

TEXTE

68/2017

Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra)

Zusammenfassung

TEXTE 68/2017

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 93 339
UBA-FB 002458/KURZ

Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra)

Zusammenfassung

von

Knut Sander
Ökopol GmbH, Hamburg

Stefan Gößling-Reisemann
Universität Bremen, Bremen

Till Zimmermann
Ökopol GmbH, Hamburg

Frank Marscheider-Weidemann
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Henning Wilts
Wuppertal Institut, Wuppertal

Liselotte Schebeck
TU Darmstadt, Darmstadt

Jörg Wagner
INTECUS GmbH, Dresden

Hanspeter Heegn
UVR Fia, Freiberg


Alexandra Pehlken
Universität Oldenburg, Oldenburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Ökopol GmbH
Nernstweg 32 – 34
22765 Hamburg

Abschlussdatum:

Juli 2016

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und
Metallindustrie
Jan Kosmol

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, August 2017

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3711 93 339 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Hintergrund und Zielsetzung..... | 2 |
| 2 | Identifikation strategischer Metalle..... | 2 |
| 3 | Bestimmung der Stoffströme..... | 3 |
| 4 | Ermittlung von Recycling- und Substitutionspotenzialen..... | 5 |
| 5 | Handlungsempfehlungen | 9 |
| 6 | Quellen | 16 |

1 Hintergrund und Zielsetzung

Viele moderne Produkte enthalten sogenannte strategische Metalle, die für die Funktion dieser Produkte von zentraler Bedeutung sind. Neben einer hohen wirtschaftlichen Bedeutung unterliegen strategische Metalle gleichzeitig einer Reihe von Versorgungsrisiken, die geologischer, technischer, struktureller, geopolitischer, sozioökonomischer und auch ökologischer Art sein können. Diese Metalle sollten daher nach Möglichkeit nach Ende der Nutzungszeit erfasst und wieder in den Rohstoffkreislauf zurückgeführt werden.

Im Vorhaben ReStra wurden für ausgewählte Produkte und Produktgruppen Massenströme strategischer Metalle ermittelt und bezogen auf die heutige Entsorgungssituation für das Jahr 2020 prognostiziert. Weiterhin wurden Optimierungspotenziale in den jeweiligen Entsorgungsketten identifiziert und Empfehlungen entwickelt, diese Potenziale zu realisieren.

2 Identifikation strategischer Metalle

Als Ausgangspunkt wurden zunächst strategische Metalle identifiziert, die im Projekt ReStra weitergehend untersucht wurden. Für die Bestimmung dieser Elemente wurde das Konzept der Rohstoffkritikalitätsmatrix angewendet, das sich in den letzten Jahren zur Bestimmung relativer Rohstoffknappheiten etabliert hat. Nach diesem Konzept ergibt sich die Kritikalität eines Rohstoffs aus zwei Dimensionen: der wirtschaftlichen Bedeutung und dem Versorgungsrisiko bzw. der Verfügbarkeit. Je höher das Versorgungsrisiko und je höher die wirtschaftliche Bedeutung, umso kritischer wird ein untersuchter Rohstoff bewertet.

Die Kriterien zur Quantifizierung des Versorgungsrisikos und der wirtschaftlichen Bedeutung wurden auf Basis der in einschlägigen Kritikalitätsstudien angewandten Kriterien im Rahmen des Vorhabens um eine umweltpolitische Perspektive erweitert: Die Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung erfolgte in ReStra auch im Hinblick auf die Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial. Auf Seite der Versorgungsrisiken wurde neben gängigen technischen, geopolitischen und ökonomischen Kriterien auch ein Kriterium für die Umweltrelevanz der Primärrohstoffgewinnung angelegt, um den erwünschten umweltentlastenden Effekt einer Substitution von Primärrohstoffen zu adressieren. Die einzelnen Indikatoren wurden wie in Tabelle 1 dargestellt gewichtet.

Tabelle 1: Gewichtung der Kriterien für wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko

| Bereich | Kriterium | Gewichtung |
|---------------------------|---|------------|
| Wirtschaftliche Bedeutung | Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial | 25 % |
| | Aktueller Verbrauch in Deutschland | 25 % |
| | Erwarteter globaler Nachfrageimpuls | 25 % |
| | Substituierbarkeit | 25 % |
| Versorgungsrisiko | Länderkonzentration Reserven | 15 % |
| | Länderrisiko Produktion | 10 % |
| | Firmenkonzentration | 10 % |
| | Haupt-/Nebenprodukt | 15 % |
| | Umweltrelevanz (KEA) | 30 % |
| | Recyclingfähigkeit | 15 % |
| | Recyclingquote | 5 % |

Aus der Diskussion der Ergebnisse ergab sich die Auswahl der strategischen Metalle, die im weiteren Verlauf des Projektes näher untersucht wurden. Dies sind die Metalle, die sich im Basisfall

in der Zone höchster oder hoher Kritikalität befinden. Da Gold bei der Gewinnung eine hohe Umweltrelevanz durch die Toxizität der verwendeten Chemikalien wie Quecksilber oder Cyanide aufweist (Blacksmith, 2011), wurde es mit untersucht. Somit ergaben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Metalle für die weitere Untersuchung.

Tabelle 2: Auswahl der „ReStra-Elemente“

| Elemente | Bemerkung |
|---------------|--|
| Seltene Erden | Zone höchster Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen |
| Palladium | Zone höchster Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen |
| Gallium | Zone hoher Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse |
| Germanium | Zone hoher Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse |
| Indium | Zone hoher Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse |
| Gold | Zone hoher Kritikalität in einer Sensitivitätsanalyse, Umweltrelevanz von Gold im Bereich der Toxizität bei der Gewinnung (Blacksmith, 2011) |
| Rhodium | Zone hoher Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen, wird als Platingruppenmetall zusammen mit Palladium betrachtet. |
| Platin | Zone hoher Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse, wird als Platingruppenmetall zusammen mit Palladium betrachtet. |

Bei den Seltenen Erden erfolgte eine weitere Verfeinerung der Metallauswahl. Dies betrifft insbesondere die leichten Seltenen Erden, die als weniger kritisch einzustufen sind. Von diesen wurden aufgrund ihrer Massenrelevanz nur Cer und Lanthan sowie zusätzlich Neodym bei den folgenden Analysen berücksichtigt, soweit bei den analysierten Produkten Erkenntnisse bzgl. eventueller Neodymmengen erlangt wurden. Bei den schweren Seltenen Erden werden die weniger kritischen Elemente Holmium, Thulium und Lutetium nicht weiter betrachtet. In den weiteren Analysen wurden also folgende Seltene Erden betrachtet: Yttrium (Y), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Erbium (Er) sowie Cer (Ce) und Lanthan (La) und mit Einschränkung Neodym (Nd).

3 Bestimmung der Stoffströme

Als zweiter Schritt wurden die in Deutschland aus bestimmten Produkten als Abfall anfallenden Mengen strategischer Metalle bestimmt. Wesentlicher Ansatz war ein (prospektives) produktspezifisches Vorgehen, in dem ausgehend von ausgewählten Produkten die aus diesen Produkten im Jahre 2020 als Abfall zu erwartende Menge strategischer Metalle bestimmt wurde.

Weiterhin wurde die Verfügbarkeit bzw. Eignung von veröffentlichten Abfallanalysen zur Bestimmung von relevanten Abfallarten untersucht. Anzahl und Art der veröffentlichten Ergebnisse ließen jedoch keine belastbare Darstellung von Stoffströmen der ausgewählten ReStra-Elemente zu.

Die Analyse der Mengen strategischer Metalle, die aus Produkten im Jahr 2020 potenziell als Abfall anfallen, erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren. In einem ersten Schritt wurde basierend auf der Metallauswahl und der Anwendungsfelder dieser Metalle eine Auswahl relevanter Produktgruppen getroffen. In einem nächsten Schritt wurden diese Produktgruppen in einzelne Produkte zerlegt, die - soweit möglich - nach ihrer Mengenrelevanz (bezogen auf die relevanten Metalle) in eine Rangfolge gebracht wurden. Für diese Produkte erfolgte dann in einem nächsten Schritt modellgestützt eine Abschätzung der Frachten strategischer Metalle, die im Jahr 2020 in Deutschland potenziell für eine Rückgewinnung zur Verfügung stehen.

Die folgende Tabelle zeigt die anhand der Metallauswahl als relevant identifizierten Produktgruppen sowie die vor und nach der Produktanalyse als relevant identifizierten Metalle. In der letzten Spalte sind die in dieser Studie untersuchten Produkte angegeben. Metalle, deren Relevanz für die Produktgruppe nach der Produktgruppenidentifizierung noch unklar war, sind in Klammern dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht analysierter Produkte und Metalle

| Produktgruppe | Metallvorauswahl aus Produktgruppenidentifizierung | Relevante Metalle nach Produktanalyse | Analysierte Produkte |
|---|--|---------------------------------------|--|
| Industriekatalysatoren | Ge, Pd, Pt, Rh, (Ce), La | Ge, Pd, Pt, Rh, Ce, La, (Nd, Pr) | FCC-Katalysatoren, Katalysatoren der homogenen Katalyse, Raffineriekatalysatoren, Salpetersäureherstellung, Blausäureherstellung, Fest- und Wirbelbettkatalysatoren, Pulverkatalysatoren, Polymerisationskatalysatoren |
| Autokatalysatoren | Pd, Pt, Rh, Ce, La | Pd, Pt, Rh, Ce, La | Autokatalysatoren |
| Automobilkomponenten | Gd, (Tb), Dy | Gd, Tb, Dy | PKW, Nutzfahrzeuge |
| Metallurgie/Legierungen | Ce, La | Ce, La | Mischmetall |
| Batterien | Sm, (Ce), La | SE (Ce, La, Nd, Pr)* | NiMH-Batterien |
| Anwendungen der optischen Industrie | Er, Ce | Ce, La | Poliermittel bzw. -schlämme, Spezialgläser |
| Laseranwendungen | Er | Er | Medizinische Laser (Er-YAg) |
| Windenergie | Gd, (Tb), Dy | Nd, Dy, Tb | DA-PM; IA-PM |
| Medizintechnische Geräte | (Tb), Dy, Gd, (Y) | Nd, Pr, Dy, Tb, Gd | MRT-Geräte, Röntgengeräte |
| Brennstoffzellen | (Pt, Pd, Y) | Y, La | SOFC-BSZ |
| Optische Fasernanwendungen | Ge, Er | Ge, Er | Glasfaser Infrastruktur im öffentlichen Raum; Glasfaser in Rechenzentren; Erbium-dotierte Faserverstärker |
| Photovoltaik | In, Ga, Ge | In, Ga | CIGS, CdTe, a-Si |
| LEDs | In, Ga | In, Ga, Ce, Y, Au | LED-Anzeigetafeln |
| Haushaltsanwendungen | (Tb, Dy) | Nd, Dy, Tb | Elektrofahrräder, Nabendynamos, Raumklimaanlagen |
| Keramiken | Y, (Ce) | Y | Schleifkeramiken, keramische Hitzeschutzbeschichtung |
| Absorbermaterial & Kontrollstäbe in Kernreaktoren | In, Gd | In, Gd | Absorbermaterial in Kernreaktoren, Kontrollstäbe in Kernreaktoren |
| Hochtemperatursupraleiter | Y | Y | SQUIDS |
| Rechenzentren | (Pd) | Pt, Pd, Au | Rechenzentren |

*Die Analyse der Batterien ist für Seltene Erden insgesamt erfolgt, eine mengenmäßige Aufteilung der Anteile der einzelnen Seltenen Erdmetalle war nicht möglich.

In folgender Tabelle sind die so abgeschätzten in 2020 zu erwartenden Mengen strategischer Metalle zusammengefasst. Die in der Tabelle dargestellten Größen beziehen sich auf die Mittel bzw. Referenzwerte der Analyse der jeweiligen Produkte. Zur besseren Einordnung werden die ermittelten Mengen zusätzlich zur globalen Primärproduktion in Relation gesetzt.

Tabelle 4: Zusammenfassung der zu erwartenden Metallmengen in 2020

| Element | Menge in 2020 [kg] | Globale (Primär-) Produktion [kg] | Anteil an globaler Produktion [%] |
|-------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Pt | 7.052 | 179.000 | 3,94 |
| Pd | 14.201 | 200.000 | 7,101 |
| Rh | 3.253 | 28.000 | 11,618 |
| Au | 473 | 2.700.000 | 0,018 |
| In | 121 | 670.000 | 0,018 |
| Ga | 13 | 273.000 | 0,005 |
| Ge | 2,3 | 118.000 | 0,002 |
| Y | 65.440 | 12.300.000 | 0,532 |
| La | 273.619 | 21.900.000 | 1,249 |
| Ce | 419.213 | 27.900.000 | 1,503 |
| Nd | 14.677 | 14.800.000 | 0,099 |
| Gd | 929 | 2.200.000 | 0,042 |
| Tb | 491 | 300.000 | 0,164 |
| Dy | 4.517 | 1.700.000 | 0,266 |
| Er | 14 | 900.000 | 0,002 |
| SE, unspez. | 299.152 | | |

Quellen: USGS; Bell 2013; Du und Graedel 2011b. Daten für Pt, Pd, Au, In, Ga, Ge stammen vom U.S. Geological Survey und beziehen sich auf 2012, Daten zu Rh stammen von Bell (2013) ohne Jahresangabe, die Daten zu Seltenen Erden stammen von Du und Graedel (2011) und beziehen sich auf 2007.

4 Ermittlung von Recycling- und Substitutionspotenzialen

Im nächsten Schritt wurde untersucht, welche Erfassungssysteme sowie Technologien zur Vorbehandlung und zur Rückgewinnung strategischer Metalle für die ausgewählten Altprodukte bereits angewendet werden, welche Technologien verfügbar sind, jedoch bislang nicht oder nur vereinzelt zum Einsatz kommen, inwieweit diese zu einer Optimierung der Recyclingsituation beitragen können und welche Pfadabhängigkeiten bezüglich der bestehenden Entsorgungsketten festzustellen sind.

Zunächst erfolgte hierzu ein Technologiescreening, um die in Bezug auf die untersuchten Metalle und Produkte relevanten Recyclingtechnologien zu identifizieren, wobei auch Technologien in Labor- und Pilotmaßstab einbezogen wurden. Anschließend erfolgte eine Analyse der Entsorgungsketten der zuvor analysierten Produkte in Bezug auf auftretende Verluste strategischer Metalle mit Fokus auf die Ist-Situation in Deutschland. Aufbauend auf der Ist-Situation der Entsorgungsketten wurden anschließend – soweit möglich – optimierte Entsorgungsketten für die untersuchten Produkte skizziert.

Die folgende Tabelle fasst die prognostizierten Stoffströme zusammen. Ausgehend von der Ist-Situation und der skizzierten optimierten Entsorgungsketten wurde eine Differenz der (absoluten) Verluste strategischer Metalle aus den Abfallströmen der untersuchten Produkte in 2020 bestimmt.

Tabelle 5: Vergleich der Materialverluste in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette für das Jahr 2020

| Produkt | Ist-Situation | Optimierte Entsorgung | Differenz |
|------------------------------------|---|---|---------------------------------------|
| PGM-haltige Industriekatalysatoren | 74-80 kg Pt 213-234 kg Pd 34-38 kg Rh | 58-62 kg Pt 139-153 kg Pd 34-38 kg Rh | 15-18 kg Pt 74-81 kg Pd 0 kg Rh |

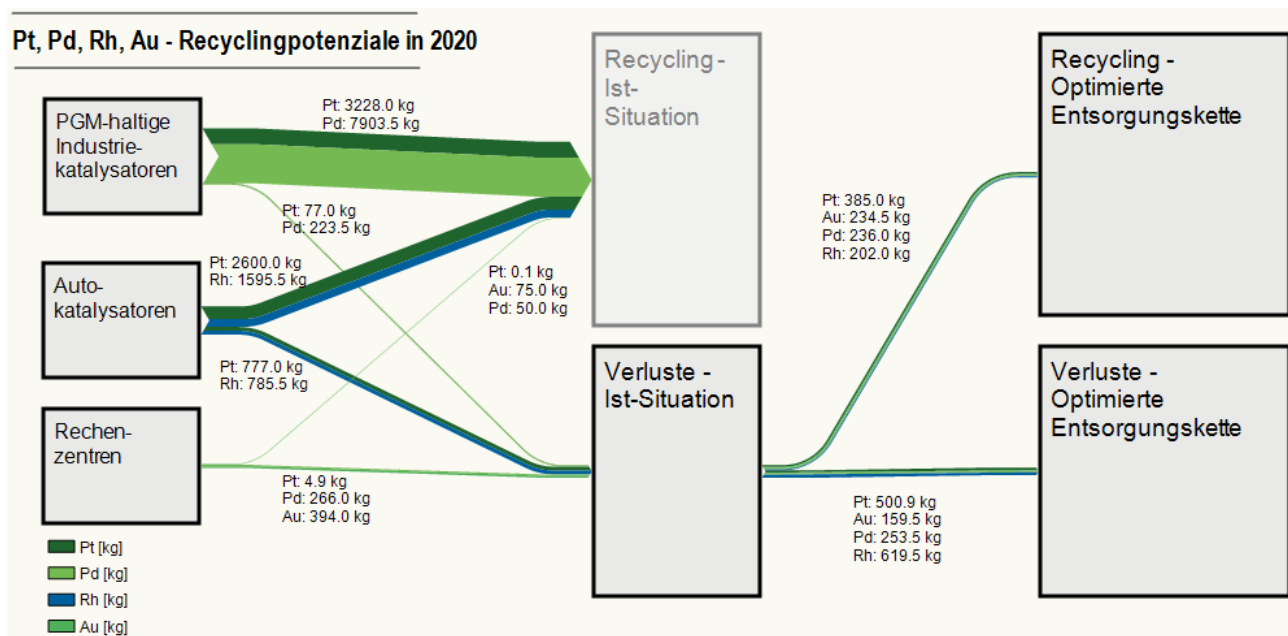
| Produkt | Ist-Situation | Optimierte Entsorgung | Differenz |
|---|---|--|--|
| FCC-Katalysatoren | 189-331 t SE | 27-48 t SE | 162-283 t SE |
| Autokatalysatoren * | 756-798 kg Pt 778-793 kg Rh 134.077-134.178 kg SE | 427-451 kg Pt 578 – 589 kg Rh 134.077-134.178 SE | 329-347 kg Pt 200-204 kg Rh 0 kg SE |
| Sonstige Automobilkomponenten | 55.102-55.770 kg SE | komponentenabhängig | - |
| Spezialgläser | 860 kg Ce | - | - |
| Photovoltaik | 41-347 kg In 1-62,9 kg Ga | 38-300 kg In 0,2-25 kg Ga | 3-47 kg In 0,8-38 kg Ga |
| Hitzeschutzkeramiken | 709-1.786 kg Y | unklar | - |
| Mischmetall | 106-133 t Ce 46-58 t La | - | - |
| Batterien | 187-303 t SE | 112-197 t SE | 75-106 t SE |
| Poliermittel | 70-102 t Ce 1,2-5,5 t La | 21-73 t Ce 0,4-3,9 t La | 29-49 t Ce 0,9-1,5 t La |
| Laseranwendungen | 14 kg Er 8 kg Y | - | - |
| Windenergieanlagen** | 1.308-4.470 kg Nd 119-409 kg Dy 3-11 kg Tb | 65-224 kg Nd 6-20 kg Dy 0,2-0,6 kg Tb | 1.243-4.246 kg Nd 113-389 kg Dy 2,8-10,4 kg Tb |
| Medizintechnische Geräte | 1.004-4.923 kg SE | 134-710 kg SE | 870-4.213 kg SE |
| Brennstoffzellen (SOFC) | 50.186 – 78.152 kg Y 30.767 – 47.770 kg La | - | - |
| Optische Faseranwendungen | 4 mg Er 1,2-3,4 kg Ge | - | - |
| LEDs (Anzeigetafeln) | 0,14 kg Ga 0,11 kg In 0,03 kg Ce 0,96 kg Y 3,14 kg Au | unklar | - |
| Elektrofahrräder | 4.768-6.399 kg Nd 1.192-1.600 kg Dy 238-320 kg Tb | 691-928 kg Nd 173-232 kg Dy 35-46 kg Tb | 4.077-5.471 kg Nd 1.019-1.368 kg Dy 203-284 kg Tb |
| Nabendynamos | 1.372-1.453 kg Nd | 199-208 kg Nd | 1.173-1.227 kg Nd |
| Raumklimaanlagen | 2.036-2.135 kg Nd 509-534 kg Dy 102-107 kg Tb | 585-614 kg Nd 146-154 kg Dy 29-31 kg Tb | 1.451-1.521 kg Nd 363-380 kg Dy 73-76 kg Tb |
| Schleifkeramiken | 25-2.160 kg Y | - | - |
| Absorbermaterial und Steuerstäbe in AKW | 70 kg Gd 650 kg In | - | - |
| Hochtemperatursupraleiter | 42-140 kg Y | unklar | - |
| Rechenzentren | 350-438 kg Au 4-5,8 kg Pt 239-293 kg Pd | 142-177 kg Au 1,7-2 kg Pt 97-118 kg Pd | Bezogen auf medium Szenario: 75-94 kg Au 1,3-2 kg Pt 75-93 kg Pd Bezogen auf low end Szenario: 142-177 kg Au 1,7-2 kg Pt 97-118 kg Pd |

*Berechnung auf Grundlage des Referenzszenarios für die Ist-Situation. Auf Basis der Alternativszenarien, die etwaige Verluste aus den statistisch nicht geklärten Fällen beinhalten, ergeben sich abweichende Gesamtverluste

**Annahme des Szenarios „SE Rückgewinnung“ für die optimierte Entsorgungskette. Für das Szenario „Wiederverwendung“ sind die Verluste zu vernachlässigen.

Optimierungspotenziale wurden für PGM-haltige Industriekatalysatoren, FCC-Katalysatoren, Autokatalysatoren, Rechenzentren, NiMH-Batterien, Poliermittel, MRTs, Photovoltaikzellen, Windenergieanlagen, Elektrofahrräder, Nabendynamos und Raumklimaanlagen identifiziert. Für diese Produkte bzw. Produktgruppen sind die Mengenströme bezogen auf die Ist-Situation und die optimierte Entsorgungskette in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Der zusätzliche Mengenstrom zum Recycling in der optimierten Entsorgungskette stellt das mögliche zusätzliche Substitutionspotenzial von primären strategischen Metallen durch sekundäre strategische Metalle dar¹.

Abbildung 1: Mengenströme von Platin, Palladium, Rhodium und Gold in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette



¹ Bei Schwankungsbreiten wurde der arithmetische Mittelwert gebildet.

Abbildung 2: Mengenströme von Neodym, Dysprosium und Terbium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette

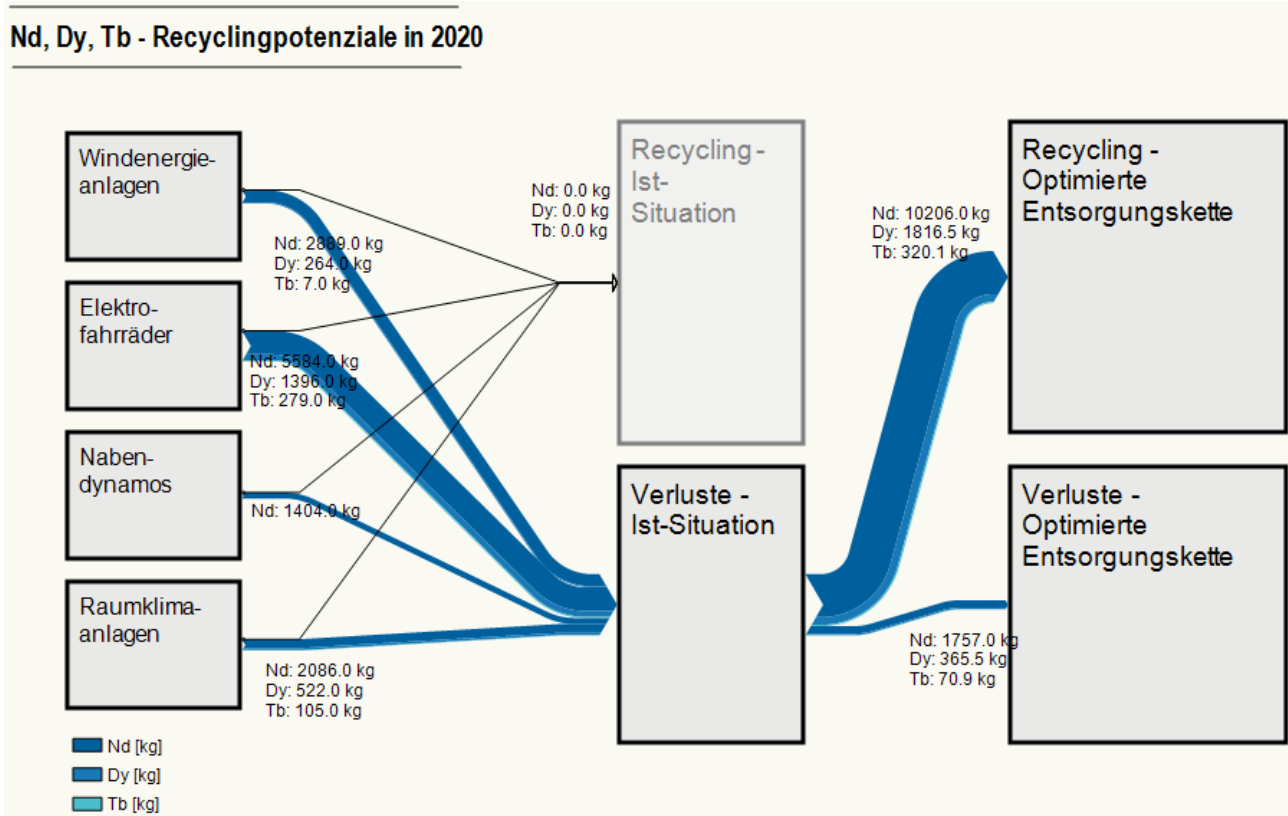


Abbildung 3: Mengenströme von Cer, Lanthan und un spezifizierten Seltenen Erden in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette

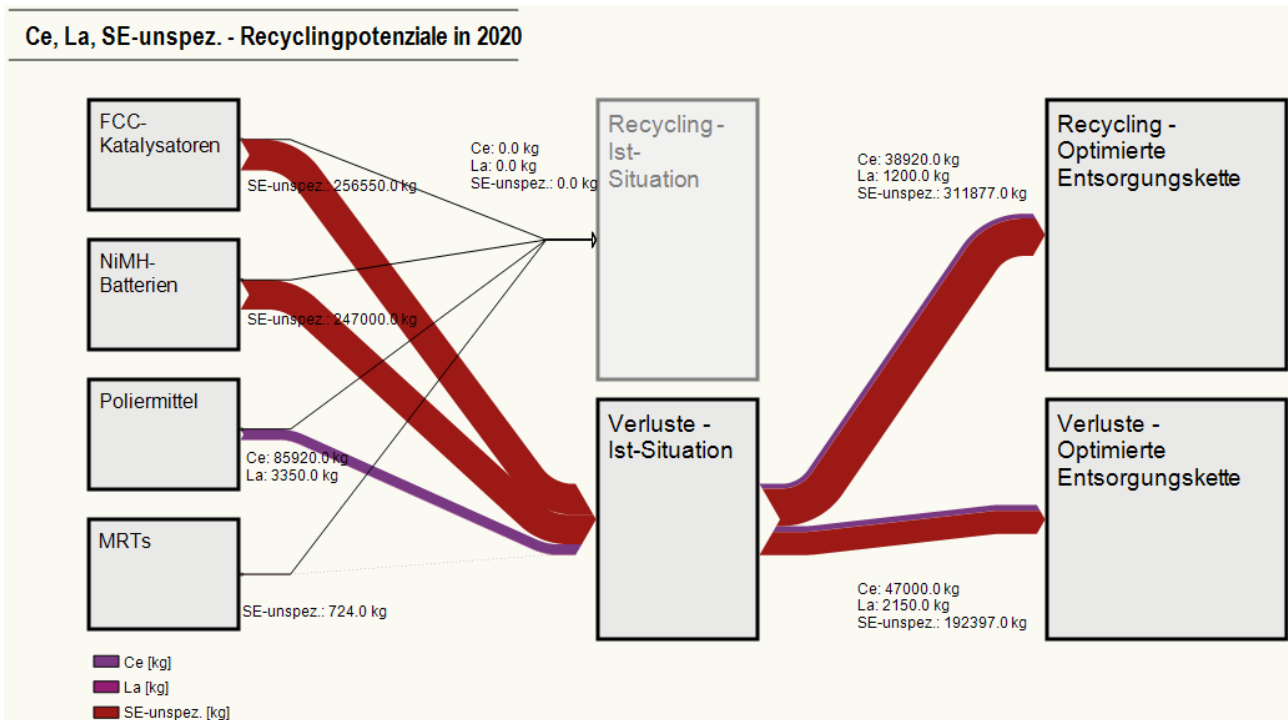
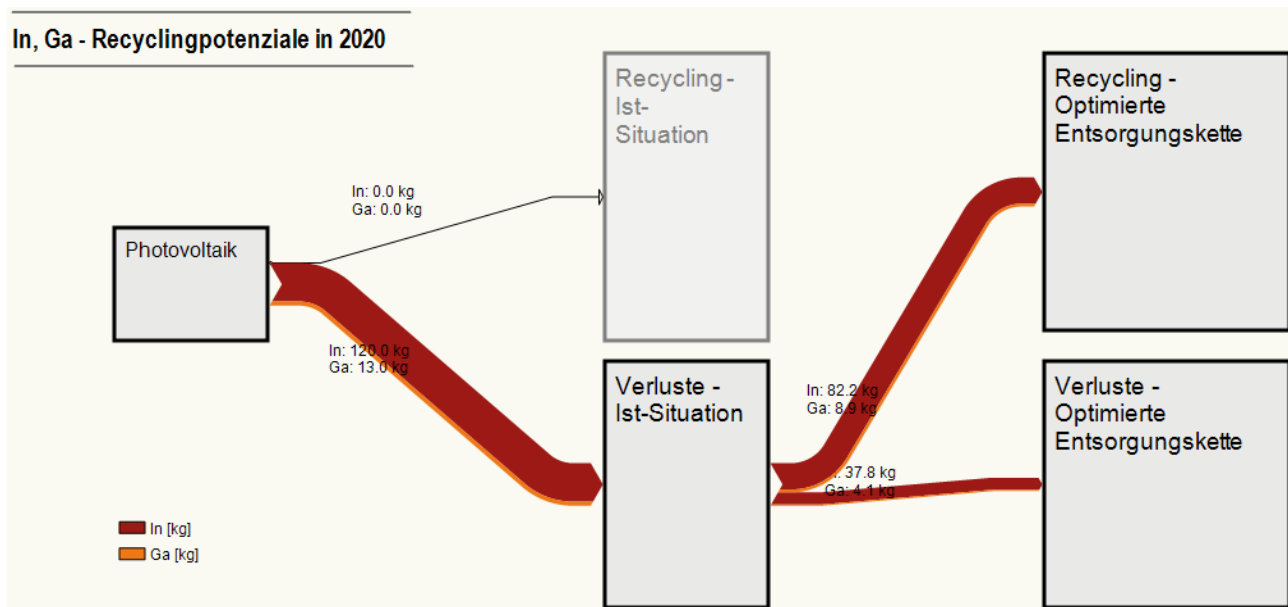


Abbildung 4: Mengenströme von Indium und Gallium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette



5 Handlungsempfehlungen

Ausgehend von den dargestellten Analysen erfolgte die Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine ressourceneffiziente Gestaltung der Entsorgungsketten für solche Produkte bzw. Produktgruppen, bei denen Optimierungspotenziale identifiziert worden sind.

Grundlegend ist die Wirtschaftlichkeit bisher der Hauptfaktor bei der Entscheidung für oder wider eine Rückgewinnung von strategischen Metallen. Dies sollte aus umwelt- und rohstoffpolitischer Sicht ggf. überdacht werden, insbesondere in Hinsicht auf die strategische Bedeutung der meisten hier betrachteten Metalle für eine technologieorientierte Wirtschaft. Die Sicherstellung einer teilautarken Versorgung mit diesen Metallen aus heimischen „Rohstoffquellen“ und die damit verbundene größere Robustheit gegenüber Rohstoffengpässen und Flexibilität bei technologischen Entwicklungen müssen hier berücksichtigt werden, auch wenn diese Faktoren sich nicht direkt in monetäre Effekte umrechnen lassen. Noch sinnvoller wird das Recycling, wenn zusätzlich die vermiedenen ökologischen Kosten der Primärgewinnung berücksichtigt werden. Bei der Gestaltung der zukünftigen Rahmenbedingungen sollten also neben der sich unter den derzeitigen Rahmenbedingungen ergebenden Wirtschaftlichkeit verstärkt die Aspekte von prospektiver Versorgungssicherheit und ökologischen Kosten berücksichtigt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte sind Zwischenlager und Material-Pools sinnvoll, in denen die Abfallfraktionen bis zur Verwertung gelagert werden, selbst wenn die Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung noch nicht in allen Fällen gegeben ist.

Grundsätzlich wird es als sinnvoll erachtet, das Ziel einer ressourceneffizienten, stoffstromorientierten Kreislaufwirtschaft auch in die Gestaltung des Europäischen Abfallartenkataloges einfließen zu lassen, z. B. in der Form einer stärker materialorientierten Struktur des Kataloges.

Die Analyse der Ausgangslage, der Optimierungspotenziale sowie der Hemmnisse und Pfadabhängigkeiten zeigt, dass eine verbesserte Verfügbarkeit von Informationen über das Vorhandensein von ReStra-Zielmetallen einen wichtigen Handlungsansatz darstellt. Dabei müssen die Art der Information und die Informationsbereitstellung eng mit der abfallwirtschaftlichen Realität abgestimmt werden, um effizient zu sein und tatsächliche Wirkung entfalten zu können.

Weiterhin zeigten sich der Ausbau der (Pflicht zur) Getrenntsammlung und die Realisierung von Best Practice-Ansätzen beim Transport und beim Umschlag als wichtige Ansatzpunkte. In diesem Zusammenhang sowie mit Blick auf einen verbesserten Informationsfluss in der Abfallwirtschaft stellt die Weiterentwicklung des Europäischen Abfallkataloges als wirksames Kommunikationsinstrument einen potenziellen zukünftigen Baustein dar.

Das Beispiel der Rückgewinnung von ReStra-Zielmetallen aus Automobilkomponenten zeigte, dass die „Design for Recycling“-Ansätze auf den Bereich „Design for Dismantling“ fokussiert werden sollten, um die Verfügbarkeit der relevanten Komponenten für die Rückgewinnungsverfahren zu besseren ökonomischen Bedingungen zu erreichen.

Bei der Mehrheit der untersuchten Altprodukte kann über Demontage- bzw. Behandlungsanforderungen eine verbesserte Kreislaufrückführung der ReStra-Zielmetalle erreicht werden. Die Anforderungen sollten rechtsverbindlich gemacht werden, da eine ökonomische gesteuerte Selbstlenkung derzeit nicht besteht.

Weiterhin sollte für einige Altprodukte die Entwicklung von Behandlungs- und Rückgewinnungsketten gefördert werden (z. B. Yttrium aus Hitzeschutzkeramiken oder Gadolinium aus Röntgengeräten).

Es zeigte sich auch, dass die höchste Effektivität von Handlungsansätzen oftmals dann erwartet werden kann, wenn duale Vorgehensweisen realisiert werden. Am Beispiel der Magnetanwendungen mit strategischen Rohstoffen zeigte sich, dass solche dualen Ansätze u. A. geeignet sind, das „Henne-Ei-Problem“ zu lösen. Dementsprechend werden keine Verwertungsverfahren etabliert, solange kein entsprechendes Inputmaterial verfügbar ist und andererseits jedoch auch kein Inputmaterial generiert, solange keine Verwertungswege verfügbar sind. Konkret fördern duale Ansätze hier, dass auf der Ebene der Vorbehandlung Magnete separiert werden und die Verfügbarkeit der Inputmaterialien gesichert wird und gleichzeitig über verfahrensbezogene Ansätze eine großtechnische Verwertung gefördert wird. Auch für den Bereich der Informationsflüsse und des Designs für Dismantling-Ansätze zeigte sich die Effektivität dualer Ansätze. Durch die Etablierung von abgestimmten Maßnahmen auf der Produktebene und für die Abfallphase („korrespondierende Maßnahmen“ in verschiedenen Lebensphasen des Produktes) kann das Risiko verringert werden, dass Einzelmaßnahmen im Produkt- und Rohstoffkreislauf ins Leere laufen.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Maßnahmenbereiche und ordnet ihnen überschlägige Schätzungen von Aufwand und Wirkung zu.

Tabelle 6: Überblick Handlungsempfehlungen

| ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle) | Handlungsansatz | Aufwand Initialisierung | Aufwand Durch- führung | Wirkung Menge | Wirkung Umwelt (KEA*Anteil) | Kritikalität EU (2014) |
|--|---|--|-----------------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Homogene Katalyse (Pd, Pt) | optimierte Information | gering | gering | gering | hoch | kritisch |
| | Getrenntsammlungspflicht | hoch (Gesetzgebungsprozess) | mittel | | | |
| Umweltkatalysatoren (Pt) | optimierte Information | gering | gering | gering | mittel | kritisch |
| | Getrenntsammlungspflicht | hoch (Gesetzgebungsprozess) | mittel | | | |
| FCC-Katalysatoren (Ce, La) | siehe rohstoffbezogene Ansätze unten | | | | | |
| Autokatalysatoren (Pt, Rh, La, Ce) | Best Practice Transport | hoch (Gesetzgebungsprozess) | gering (wenige Akteure betroffen) | mittel bis hoch | hoch | kritisch |
| | zu La & Ce siehe rohstoffbezogene Ansätze unten | | | | | |
| Automobilkomponenten (Gd, Dy, Tb, Nd) | allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten | | | | | |
| | demontagegerechte Kon- struktion | mittel bei freiwilliger Maßnahme, hoch bei Gesetzgebungsverfahren | gering bis mittel | gering | gering | kritisch |
| | optimierte Information | | | | | |
| | Demontageanforderungen | hoch (Gesetzgebungsprozess) | hoch | | | |
| | Schnittstelle ElektroG2 | hoch (Gesetzgebungsprozess) | gering | | | |
| Photovoltaik-Module (In) (keine Ansätze für Ga, Ge) | Behandlungsanforderungen | hoch (Gesetzgebungsprozess) | hoch | | gering | kritisch |
| Hitzeschutzkeramiken (Y) | Förderung Verfahrensentwick- lung Rückgewinnung | gering | hoch (finanziell) | gering | gering | kritisch |
| Poliermittel (Ce, La) | zu La & Ce siehe rohstoffbezogene Ansätze unten | | | | | |
| NiMH Batterien (Ce, La, Sm) | zu La & Ce siehe rohstoffbezogene Ansätze unten | | | | | |
| | optimierte Information | keiner (ist bereits initialisiert) | gering | mittel | mittel | kritisch |
| | Behandlungsanforderungen | mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-BehandlungsV)) | mittel | | | |
| MRT (Dy, Tb) | optimierte Information | gering | gering | mittel | mittel | kritisch |

| ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle) | Handlungsansatz | Aufwand Initialisierung | Aufwand Durch- führung | Wirkung Menge | Wirkung Umwelt (KEA*Anteil) | Kritikalität EU (2014) |
|---|--|---|---------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | Behandlungsanforderungen | mittel (Berücksichtigung im Rah- men der ElektroG2-Behand- lungsV)) | mittel | | | |
| | allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten | | | | | |
| Röntengeräte (Gd) | Entwicklung Behandlungs- und Rückgewinnungsverfah- ren | gering | hoch (finanziell) | mittel | gering | kritisch |
| Windenergieanlagen (Nd, Dy) | Schnittstelle ElektroG2 | hoch (Gesetzgebungsprozess) | gering | gering | gering | kritisch |
| | Behandlungsanforderung | mittel (Berücksichtigung im Rah- men der ElektroG2-Behand- lungsV)) | gering | | | |
| | allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten | | | | | |
| Elektrofahrräder (Nd, Dy, Tb) | Behandlungsanforderung | mittel (Berücksichtigung im Rah- men der ElektroG2-Behand- lungsV)) | mittel | hoch | hoch | kritisch |
| | allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten | | | | | |
| Nabendynamos (Nd, Pr) | Behandlungsanforderung | hoch (Gesetzgebungsprozess) | mittel | gering | mittel | kritisch |
| | allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten | | | | | |
| Raumklimaanlagen (Nd, Dy) | Behandlungsanforderung | mittel (Berücksichtigung im Rah- men der ElektroG2-Behand- lungsV)) | mittel | gering | mittel | kritisch |
| | allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten | | | | | |
| Rechenzentren (Pd) | Behandlungsanforderung | mittel (Berücksichtigung im Rah- men der ElektroG2-Behand- lungsV)) | mittel | gering | mittel | kritisch |
| | allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten | | | | | |
| Dualer Ansatz zu Magnetanwendungen | | unterschiedlich, überwiegend mittel-hoch | | hoch | hoch | kritisch |
| Rohstoffbezogene Ansätze zu Lanthan & Cer | | unterschiedlich, überwiegend mittel-hoch | | hoch | hoch | kritisch |
| Rechtliche Rahmensetzungen | | unterschiedlich, überwiegend mittel-hoch | | hoch | hoch | verschiedene |

Legende: Kategorisierung bei „Mengenanteil“ und „Umwelt (KEA*Anteil)“: gering: bis 10 %, mittel >10 % bis 30 %, hoch >30 %

Die Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen zeigte, dass in einigen Fällen Schnittstellen zwischen verschiedenen Rechtsbereichen optimiert oder geschaffen werden sollten (Beispiel: Schnittstelle zwischen AltfahrzeugV und ElektroG zur Behandlung von Fahrzeugelektronik). In anderen Bereichen wurde das Fehlen operationalisierter Rechtsgrundlagen für die Optimierung der Kreislaufführung strategischer Rohstoffe festgestellt (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 7: Überblick über die Empfehlungen rechtlichen Rahmensetzung in Bezug auf die Zielsetzung des Projektes ReStra

| Produkt | ReStra Zielmetalle | Rechtsrahmen bestehend | Rechtsrahmen zu entwickeln | Getrennthaltungspflicht bestehend | Getrennthaltungspflicht zu entwickeln | Behandlungsanforderung bestehend | Behandlungsanforderung zu entwickeln | Kennzeichnung/ Informationspflicht bestehend | Kennzeichnung/ Informationspflicht zu entwickeln |
|------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|---|--|--|--|
| Industriekatalysatoren | Ge, Pd, Pt, Rh, (Ce), La | | RohstoffV | | Betreiber | | Zuführung zur Rückgewinnung, für La & Ce ggf. Langzeitlagerung | | Informationspflicht Hersteller → Nutzer |
| Autokatalysatoren | Pd, Pt, Rh, Ce, La | AltfahrzeugV | | Letzthalter (Abgabe des Altfahrzeugs zu Demontagebetrieben) | | Separation und Zuführung zur Rückgewinnung, | Best Practice Transport und Behandlung | | |
| Autokomponenten | Gd, Tb, Dy | AltfahrzeugV | | Letzthalter (Abgabe des Altfahrzeugs zu Demontagebetrieben) | | | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | Informationspflicht Hersteller → Entsorger |
| PV | In, Ga | ElektroG | | Letztnutzer | | | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | Label (PV-Modul) |
| Hitze-schutzkeramiken | Y | | RohstoffV | | Anwender | | Zuführung zur Rückgewinnung | | Informationspflicht Hersteller → Nutzer |

ReStra – Zusammenfassung

| Produkt | ReStra Zielmetalle | Rechtsrahmen bestehend | Rechtsrahmen zu entwickeln | Getrennthaltungspflicht bestehend | Getrennthaltungspflicht zu entwickeln | Behandlungsanforderung bestehend | Behandlungsanforderung zu entwickeln | Kennzeichnung/ Informationspflicht bestehend | Kennzeichnung/ Informationspflicht zu entwickeln |
|--------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|--|---------------------------------------|---|---|--|--|
| NiMH-Batterien | SE (Ce, La, Nd, Pr)* | BattG, ElektroG2 | | Letztnutzer (Sammelsystem nach BattG), Entsorger (Separation aus Altgerät) | | Separation aus Geräteverbund im Rahmen des ElektroG2, | Zuführung zur Rückgewinnung | Label | |
| Poliermittel | Ce, La | | RohstoffV | | Anwender | | Zuführung zur Rückgewinnung oder Langzeitlager | | Informationspflicht Hersteller → Nutzer |
| MRT | Nd, Pr, Dy, Tb, Gd | ElektroG | | Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG | | | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | |
| Röntengeräte | | ElektroG | | Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG | | | Separation Gd-Komponente, Zuführung zur Rückgewinnung | | Label (Komponente) |
| Windenergieanlagen | Nd, Dy, Tb | | RohstoffV | | Betreiber (Rückbauer) | | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | |
| Elektrofahrrad | | ElektroG | | Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG | | | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | |
| Nabendynamos | | | RohstoffV | | Entsorger | | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | Label Komponente (Nabendynamo) |

ReStra – Zusammenfassung

| Produkt | ReStra Zielmetalle | Rechtsrahmen bestehend | Rechtsrahmen zu entwickeln | Getrennthaltungspflicht bestehend | Getrennthaltungspflicht zu entwickeln | Behandlungsanforderung bestehend | Behandlungsanforderung zu entwickeln | Kennzeichnung/ Informationspflicht bestehend | Kennzeichnung/ Informationspflicht zu entwickeln |
|------------------|--------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--|--|--|
| Raumklimaanlagen | | ElektroG | | Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG | | | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | Label Komponente (Kompressor) |
| Rechenzentren | Pt, Pd, Au | ElektroG | | Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG | | Teilweise, | Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung | | |

*Die Analyse der Batterien ist für Seltene Erden insgesamt erfolgt, eine mengenmäßige Aufteilung der Anteile der einzelnen Seltenen Erdmetalle war nicht möglich

Weiterhin kommt das Instrument der „Besten verfügbaren Techniken“ im Rahmen der Industrieemissionsrichtlinie² als Optimierungsansatz in Frage.

² RICHTLINIE 2010/75/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24.November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung)

6 Quellen

- Blacksmith Institute (2011): The World's Worst Toxic Pollution Problems. Report 2011. <http://www.worst-polluted.org/2011-report.html>, zuletzt geprüft am 29.5.2012
- BMWi 2010: BMWi: Rohstoffstrategie der Bundesregierung - Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen, Berlin, 2010, <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/rohstoffstrategie-der-bundesregierung>, zuletzt geprüft am 02.05.2015
- Bringezu 2011: Bringezu, S., et al.: Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen - Abschlussbericht zu AP2 des Projektes MaRess, Wuppertal, 2011, http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_8_AbschlussBer.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2015
- EU 2014: European Commission: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS On the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative, Brussels, 2014, and REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, Brussels, 2014, http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2015
- FEM 2015: pers.com. Dr. Völker FEM, 11.5.2015
- Göbbling-Reisemann, S. (2012): Persönliche Mitteilung vom 7.6.2012.
- JRC 2015: European Commission's Joint Research Centre (JRC): Best Environmental Management Practice, Sectoral reference document for the Car Manufacturing sector, <http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/emas/car.html>, zuletzt geprüft am 30.03.2015
- Kennedy 2014: Kennedy, P.: Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenenerdmetallen, in: Kausch, P. et al. (Hrsg.), Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge, DOI 10.1007/978-3-642-39704-2_14, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014
- Mitsubishi 2015: Mitsubishi Electric: Newly Developed Automatic Dismantling Equipment Removes and Recovers Rare Earth Magnets in Just 30 Seconds, <http://www.mitsubishielectric.com/company/environment/ecotopics/rareearth/how/index.html>, zuletzt geprüft am 30.03.2015
- MORE 2014: Bast, U, et.al.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben, 2015
- Progress 2012: BMUB (HG): Deutsches Ressourceneffizienz-programm (ProgRess), Stand Kabinettsbeschluss: 29. Februar 2012, Berlin, <http://www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-progress/>, zuletzt geprüft am 30.03.2015
- Sander 2010: Sander, K., Schilling, S.: Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten/Elektroschrott, UBA FKZ 3708 93 300, Dessau, 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optimierung-steuerung-kontrolle>, zuletzt geprüft am 02.05.2015

Schöne 2015: pers. com. Dr. F. Schöne, Duesmann und Hensel Recycling GmbH, März 2015

Stiftung ear 2015: Bestimmung der jeweils relevanten Faktoren für die Berechnung des Garantiebetrages;
<https://www.stiftung-ear.de/nc/hersteller/produktbereiche-regelsetzung-und-regeln/produktuebergreifende-arbeitsgruppe-pbue/regelsetzung-garantiehoehe/>, zuletzt geprüft am 30.03.2015

USGS 2015: Mineral Commodity Summaries – Indium 2015, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/> zuletzt geprüft am 30.03.2015

USGS 2015a: Mineral Commodity Summaries – Gallium 2015, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/> zuletzt geprüft am 30.03.2015

Buchert 2013: Buchert, M., Manhart, A., Sutter, J.: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, Feiburg, 2013 <http://www.oeko.de/oeko-doc/2053/2014-630-de.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2015