rohstoffe gehen dabei verloren.
- Eine mangelhafte Recyclinginfrastruktur (Erfassung, Aufbereitung, Verwertung) führt zu teils erheblichen Rohstoffverlusten (vgl. Ergebnisse)
- Rohstoffverluste bei den weniger gängigen Anwendungsgebieten mangels Stoffstromanalyse unbekannt
- Rohstoffverluste durch Exporte ins Ausland (Elektroaltgeräte, Industriemotoren)

## 12.6 Liste der durchgeführten Experteninterviews

Datum	Experte/Expertin   Einrichtung/Unternehmen	pers./tel.*
18. Juni 2015	Dipl.-Geol. Dr. Harald Elsner   Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)	tel.
13. Juli 2015	Rolf Blank   VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG	tel.
14. Juli 2015	Dr. Ulrich Schwarz-Schampera   Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)	tel.
20. Juli 2015	Maik Bergamos   ELPRO Elektronik-Produkt Recycling GmbH	pers.
20. Juli 2015	Dr. Gunter Daub   ppm pure metals	pers.
21. Juli 2015	Harald Fischer   Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. Kommanditgesellschaft	tel.
21. Juli 2015	Dr. Martin Schmitz   Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)	tel.
22. Juli 2015	Jochen Schiemann   Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.	pers.
22. Juli 2015	Michael Schäfer   Metallverarbeitungsgesellschaft mbH	E-Mail
28. Juli 2015	Dr. Albrecht Melber   Accurec Recycling GmbH Marek Bartosinski   Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling RWTH Aachen	pers.
29. Juli 2015	Prof. Dr. Daniel Goldmann   Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal	pers.
6. August 2015	Ulrike Dorner   Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA)	tel.
12. August 2015	Dr. Christina Meskers   Umicore Precious Metals Refining Marcel Picard   Umicore AG & Co. KG	pers.
31. August 2015	Christian Duwe   REWIMET Recycling-Cluster wirtschaftsstrategischer Metalle Niedersachsen e.V.	tel.

\*pers.: persönliches Interview | tel.: telefonisches Interview