

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 93 339
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekun- därmaterialien (Kurztitel: Recyclingpotenzial strategischer Metalle) - ReStra -

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

Ökopol GmbH, Nernstweg 32-34, 22765 Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Juli 2016

Kurzbeschreibung

Das Projekt ReStra untersucht Recycling- und Substitutionspotenziale ausgewählter Metalle. Dabei wurden auf der Grundlage von Kritikalitätsanalysen Zielmetalle ausgewählt (Seltene Erden, Palladium, Gallium, Germanium, Indium, Gold, Rhodium, Platin) und ihre Verwendung in Produkten untersucht und quantifiziert (Industriekatalysatoren, Autokatalysatoren, Metallurgie/ Legierungen (Mischmetall), Batterien, Laseranwendungen, Windenergie, Automobile, Medizintechnische Geräte, Brennstoffzellen, Optische-Faseranwendungen, Photovoltaik, LEDs, Haushaltsanwendungen, Pedelec, e-bike, Raumklimaanlagen, Anzeigetafeln, Nabendynamo, Keramiken, Absorbermaterial und Kontrollstäbe in Kernreaktoren, Hochtemperatursupraleiter, Rechenzentren).

Über die Analyse von existierenden Entsorgungsketten für die ausgewählten Altprodukte sowie von Hemmnissen bei der Verbesserung der Kreislaufführung sowie ggf. bestehenden Pfadabhängigkeiten wurden Optimierungspotenziale identifiziert und quantifiziert.

Auf der Grundlage der Analysen wurden Empfehlungen zur Optimierung der Kreislaufführung der untersuchten Anwendungen auf der technischen, politischen und rechtlichen Ebene entwickelt. Neben den altproduktbezogenen werden dabei auch übergeordnete Ansätze dargestellt.

Abstract

The project 'ReStra' analyses potentials for the recycling of strategic raw materials and the substitution of primary raw materials by secondary raw materials. As a first step, target elements have been identified on the basis of analysis of criticality (Rare Earth Elements, Palladium, Gallium, Germanium, Indium, Gold, Rhodium, Platinum). Their application and quantification in products (industry catalysts, vehicle catalysts, alloy, battery, laser, wind energy, vehicle, medical equipment, fuel cell, optical fibre, photovoltaic, LED, home appliances, pedelec, e-bike, air condition, display panel, hub dynamo, ceramics, absorber material, high temperature superconductor, data processing centre) have been the subsequent part of the research.

Existing disposal chains for the selected end of life products and barriers for an improved recycling as well as, where relevant, path dependencies have been elements for the identification of quantitative optimising potentials.

Based on the mentioned working steps recommendations have been developed to promote circular economy for the selected strategic raw materials and applications on technical, legal and political level.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis.....	13
Abkürzungen	25
1 Zusammenfassung	29
1.1 Hintergrund und Zielsetzung	29
1.2 Identifikation strategischer Metalle	29
1.3 Bestimmung der Stoffströme	31
1.4 Ermittlung von Recycling- und Substitutionspotenzialen.....	33
1.5 Handlungsempfehlungen	37
2 Summary.....	45
2.1 Background and objective	45
2.2 Identification of strategic metals.....	45
2.3 Identification of material flows.....	47
2.4 Identification of recycling and substitution potentials	49
2.5 Proposals	53
3 Einleitung.....	60
4 Identifikation der ReStra-Zielmetalle	61
4.1 Metallvorauswahl und Indikatoren zur Bewertung der Rohstoffverfügbarkeit	61
4.1.1 Erweitertes Konzept der Rohstoffkritikalität.....	61
4.1.2 Metallvorauswahl	63
4.1.3 Indikatoren für die wirtschaftliche Bedeutung.....	64
4.1.4 Indikatoren für das Versorgungsrisiko / die Verfügbarkeit	70
4.2 Gewichtung	74
4.3 Ergebnisse.....	77
4.3.1 Berechnung der Ergebnisgrößen.....	77
4.3.2 Sensitivitätsanalyse	79
4.3.3 Fazit der Kritikalitätsanalyse	81
4.4 Auswahl der Metalle für die weitere Untersuchung.....	82
5 Ermittlung von Recycling- und Substitutionspotenzialen	85
5.1 Methodisches Vorgehen	85
5.1.1 Analyse auf Produktebene	85
5.1.2 Analyse von Abfallarten	94

5.2	Produktgruppenidentifizierung.....	95
5.2.1	Indium.....	96
5.2.2	Gallium.....	98
5.2.3	Germanium	99
5.2.4	Gold	101
5.2.5	Palladium	102
5.2.6	Platin	103
5.2.7	Rhodium	104
5.2.8	Seltene Erden	105
5.2.9	Ergebnisse	112
5.3	Produktidentifizierung und -analyse	113
5.3.1	Industriekatalysatoren	113
5.3.2	PGM-haltige Katalysatoren	118
5.3.3	SE-haltige Katalysatoren: FCC Katalysatoren.....	124
5.3.4	Ge-haltige Katalysatoren: Polymerisationskatalysatoren.....	128
5.3.5	Automobile	136
5.3.6	Metallurgie/ Legierungen	163
5.3.7	Batterien.....	165
5.3.8	Anwendungen der optischen Industrie	168
5.3.9	Laseranwendungen	172
5.3.10	Windenergie	175
5.3.11	Medizintechnische Geräte.....	185
5.3.12	Brennstoffzellen	195
5.3.13	Optische Faseranwendungen.....	207
5.3.14	Photovoltaik.....	220
5.3.15	LEDs	227
5.3.16	Haushaltsanwendungen.....	236
5.3.17	Keramiken	244
5.3.18	Absorbermaterial, Kontrollstäbe	259
5.3.19	Hochtemperatursupraleiter	266
5.3.20	Rechenzentren.....	270
5.3.21	Ergebnisse Produktidentifizierung und -analyse	281
5.4	Metallgehalte in gewerblichen und kommunalen Abfällen.....	282
5.4.1	Zur Datenquelle ABANDA	282
5.4.2	Ergebnis der relevanten Metallgehalte im Abfall	283

5.5	Mengenbilanzierung auf Basis der Produktanalyse	287
5.5.1	Platin	289
5.5.2	Palladium	290
5.5.3	Rhodium	291
5.5.4	Gold	292
5.5.5	Indium.....	292
5.5.6	Gallium.....	293
5.5.7	Germanium	293
5.5.8	Yttrium.....	293
5.5.9	Lanthan	294
5.5.10	Cer.....	295
5.5.11	Neodym	296
5.5.12	Gadolinium	297
5.5.13	Terbium	297
5.5.14	Dysprosium	298
5.5.15	Erbium	299
5.5.16	Seltene Erden, unspezifisch.....	299
5.5.17	Mengenbilanzierung - Zusammenfassung.....	300
5.5.18	Gruppierung der Mengenströme in 2020 in vier Größenklassen.....	301
6	Metallverluste der Entsorgungsketten.....	304
6.1	Screening vorhandener Systeme und Technologien im Entsorgungsbereich	305
6.1.1	Erfassungs- und Rücknahmesysteme	305
6.1.2	Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren.....	307
6.2	Identifizierung und Quantifizierung von Materialverlusten entlang der Entsorgungskette	312
6.2.1	Methodische Herangehensweise	312
6.2.2	Grundsätzliche Anforderungen an Entsorgungsketten.....	316
6.2.3	Produktbetrachtungen	318
6.2.4	Zusammenfassung	373
6.3	Überblicksdarstellung spezifischer Hemmnisse bei der Optimierung der untersuchten Entsorgungsketten.....	377
6.4	Übergeordnete Hemmnisse	386
6.4.1	„Henne-Ei-Problem“	386
6.4.2	Transportaufwand	386
6.4.3	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen und Finanzierung	387

6.4.4	Zielvorgaben in den rechtlichen Rahmensetzungen	387
6.4.5	Wissen über die Anforderungen aus REACH.....	387
6.5	Pfadabhängigkeiten in den Entsorgungsketten	389
6.5.1	Definition des Begriffs der „Pfadabhängigkeit“	389
6.5.2	Methodische Herangehensweise	389
6.5.3	Darstellung der Entsorgungspfade und Abhängigkeiten	392
6.5.4	Zusammenfassung der identifizierten Pfadabhängigkeiten	397
6.6	Kosten und Umweltbelastung der Metallrückgewinnung im Vergleich zur Primärgewinnung.....	398
6.6.1	Preisentwicklung und Kosten der Primärgewinnung	399
6.6.2	Kosten der Sekundärproduktion	408
6.6.3	Umweltbelastungspotenzial der Primär- und Sekundärproduktion	414
7	Handlungsempfehlungen	420
7.1	Altproduktbezogene Ansätze	420
7.1.1	Homogene Katalyse	421
7.1.2	Umweltkatalysatoren	422
7.1.3	FCC-Katalysatoren.....	422
7.1.4	Autokatalysatoren	423
7.1.5	Automobilkomponenten	424
7.1.6	Photovoltaik-Module	426
7.1.7	Hitzeschutzkeramiken	427
7.1.8	NiMH-Batterien	427
7.1.9	Poliermittel	428
7.1.10	Medizintechnische Geräte (MRT, Röntgen)	429
7.1.11	Windenergieanlagen	430
7.1.12	Fahrräder und Raumklimaanlagen	431
7.1.13	Rechenzentren.....	431
7.2	Dualer Ansatz am Beispiel von Magnetanwendungen	432
7.2.1	Inputorientierte Ansätze	434
7.2.2	Verfahrensorientierte Ansätze.....	439
7.2.3	Weitere Aspekte	439
7.3	Rohstoffbezogene Ansätze - Lanthan & Cer	441
7.4	Rechtliche Rahmensetzungen	443
7.5	Überblick Handlungsempfehlungen.....	449
8	Quellen	454

9	Anhänge	510
9.1	Daten zum Indikator Umweltrisiko	555
9.1.1	Erzgehalte	555
9.1.2	Radioaktivität	556
9.1.3	Chemikalieneinsatz.....	556
9.2	Berechnung der Wirtschaftlichen Bedeutung	560
9.3	Berechnung des Versorgungsrisikos	561
9.4	Identifizierung relevanter Abfallarten	562
9.5	Bewertung der Datenqualität	570
9.5.1	Industriekatalysatoren	571
9.5.2	Metallurgie/ Legierungen	573
9.5.3	Batterien.....	573
9.5.4	Anwendungen der optischen Industrie	574
9.5.5	Laseranwendungen	575
9.5.6	Windenergie.....	576
9.5.7	Medizinische Geräte.....	576
9.5.8	Brennstoffzellen	577
9.5.9	Optische Faseranwendungen.....	577
9.5.10	Photovoltaik.....	578
9.5.11	LEDs	579
9.5.12	Haushaltsanwendungen.....	579
9.5.13	Keramiken	580
9.5.14	TBC- Stationäre Gasturbinen.....	580
9.5.15	TBC- Flugzeugtriebwerke.....	581
9.5.16	Absorbermaterial, Kontrollstäbe	581
9.5.17	Hochtemperatursupraleiter	582
9.5.18	Rechenzentren	582
9.6	Aufbereitungsverfahren und Verfahren zur Metallrückgewinnung	583
9.7	Energieaufwand für die Produktion von Metallen	611
9.7.1	Energieaufwand für die Produktion von Gallium.....	611
9.7.2	Energieaufwand für die Produktion von Germanium	611
9.7.3	Energieaufwand für die Produktion von Gold	611
9.7.4	Energieaufwand für die Produktion von Indium.....	612
9.7.5	Energieaufwand für die Produktion von PGM.....	612
9.7.6	Energieaufwand für die Produktion von Seltenen Erden.....	615

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Mengenströme von Platin, Palladium, Rhodium und Gold in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette.....	36
Abbildung 2:	Mengenströme von Neodym, Dysprosium und Terbium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette.....	36
Abbildung 3:	Mengenströme von Cer, Lanthan und un spezifizierten Seltenen Erden in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette	37
Abbildung 4:	Mengenströme von Indium und Gallium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette.....	37
Abbildung 5:	Die zwei Dimensionen der Kritikalität von Rohstoffen: wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko/Verfügbarkeit (nach Erdmann/Graedel 2011).....	62
Abbildung 6:	Ergebnis der Ermittlung von wirtschaftlicher Bedeutung und des Versorgungsrisikos für 23 Metalle	77
Abbildung 7:	Zusammensetzung der Ergebnisgrößen zur wirtschaftlichen Bedeutung	78
Abbildung 8:	Zusammensetzung der Ergebnisgrößen zum Versorgungsrisiko	79
Abbildung 9:	Veränderung des Versorgungsrisikos bei einer Gewichtung der Umweltrelevanz von 50 Prozent.....	80
Abbildung 10:	Veränderung der Wirtschaftlichen Bedeutung bei einer Gewichtung des Rohstoffeinsatzes in Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial von 50 Prozent	81
Abbildung 11:	Analysierte strategische Metalle im Projekt ReStra	84
Abbildung 12:	Relevante Parameter der Produktanalyse	87
Abbildung 13:	Dichtefunktion der Weibullverteilung für verschiedene Formparameter k	89
Abbildung 14:	SEO in FCC-Kat Proben.....	126
Abbildung 15:	Verteilung des SEO-Verbrauchs für Katalysatoren in 2008.....	128
Abbildung 16:	Verpackungsstruktur für kohlen säurehaltige Erfrischungsgetränke und Wasser 2007	131
Abbildung. 17:	PET-Anteile an Getränkeverpackungen in Deutschland	132
Abbildung. 18:	In Verkehr gebrachte Mengen an PKW und Nutzfahrzeugen 2000-2012	141
Abbildung. 19:	Bestand von Kraftfahrzeugen in Deutschland nach Fahrzeugklassen	142
Abbildung. 20:	Permanentmagnete in Automobilen	151
Abbildung. 21:	Verteilung von Seltenen Erde Oxiden in Neodym-Eisen-Bor-Magneten in 2008	153
Abbildung. 22:	Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge im Jahr 2013	155

Abbildung. 23:	Wiederanmeldungen von Gebrauchtwagen aus Deutschland.....	159
Abbildung. 24:	Masse der in Verkehr gebrachten NiMH-Batterien und der zurückgenommenen Batterien für die Jahre 2003 bis 2012	167
Abbildung. 25:	Anzahl der Windanlagen in Deutschland	178
Abbildung. 26:	Entwicklung der jährlichen und kumulierten installierten Leistung	178
Abbildung. 27:	Zusammensetzung eines Permanentmagneten bei getriebelosen Anlagen	181
Abbildung. 28:	Abschätzung des inländischen Bestandes von MRT-Geräten in Deutschland (Quelle: BARMER; GEK, Arztreport 2011).....	189
Abbildung. 29:	Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum	210
Abbildung 30:	Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur in Rechenzentren..	215
Abbildung 31:	Bestandsentwicklung optischer Verstärker	217
Abbildung. 32:	Veränderung der Anlagenzahl und Leistung	251
Abbildung. 33:	Bedarf und Auftragslage von Boeing und Airbus (2010-2020)	255
Abbildung. 34:	Struktur eines Rechenzentrums	271
Abbildung. 35:	Aufbau der Datensätze zu den einzelnen Abfallanalysen.....	283
Abbildung. 36:	Zusammensetzung der Stoffströme - Platin in 2020	290
Abbildung. 37:	Zusammensetzung der Stoffströme - Palladium in 2020	291
Abbildung. 38:	Zusammensetzung der Stoffströme - Rhodium in 2020.....	292
Abbildung. 39:	Zusammensetzung der Stoffströme - Gold in 2020	292
Abbildung. 40:	Zusammensetzung der Stoffströme - Indium in 2020	293
Abbildung. 41:	Zusammensetzung der Stoffströme - Gallium in 2020.....	293
Abbildung. 42:	Zusammensetzung der Stoffströme - Yttrium in 2020.....	294
Abbildung. 43:	Zusammensetzung der Stoffströme - Lanthan in 2020	295
Abbildung. 44:	Zusammensetzung der Stoffströme - Cer in 2020.....	296
Abbildung. 45:	Zusammensetzung der Stoffströme - Neodym in 2020	297
Abbildung. 46:	Zusammensetzung der Stoffströme - Terbium in 2020	298
Abbildung. 47:	Zusammensetzung der Stoffströme - Dysprosium in 2020	299
Abbildung. 48:	Zusammensetzung der Stoffströme - Erbium in 2020.....	299
Abbildung. 49:	Zusammensetzung der Stoffströme - SE, unspezifisch in 2020...	300
Abbildung 50:	Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 - La, Ce	301
Abbildung 51:	Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 - Pt, Pd, Rh, Y, Dy, Nd.....	302

Abbildung 52:	Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 - Au, In, Gd, Tb	302
Abbildung 53:	Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 - Ga, Ge, Er	303
Abbildung 54:	Struktur von Arbeitspaket 3.....	305
Abbildung 55:	Überblick Ziel und Status von Rückgewinnungsverfahren (Anzahl)	308
Abbildung 56:	Typische Entsorgungskette	314
Abbildung 57:	Beispielhafte Entsorgungskette.....	315
Abbildung 58:	Rückgewinnungsraten für Gold aus PC bei verschiedenen Behandlungsarten.....	315
Abbildung 59:	Metal Wheel	317
Abbildung 60:	Verwertungs- und Akteurskette für Altkatalysatoren	325
Abbildung 61:	Akteure entlang der Entsorgungskette des Autokatalysatortrecycling	326
Abbildung 62:	Verfahrensfließbild der Batterierecyclingsanlage von Umicore in Hoboken, Belgien	345
Abbildung 63:	Recyclingstrategie für SOFC.....	354
Abbildung 64:	Mengenströme von Platin, Palladium, Rhodium und Gold in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette.....	376
Abbildung 65:	Mengenströme von Neodym, Dysprosium und Terbium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette.....	376
Abbildung 66:	Mengenströme von Cer, Lanthan und un spezifizierten Seltenen Erden in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette	377
Abbildung 67:	Mengenströme von Indium und Gallium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette.....	377
Abbildung 68:	Gewinnungskosten im Vergleich zum Goldpreis.....	401
Abbildung 69:	Preisvolatilität von Pd, Pt und Rh von 1980 bis 2013	403
Abbildung 70:	Volatilität der Preise von Seltenen Erden.....	406
Abbildung 71:	Regionale Disparität von Umweltbelastungen: PGM-Produktion für den europäischen Markt	416
Abbildung 72:	Qualitative Bestimmung einer optimalen Recyclingquote	417
Abbildung 73:	KEA-Minimierungspotenziale durch optimierte Kreislaufführung von ReStra-Altprodukten	418
Abbildung 74:	Systemperspektive auf die (zeitliche) Verfügbarkeit von Nd-haltigen Abfällen	435
Abbildung 75:	Anteile verschiedener Seltener Erden in SE-Erzen, Datengrundlage: Kennedy (2014), eig. Darstellung	441

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gewichtung der Kriterien für wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko	30
Tabelle 2:	Auswahl der „ReStra-Elemente“	30
Tabelle 3:	Übersicht analysierter Produkte und Metalle.....	31
Tabelle 4:	Zusammenfassung der zu erwartenden Metallmengen in 2020	33
Tabelle 5:	Vergleich der Materialverluste in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette für das Jahr 2020.....	34
Tabelle 6:	Überblick Handlungsempfehlungen	40
Tabelle 7:	Überblick über die Empfehlungen rechtlichen Rahmensetzung in Bezug auf die Zielsetzung des Projektes ReStra	42
Tabelle 8:	Beispielhafte Übersicht über kritische Rohstoffe aus verschiedenen Quellen.....	63
Tabelle 9:	Verwendete Indikatoren für die Dimension „Wirtschaftliche Bedeutung“	64
Tabelle 10:	Berechnung der Bedeutung von Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzialen, welche Silber verwenden.....	68
Tabelle 11:	Verwendete Indikatoren für die Dimension „ Versorgungsrisiko / die Verfügbarkeit“	70
Tabelle 12:	Zusammenfassung des Ergebnisses zur Gewichtung der Auswahlkriterien - Teil 1: Wirtschaftliche Bedeutung	75
Tabelle 13:	Zusammenfassung des Ergebnisses zur Gewichtung der Auswahlkriterien - Teil 2: Versorgungsrisiko.....	76
Tabelle 14:	Ergebnistabelle zur Berechnung des Versorgungsrisikos (rot markierte Metalle = vom UBA zur Prüfung benannt)	83
Tabelle 15:	Anwendungsfelder von Indium.....	96
Tabelle 16:	Anwendungsfelder von Gallium.....	98
Tabelle 17:	Anwendungsfelder von Germanium	99
Tabelle 18:	Anwendungsfelder von Gold	101
Tabelle 19:	Anwendungsfelder von Palladium	102
Tabelle 20:	Anwendungsfelder von Platin	103
Tabelle 21:	Anwendungsfelder von Rhodium.....	104
Tabelle 22:	Anwendungsgebiete Seltener Erden insgesamt.....	105
Tabelle 23:	Anwendungsfelder von Yttrium.....	105
Tabelle 24:	Anwendungsfelder von Samarium	106
Tabelle 25:	Anwendungsfelder von Europium.....	107
Tabelle 26:	Anwendungsfelder von Gadolinium	107
Tabelle 27:	Anwendungsfelder von Terbium	108
Tabelle 28:	Magnetanwendungen von Terbium.....	109

Tabelle 29:	Anwendungsfelder von Dysprosium	110
Tabelle 30:	Anwendungsfelder von Erbium.....	110
Tabelle 31:	Anwendungsfelder von Cer	111
Tabelle 32:	Anwendungsfelder von Lanthan	112
Tabelle 33:	Ergebnisse der Produktgruppenidentifizierung.....	113
Tabelle 34:	PGM Einsatz in Industriekatalysatoren.....	115
Tabelle 35:	Relevante Industriekatalysatorarten für Platin	116
Tabelle 36:	Relevante Industriekatalysatorarten für Rhodium	116
Tabelle 37:	Relevante Industriekatalysatorarten für Palladium.....	116
Tabelle 38:	PGM Einsatz in Industriekatalysatoren.....	119
Tabelle 39:	Analysereihenfolge PGM-haltige Industriekatalysatoren	119
Tabelle 40:	Metallmengen in 2020 aus PGM-haltigen Katalysatoren.....	124
Tabelle 41:	SE-Anteile in FCC-Katalysatoren.....	126
Tabelle 42:	SE-Mengen aus FCC-Katalysatoren in Abhängigkeit vom Katalysatorverbrauch in 2020 (Angaben in t).....	127
Tabelle 43:	GeO ₂ Einsatz in Katalysatoren	129
Tabelle 44:	Getränkeverbrauch pfandpflichtiger Getränke in Deutschland nach Getränkegruppen, in Mio. Liter.....	130
Tabelle 45:	Anteile der wichtigsten Verpackungen am Getränkeverbrauch 2004 - 2009	131
Tabelle 46:	Anteile EW- und MW-Kunststoffflaschen nach Getränkearten 2004 - 2009	132
Tabelle 47:	Anteile EW- und MW-PET-Flaschen nach Getränkearten in 2020	133
Tabelle 48:	Gewichtsangaben für PET-Flaschen.....	133
Tabelle 49:	Umlaufzeit und Verweildauer Mehrweg-PET-Flaschen	134
Tabelle 50:	Germaniummengen in 2020 aus pfandpflichtigen PET- Einwegflaschen	135
Tabelle 51:	Germaniummengen in 2020 aus pfandpflichtigen PET- Mehrwegflaschen	136
Tabelle 52:	Germaniummenge in 2020 aus nicht-pfandpflichtigen PET- Getränkeverpackungen	136
Tabelle 53:	Produkte im Bereich Altagos.....	137
Tabelle 54:	Durchschnittsalter der gelöschten bzw. ab 2007 außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge	138
Tabelle 55:	Berechnung der Nutzungsdauerentwicklung für Nutzfahrzeuge (Jahre)	139
Tabelle 56:	Neuzulassungen von PKW und Nutzfahrzeugen 2000-2012.....	140

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 57:	Trendfortschreibung von LKW und SZM (Sattelzugmaschinen) nach Größenklassen.....	142
Tabelle 58:	Schätzung zur Entwicklung von Neuzulassungszahlen bis zum Jahr 2020 differenziert nach Hubraumklassen	142
Tabelle 59:	Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2005 bis 2012 nach ausgewählten Kraftstoffarten.....	144
Tabelle 60:	PGM-Gehalte nach Motortyp und -leistung in g/Stück nach Hubraum des PKW in Liter	146
Tabelle 61:	Cer-Gehalte pro Autokatalysator nach Fahrzeugklassen.....	147
Tabelle 62:	Geschätzter weltweiter Einsatz von Seltenen Erden nach Endnutzungsbereichen 2008	147
Tabelle 63:	Konzentrationen strategischer Metalle in Autokatalysatoren	148
Tabelle 64:	Verteilung der Nachfrage nach Seltenen Erden nach Marktsektoren im Jahr 2008 (Angaben in Tonnen).....	149
Tabelle 65:	Verwendung von Seltenen-Erd-Permanentmagneten in der Fahrzeugindustrie	151
Tabelle 66:	Datengrundlage zur Ermittlung der Materialzusammensetzung der Basis-PKW	152
Tabelle 67:	Konzentrationen für Dysprosiumoxid, Gadoliniumoxid und Terbiumoxid in Automobilen, differenziert nach Fahrzeugklasse	153
Tabelle 68:	Bestandsveränderung von M1-Fahrzeugen in Deutschland (Datengrundlage KBA 2013a).....	154
Tabelle 69:	Altautoanzahl in Deutschland in Millionen	154
Tabelle 70:	Klassifizierungen von Gebrauchtfahrzeugen in der EU-Handelsstatistik	156
Tabelle 71:	Extra-EU-Exporte von M1-Fahrzeugen aus Deutschland, in Mio. Fahrzeugen	157
Tabelle 72:	Extra-EU-Exporte von PKW	158
Tabelle 73:	Extra-EU-Exporte von Nutzfahrzeugen	158
Tabelle 74:	Innereuropäische Exporte von PKW aus der Nutzungsphase.....	160
Tabelle 75:	Innereuropäische Exporte von Nutzfahrzeugen aus der Nutzungsphase	160
Tabelle 76:	Anzahl Fahrzeuge (PKW) und korrespondierende Mengen von ReStra-Zielmetallen aus Katalysatoren am Ende der theoretischen Nutzungsphase in 2020.....	160
Tabelle 77:	Anzahl Fahrzeuge (PKW) und korrespondierende Mengen von ReStra-Zielmetallen aus anderen Anwendungen als Katalysatoren am Ende der theoretischen Nutzungsphase in 2020	161
Tabelle 78:	Exporte - Korrigierte zu erwartende Fahrzeugmenge (PKW) in 2020 (eig. Berechnung).....	161

Tabelle 79:	ReStra-Zielemetalle aus Katalysatoren [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (PKW)	161
Tabelle 80:	ReStra-Zielemetalle aus sonstigen Anwendungen [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (PKW).....	161
Tabelle 81:	ReStra-Zielemetalle aus Katalysatoren [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (Nutzfahrzeuge)	162
Tabelle 82:	ReStra-Zielemetalle aus sonstigen Anwendungen [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (Nutzfahrzeuge).....	162
Tabelle 83:	Korrigierte zu erwartende Fahrzeugmenge (Nutzfahrzeuge) in 2020	162
Tabelle 84:	ReStra-Zielemetalle aus Katalysatoren [kg] - Mengen von ReStra-Zielmetallen in 2020 aus Nutzfahrzeugen.....	162
Tabelle 85:	ReStra-Zielemetalle sonstigen Komponenten [kg] - Mengen von ReStra-Zielmetallen in 2020 aus Nutzfahrzeugen.....	162
Tabelle 86:	ReStra-Zielmetalle aus Katalysatoren - Metallmengen in 2020 aus Nutzfahrzeugen (Szenario: geringe LKW-Altfahrzeugzahlen) (Angaben in kg)	163
Tabelle 87:	ReStra-Zielmetalle aus sonstigen Komponenten - Metallmengen in 2020 aus Nutzfahrzeugen (Szenario: geringe LKW-Altfahrzeugzahlen) (Angaben in kg).....	163
Tabelle 88:	Bezüglich der Verwendung von Mischmetall befragte Institutionen.....	163
Tabelle 89:	Metallmengen in 2020 aus NiMH-Batterien (Angaben in t).....	168
Tabelle 90:	Polierschlammengen der Optischen Industrie in Deutschland in den Jahren 2008, 2009.....	169
Tabelle 91:	Prognostizierte Polierschlammengen (fest und flüssig) für die Jahre 2018 - 2020	170
Tabelle 92:	Gehalt von Cer und Lanthan in Polierschlämmen (Bezug: TS, Angaben als Oxide)	170
Tabelle 93:	Menge an Cer und Lanthan aus Polierschlämmen in 2020 (Angaben in t)	171
Tabelle 94:	Strahlenschutzgläser: Schätzung des Bestands an gebundenem Cer.....	171
Tabelle 95:	Mögliche Konzentrationen von Erbium-Oxid und Cer-Oxid in Spezialgläsern	172
Tabelle 96:	In Nd:YAG-Laserkristallen und -stäben enthaltenes Neodym und Yttrium	174
Tabelle 97:	In Er:YAG-Laserkristallen und -stäben enthaltenes Erbium und Yttrium (gerundet)	175
Tabelle 98:	Anlagen- und Generatorkonzepte von Windenergieanlagen.....	176
Tabelle 99:	Auswertung der Abschlussarbeiten von Projektpartnern	177

Tabelle 100:	Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland	177
Tabelle 101:	Installierte Windenergieleistung in Deutschland.....	178
Tabelle 102:	Entwicklung der kumulierten Leistung von Onshore-Windanlagen von 2005- 2020	179
Tabelle 103:	Entwicklung der kumulierten Leistung von Offshore-Windanlagen von 2005-2020.....	180
Tabelle 104:	Prozentuale und mengenmäßige Anteile der Metalle an einem durchschnittlichen Permanentmagnet.....	181
Tabelle 105:	Zusammensetzung eines Permanentmagneten in einer IA-PM Anlage von Vestas	182
Tabelle 106:	Abschätzung des im Bestand vorhandenen Lagers von Dysprosium, Neodym und Terbium in Onshore-Windkraftanlagen	183
Tabelle 107:	Abschätzung des im Bestand vorhandenen Lagers von Dysprosium, Neodym und Terbium in Offshore-Windanlagen.....	184
Tabelle 108:	In Verkehr gebrachte Mengen Seltener Erden in Windenergieanlagen (kg) (Nd, Dy, Tb)	185
Tabelle 109:	Metallmengen aus Windenergieanlagen in 2020 (Angaben in kg)	185
Tabelle 110:	Übersicht MR-Systeme	187
Tabelle 111:	Abschätzung des inländischen (Deutschland) Bestandes von MRT-Geräten (Quelle: BARMER; GEK, Arztreport 2011).....	188
Tabelle 112:	Prozentuale und absolute Massenanteile von Seltenen Erden in einem NEB-Permanentmagneten von 100 kg	190
Tabelle 113:	In Verkehr gebrachte MRT-Mengen in Abhängigkeit von verschiedenen Formparametern.....	191
Tabelle 114:	Aus MRT-Geräten in 2020 zu erwartende Metallmengen unter Annahme verschiedener Marktanteile und Formparameter [Angaben in Kilogramm]	191
Tabelle 115:	Abschätzung des inländischen (Deutschland) Bestandes von Computertomographen	193
Tabelle 116:	Richtwert für die Gadoliniumoxid-Konzentration in Computertomographen	194
Tabelle 117:	Zeitreihen zur Inverkehrbringung von Röntgengeräten/CTs, in Abhängigkeit von verschiedenen Formparametern	194
Tabelle 118:	In 2020 zu erwartende Gadoliniummenge aus Röntgengeräten/CTs (Angaben in kg)	195
Tabelle 119:	Exportanteile von Brennstoffzellen in Deutschland nach (VDMA Survey 2013) ergänzt um Interpolationen.....	197
Tabelle 120:	Abschätzung installierter Einheiten an Brennstoffzellen in Deutschland im Zeitraum 2012-2020. Eigene Berechnungen nach (VDMA 2013) mit interpolierten Werten.....	199
Tabelle 121:	Mittlere Leistung der einzelnen Brennstoffzellen.....	199

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 122:	Installierte Leistung [MW] der relevanten Zellentypen in Deutschland im Zeitraum 2012-2020.....	201
Tabelle 123:	Reaktionsgleichungen der beiden Reaktionen, die in einer SOFC ablaufen	201
Tabelle 124:	Gehalt an Y und La in SOFC	202
Tabelle 125:	Umrechnung der Legierung in reines Y bzw. La	202
Tabelle 126:	Platinkonzentrationen in PEMFC im Zeitraum 2012-2020; fehlende Werte interpoliert	203
Tabelle 127:	Mengen strategischer Metalle in 2020 aus Brennstoffzellen (Angaben in kg)	207
Tabelle 128:	Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum	209
Tabelle 129:	Inverkehrbringung Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum	210
Tabelle 130:	Anzahl von Rechenzentren in 2008 und resultierender Bestand an Glasfaserinfrastruktur.....	211
Tabelle 131:	Szenarien zur Entwicklung der Rechenzentrumsstruktur	214
Tabelle 132:	Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur in Rechenzentren..	214
Tabelle 133:	In Verkehr gebrachte Mengen Glasfaserkabel in Rechenzentren	215
Tabelle 134:	Kabelanschlüsse und entsprechende optische Verstärker	216
Tabelle 135:	Bestandsentwicklung optischer Verstärker	216
Tabelle 136:	In Verkehr gebrachte Mengen EDFA für Kabelanschlüsse	217
Tabelle 137:	Germaniummenge aus Glasfaserkabeln (Telekommunikationsinfrastruktur) in 2020 (Angaben in kg).....	219
Tabelle 138:	Germaniummenge in 2020 aus Glasfaserkabeln in Rechenzentren (Angaben in g).....	219
Tabelle 139:	Erbiummenge in 2020 aus EDFA (Angaben in mg).....	220
Tabelle 140:	Jährlich installierte PV-Leistung, CIGS, CdTe und a-Si Anteile ..	222
Tabelle 141:	Gehalte strategischer Metalle in CIGS-Zellen (Angaben in g/kWp)	224
Tabelle 142:	Gehalte strategischer Metalle in CdTe-Zellen (Angaben in g/kWp)	224
Tabelle 143:	Menge strategischer Metalle aus Photovoltaikanlagen in 2020 bei verschiedenen Metallkonzentrationen und k-Werten (kg) Teil 1: Verweildauer = 25 Jahre.....	226
Tabelle 144:	Menge strategischer Metalle aus Photovoltaikanlagen in 2020 bei verschiedenen Metallkonzentrationen und k-Werten (kg) Teil 1: Verweildauer = 30 Jahre.....	227
Tabelle 145:	Anzahl an in Deutschland produzierten LED-Anzeigetafeln	229
Tabelle 146:	Videowalls in Stadien	230

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 147:	Zeitlicher Verlauf der installierten LED-Anzeigetafeln.....	231
Tabelle 148:	Erhebung zu Displays in Bahnhöfen	232
Tabelle 149:	Erhebung zu Flughäfen.....	232
Tabelle 150:	Übersicht zur Anzahl von LED in LED Anzeigetafeln in Deutschland	233
Tabelle 151:	Metallkonzentrationen in einer Referenz-LED nach Spengler et.al. (2013) (Angaben in Mikrogramm/LED).....	235
Tabelle 152:	Mengen strategischer Metalle in 2020 aus LED- Anzeigetafeln (Angaben in kg).....	236
Tabelle 153:	Verkaufszahlen für elektrische Fahrräder in Deutschland (Stück).....	238
Tabelle 154:	iVgM von Nd, Dy und Tb durch Pedelecs in Deutschland von 2002 bis 2020 (Angaben in kg).....	239
Tabelle 155:	Metallmengen in 2020 aus Pedelecs	240
Tabelle 156:	Anzahl verkaufter Fahrräder sowie Fahrräder mit Nabendynamo in Deutschland in den Jahren 2004-2013	240
Tabelle 157:	Metallmengen in 2020 aus Nabendynamos	241
Tabelle 158:	Gesamtverkäufe und Prognose der Gesamtverkäufe von Raumklimaanlagen mit einer Leistung <12kW in Deutschland von 2005 bis 2020.....	242
Tabelle 159:	In Verkehr gebrachte Metallmengen in Raumklimaanlagen	243
Tabelle 160:	Metallmengen aus Raumklimaanlagen.....	243
Tabelle 161:	Schleifmittelhersteller ohne Verwendung Seltener Erden.....	245
Tabelle 162:	Abschätzung Yttrium aus Schleifmitteln	248
Tabelle 163:	Y ₂ O ₃ -Gehalte in Wärmedämmschichten	249
Tabelle 164:	Installierte Leistung von Gaskraftwerken und resultierende Materialmengen.....	250
Tabelle 165:	Installierte Leistung dezentraler Gasturbinen und resultierende Materialmengen.....	251
Tabelle 166:	Yttriummengen in 2020 aus stationären Gasturbinen	252
Tabelle 167:	Flugzeugbestand der fünf größten deutschen Airlines	254
Tabelle 168:	Flugzeugbestellungen deutscher Airlines bis 2020.....	256
Tabelle 169:	Entwicklung des Flugzeugs- und Triebwerksbestandes.....	257
Tabelle 170:	Über TBC in Flugzeugtriebwerken in Verkehr gebrachte Yttriummenge	257
Tabelle 171:	Yttriummengen in 2020 aus Flugzeugtriebwerken	259
Tabelle 172:	Kontaktierte Unternehmen, die Absorbermaterial bzw. Kontrollstäbe herstellen oder verwenden.....	260

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 173:	Anzahl der Brennstäbe (mit Absorbermaterial) im Bestand Bezugsjahr 2012	261
Tabelle 174:	Anzahl der Kontrollstäbe im Bestand Bezugsjahr 2012.....	262
Tabelle 175:	Anzahl relevanter Brennelemente und -Stäbe sowie Steuerelemente laut RWE Bezugsjahr 2012?.....	263
Tabelle 176:	Abschätzung der Menge an Gd im Bestand in Brennelementen in deutschen AKW (2012)	263
Tabelle 177:	Abschätzung der Menge an In im Bestand in Steuerstäben in deutschen AKW (Bezugsjahr 2012, Angaben in kg)	264
Tabelle 178:	Menge an Indium in den von RWE betriebenen Kernkraftwerken 2012 (Menge zum Zeitpunkt der Anlieferung)	265
Tabelle 179:	Kontaktierte Unternehmen, die HTS herstellen.....	268
Tabelle 180:	Einschätzung zur Relevanz von HTS (Theva).....	269
Tabelle 181:	Typologie und Anzahl von Rechenzentren in 2008.....	272
Tabelle 182:	Materialzusammensetzung Tower-Server Referenzeinheit in Rechenzentren	273
Tabelle 183:	Materialbestand in Rechenzentren in Deutschland 2008.....	273
Tabelle 184:	Materialbestand USV-Leitplatten 2008	274
Tabelle 185:	Materialbestand in Rechenzentren 2015 (Szenario Business-as- usual)	276
Tabelle 186:	Materialbestand in Rechenzentren 2015 (Szenario Green IT)	277
Tabelle 187:	Materialbestand in Rechenzentren 2008-2020, Szenario Business- as-usual (Angaben in kg).....	277
Tabelle 188:	Materialbestand in Rechenzentren 2008-2020, Szenario Green-IT (Angaben in kg)	278
Tabelle 189:	Inverkehrbringung strategischer Metalle in Rechenzentren 2011- 2020 (kg)	280
Tabelle 190:	Strategische Metalle aus Rechenzentren in 2020, Angaben in kg	280
Tabelle 191:	Übersicht analysierter Produkte und Metalle.....	281
Tabelle 192:	Abfallarten, von denen der Gehalt relevanter Metalle erwartet wird, sowie deren Abfallmenge im Jahr 2010	284
Tabelle 193:	Gegenüberstellung des Recyclingpotenzials und der importierten Mengen ausgewählter kritischer Metalle (2010).....	287
Tabelle 194:	Zusammenfassung der zu erwartenden Mengen strategischer Metalle aus den im Jahr 2020 als Abfall anfallenden betrachteten Produkten im Jahr 2020	287
Tabelle 195:	Zusammenfassung der zu erwartenden Metallmengen in 2020 ..	300
Tabelle 196:	Legende zur Tabelle 197: Implementierungsmaßstäbe	309
Tabelle 197:	Überblick der Ergebnisse aus dem Technologiescreening	310

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 198:	Verluste entlang der Entsorgungskette von PGM-haltigen Industriekatalysatoren	321
Tabelle 199:	Verluste entlang der Entsorgungskette von FCC-Katalysatoren..	322
Tabelle 200:	Verluste entlang der Entsorgungskette von Polymerisationskatalysatoren.....	323
Tabelle 201:	Materialverluste entlang der Entsorgungskette von Altautokatalysatoren	329
Tabelle 202:	Verluste strategischer Metalle aus sonstigen Automobilkomponenten entlang der Entsorgungskette	332
Tabelle 203:	Verluste entlang der Entsorgungskette von Spezialgläsern	333
Tabelle 204:	Behandlungsverfahren für Dünnschichtphotovoltaikmodule	336
Tabelle 205:	Materialverluste von ReStra-Metallen entlang der Entsorgungskette von Dünnschicht PV-Modulen	338
Tabelle 206:	Materialverluste entlang der Entsorgungskette keramischer Hitzeschutzbeschichtungen	340
Tabelle 207:	Materialverluste aus Anwendungen von Mischmetall in der Metallurgie	341
Tabelle 208:	GRS-Sicherheitsklassen (GRS 2012a)	342
Tabelle 209:	Sammlung von NiMH-Batterien der vier Rücknahmesysteme in 2012	342
Tabelle 210:	Sammlung von Industriebatterien in den Jahren 2007-2009.....	343
Tabelle 211:	Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von NiMH-Batterien.....	346
Tabelle 212:	Zusammensetzung Poliermittel - vor und nach Gebrauch	347
Tabelle 213:	Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Poliermitteln	348
Tabelle 214:	Kontaktierte Hersteller bzw. Vertriebsfirmen von Lasern.....	348
Tabelle 215:	Materialverluste entlang der Entsorgungskette von Laseranwendungen	349
Tabelle 216:	Materialverluste entlang der Entsorgungskette von getriebelosen Windenergieanlagen.....	351
Tabelle 217:	Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette medizintechnischer Geräte	352
Tabelle 218:	Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Brennstoffzellen.....	355
Tabelle 219:	Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette optischer Faseranwendungen	356
Tabelle 220:	Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von LED-Anzeigetafeln	357

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 221:	Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Elektrofahrrädern.....	358
Tabelle 222:	Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Nabendynamos	359
Tabelle 223:	Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Raumklimaanlagen.....	361
Tabelle 224:	Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette yttriumhaltigen Schleifmitteln	362
Tabelle 225:	Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Absorbermaterial und Steuerstäben in Kernreaktoren.....	364
Tabelle 226:	Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Hochtemperatursupraleitern	365
Tabelle 227:	iVgM von B2B-Geräten der IT- und Telekommunikationstechnik sowie Verhältnis der iVgM zu der zurückgenommenen Menge eines Jahres	366
Tabelle 228:	Gehalte und Separationsraten von Edelmetallen für Demontage und mechanische Aufbereitung.....	368
Tabelle 229:	Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Rechenzentren	370
Tabelle 230:	Vor- und Nachteile verschiedener Recyclingoptionen für SE-haltige Permanentmagnete	371
Tabelle 231:	Ausblick - Verluste strategischer Metalle in der Entsorgung von Permanentmagneten	373
Tabelle 232:	Vergleich der Materialverluste in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette für das Jahr 2020.....	374
Tabelle 233:	Altproduktspezifischer Überblick der identifizierten Hemmnisse	379
Tabelle 234:	Zusammenfassung der Pfadabhängigkeiten	398
Tabelle 235:	Galliumpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in US\$ pro kg)	399
Tabelle 236:	Germaniumpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in US\$ pro kg)	399
Tabelle 237:	Goldpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in Tausend US\$ pro kg)	400
Tabelle 238:	Indiumpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in US\$ pro kg)	401
Tabelle 239:	Preisentwicklung Platingruppenmetalle 2003 - 2015 (in Tausend US\$ pro kg)	402
Tabelle 240:	Kosten US-amerikanischer PGM-Produzenten 2010 bis 2013 (geschätzt).....	403
Tabelle 241:	Preisentwicklung Seltene Erden- Metalle 2003 bis März 2013 (in US\$/kg)	404
Tabelle 242:	Preisentwicklung von Seltene Erden-Oxiden 2003 bis März 2013 (in US\$/kg)	405

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 243:	Preisentwicklung von Seltene Erden-von 2011 bis 2013 (in US\$ /kg)	405
Tabelle 244:	Rentabilität der Sekundärgewinnung von ReStra-Zielelementen aus ReStra-Altprodukten - qualitative Abschätzung	413
Tabelle 245:	Vorteile und Auswirkungen des Recyclings von Kupfer aus Gewerbe-, Industrie- und Abbruchabfällen (pro Tonne). Vorteile werden negativ, Auswirkungen positiv dargestellt.	415
Tabelle 246:	Umweltentlastungspotenziale durch optimierte Kreislaufführung von ReStra-Altprodukten berechnet auf der Grundlage Nuss (2014)	419
Tabelle 247:	Abfallpotenzial von Neodym aus verschiedenen Anwendungen im Jahr 2020	434
Tabelle 248:	Überblick rechtlicher Rahmen (Status quo) in Bezug auf die Zielsetzung des Projektes ReStra.....	443
Tabelle 249:	Überblick über die Empfehlungen rechtlicher Rahmensetzung in Bezug auf die Zielsetzung des Projektes ReStra	445
Tabelle 250:	Überblick Handlungsempfehlungen	450
Tabelle 251:	Synopse von zehn ausgewählten Kritikalitätsstudien aus Erdmann et Graedel (2012) - Teil 1: Zieldefinition und Rahmen.....	511
Tabelle 252:	Synopse von zehn ausgewählten Kritikalitätsstudien aus Erdmann et Graedel (2012) - Teil 2: Rohstoffgruppen.....	512
Tabelle 253:	Synopse von zehn ausgewählten Kritikalitätsstudien aus Erdmann et Graedel (2012) - Teil 3: Methoden.....	513
Tabelle 254:	Liste von Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	514
Tabelle 255:	Nach Metallen sortierte Technologielliste	532
Tabelle 256:	Aufbereitungsverfahren und Verfahren zur Metallrückgewinnung.....	583
Tabelle 257:	KEA Primärproduktion Gallium	611
Tabelle 258:	KEA Primärproduktion Gold	611
Tabelle 259:	KEA Primärproduktion Indium.....	612
Tabelle 260:	KEA Primärproduktion PGM	612
Tabelle 261:	KEA Sekundärproduktion PGM	613
Tabelle 262:	Umweltbelastungen der Primär- und Sekundärproduktion von Platingruppenmetallen im Vergleich.....	614
Tabelle 263:	Energieeinsparung beim Recycling von PGM.....	614
Tabelle 264:	KEA Primärproduktion Seltene Erden	615

Abkürzungen

ABANDA	Abfallanalysendatenbank
Abh.	Abhängigkeit
Abk.	Ausgeschriebene Bezeichnung der Abkürzung
Alk.	Alkohol
AP	Arbeitspaket
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BAT	Best Available Techniques
BEMP	Best Environmental Management Practice
BHKW	Blockheizkraftwerke
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesumweltministerium
BPD	barrels-per-day
bspw.	beispielsweise
bspw.	beispielsweise
BSZ	Brennstoffzelle
BVT	Beste verfügbare Techniken
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CCFL	cold cathode fluorescent lamp
CIGS	Copper Indium Gallium Selen
CO	Kohlenstoffmonoxid
CsI	Cesium-Iodid
CSZ	Cer stabilisiertes Zirkondioxid
CT	Computertomographie
d.h.	das heißt
DA	direkter Antrieb
DPF	Dieselpartikelfilter
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräte
EAK	Europäischer Abfallkatalog
EDFA	erbium-doped fiber amplifier
EDWA	erbium-doped waveguide amplifier

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

EoL	End-of-Life
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
ERP	European Recycling Platform
etc.	et cetera
EU-Kom	Europäische Kommission
evtl.	eventuell
EW	Einweg
FCC	Fluid Catalytic Cracking
FPD	flat panel detector
FEE	Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V.
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FKZ	Forschungskennzahl
FTTH	Fiber-to-the-home
FZV	Fahrzeugzulassungsverordnung
GaAS	Galliumarsenid
ggf.	gegebenenfalls
GPS	Global Position System
GRS	Gemeinsame Rücknahmesysteme für Batterien
HC	Kohlenwasserstoffe
HHGG	Haushaltsgroßgeräte
HTS	Hochtemperatursupraleiter
i.d.R	in der Regel
IA	indirekter Antrieb
inkl.	inklusive
insb.	insbesondere
ITO	Indiumzinnoxid
iVgM	in Verkehr gebrachte Menge
JRC	Joint Research Centre
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KLL	Kompaktleuchtstofflampe
KNV	Katalytische Nachverbrennung
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LCA	Life Cycle Assessment

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

LCD	Liquid Crystal Display
LCI	Life Cycle Inventory
lt.	laut
MAN	Metropolitan Area Networks
max.	maximal
med.	medizinisch
MF	multimode fiber
MFA	material flow analysis
Mio.	Millionen
MO	magneto-optisch
MRI	Magnet Resonance Imaging
MW	Mehrweg / Megawatt
NE	Nichteisen
NiMH	Nickel-Metall-Hybrid-Batterien
NO _x	Stickstoffoxide
o.ä.	oder ähnlichem
o.g.	oben genannt
oz	troy ounce
pers.	persönlich
PET	Polyethylenterephthalat
PGM	Platingruppenmetalle
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikel
PS	Pferdestärke
PTA	Purified Terephthalic Acid
PV	Photovoltaik
RePro	Forschungsprojekt „Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten“ Auftraggeber: Umweltbundesamt (FKZ 3711 95 318)
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RLG	Reverse Logistics Group
ROI	Return on invest
SCR	Selective Catalytic Reduction
SE	Seltene Erden
SEO	Seltenerd-Oxid

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

SiGe	Silizium-Germanium
SMSIF	Single Mode Stepped Index Fiber
SNAM	Société Nouvelle d’Affinage des Métaux
SOFC	Solid Oxide Fuel Cells
spez.	spezifisch
SQUIDS	Superconducting Quantum Interference Device
STC	Standard Test Conditions
SZM	Sattelzugmaschinen
TBC	Thermal Barrier Coatings
TCO	Transparent Conductive Oxide
TME	Toyota Motor Europe
USA	United States of America
USGS	U.S. Geological Survey
USGS	United States Geological Survey
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung
usw.	und so weiter
v.a.	vor allem
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie e.V.
vgl.	vergleiche
WLAN	Wireless Local Area Network
YBCO	Yttriumbariumkupferoxid
YSZ	Yttrium stabilisiertes Zirkondioxid
z. B.	zum Beispiel
ZFZR	zentralen Fahrzeugregister
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.

1 Zusammenfassung

1.1 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.

1.2 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).

1.3 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, Salpetersäurenherstellung, Blausäurenherstellung, 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

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Produktgruppe	Metallvorauswahl aus Produktgruppenidentifizierung	Relevante Metalle nach Produktanalyse	Analysierte Produkte
Lasieranwendungen	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-Faseranwendungen	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, un spez.	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.

1.4 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
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	-	-

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Produkt	Ist-Situation	Optimierte Entsorgung	Differenz
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 Alternativszenarios, 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.

¹ Bei Schwankungsbreiten wurde der arithmetische Mittelwert gebildet.

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

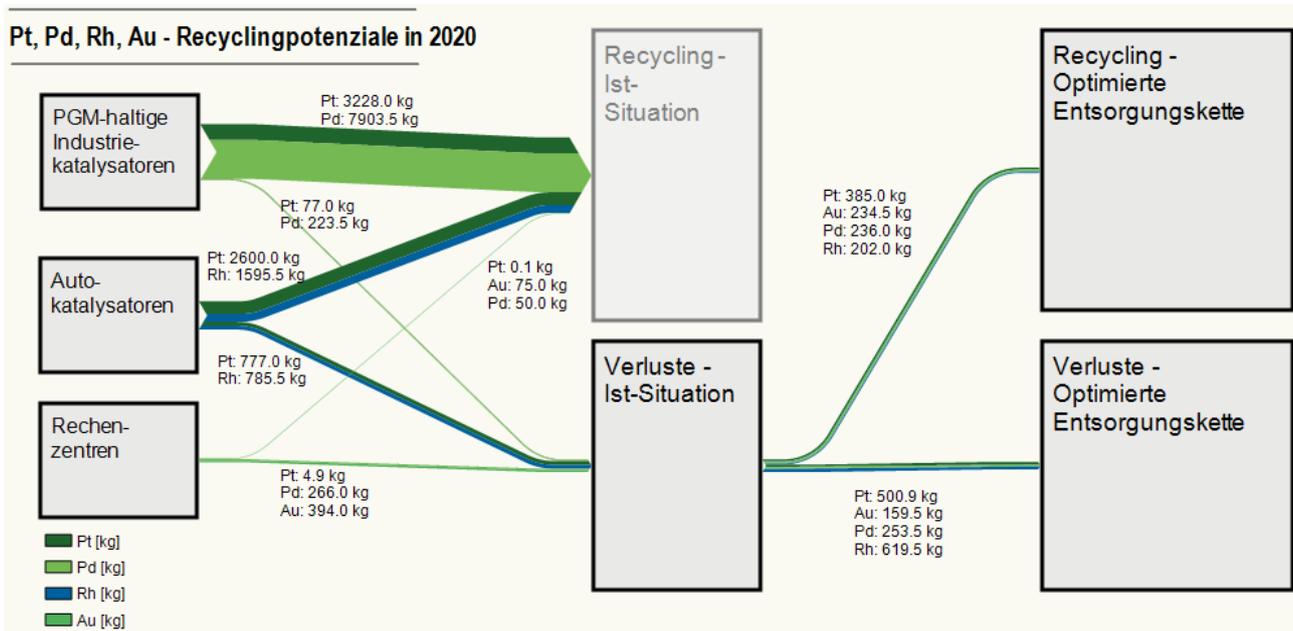


Abbildung 2: Mengenströme von Neodym, Dysprosium und Terbium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette

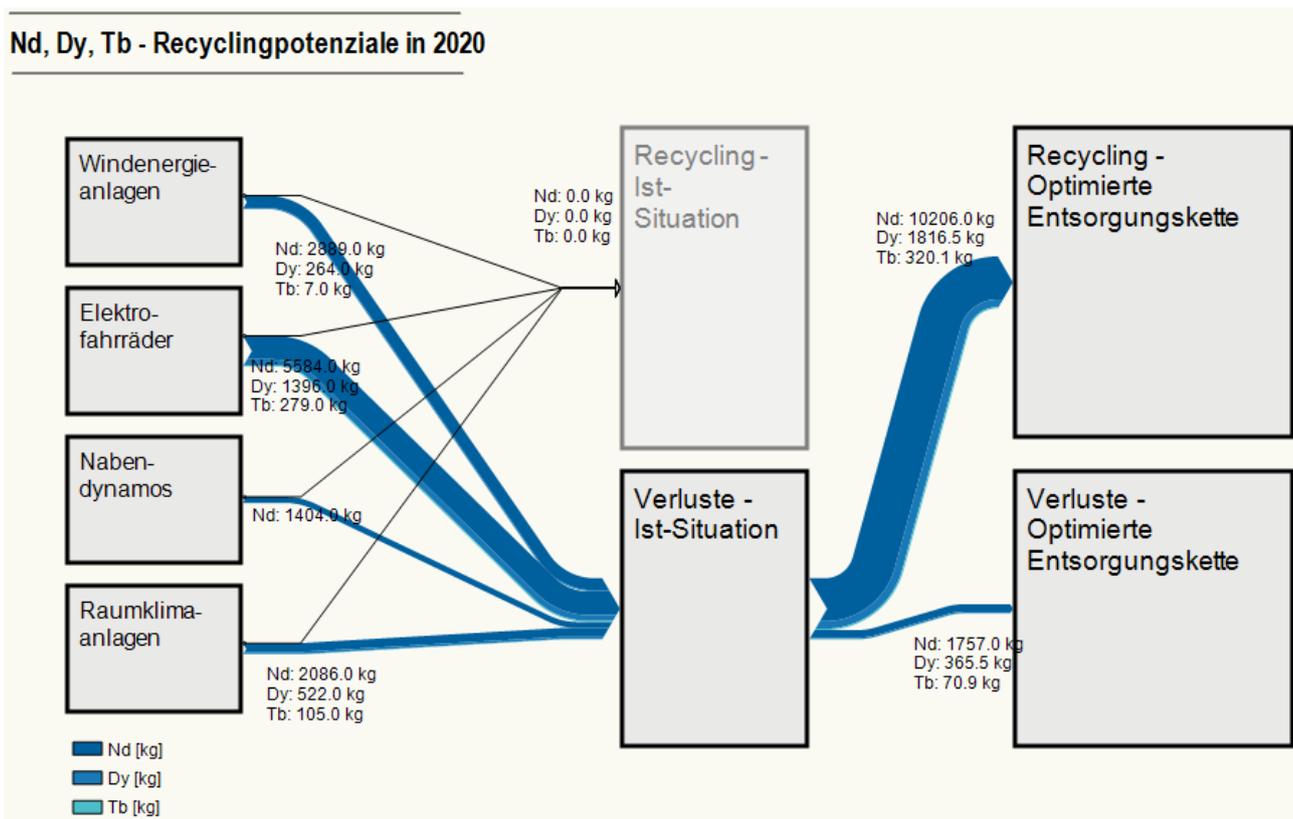


Abbildung 3: Mengenströme von Cer, Lanthan und un spezifizierten Seltenen Erden in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette

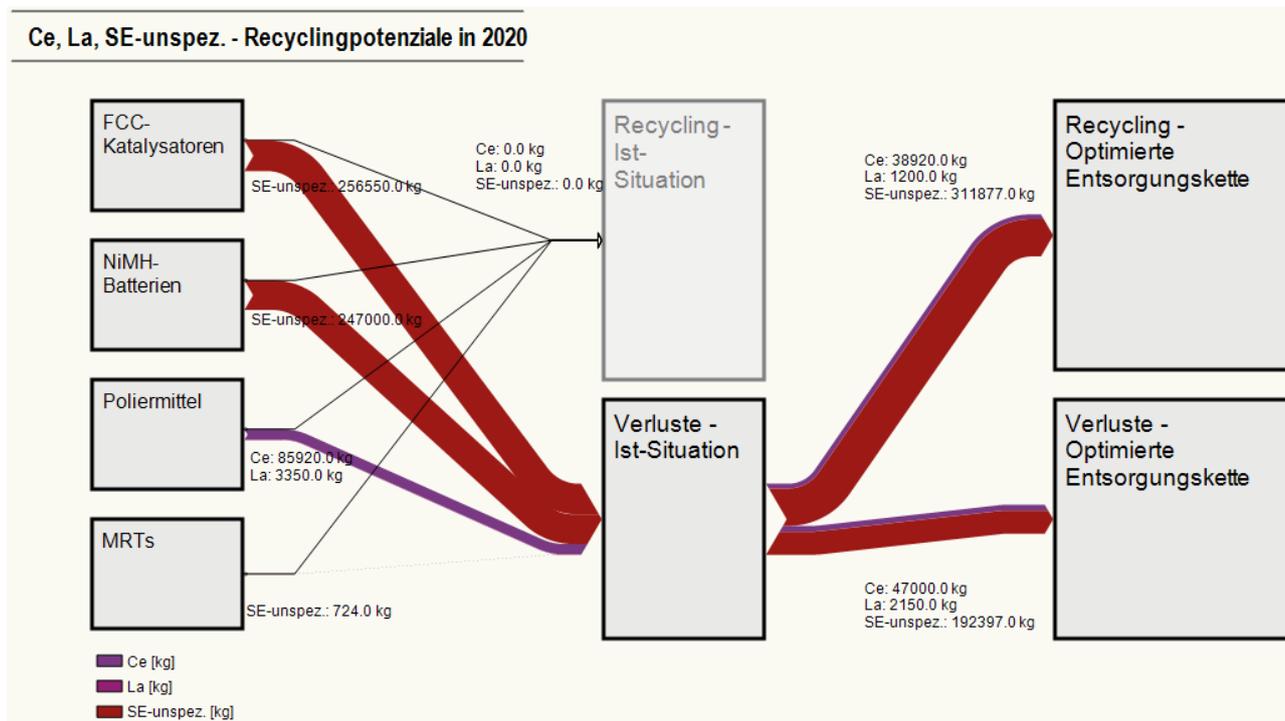
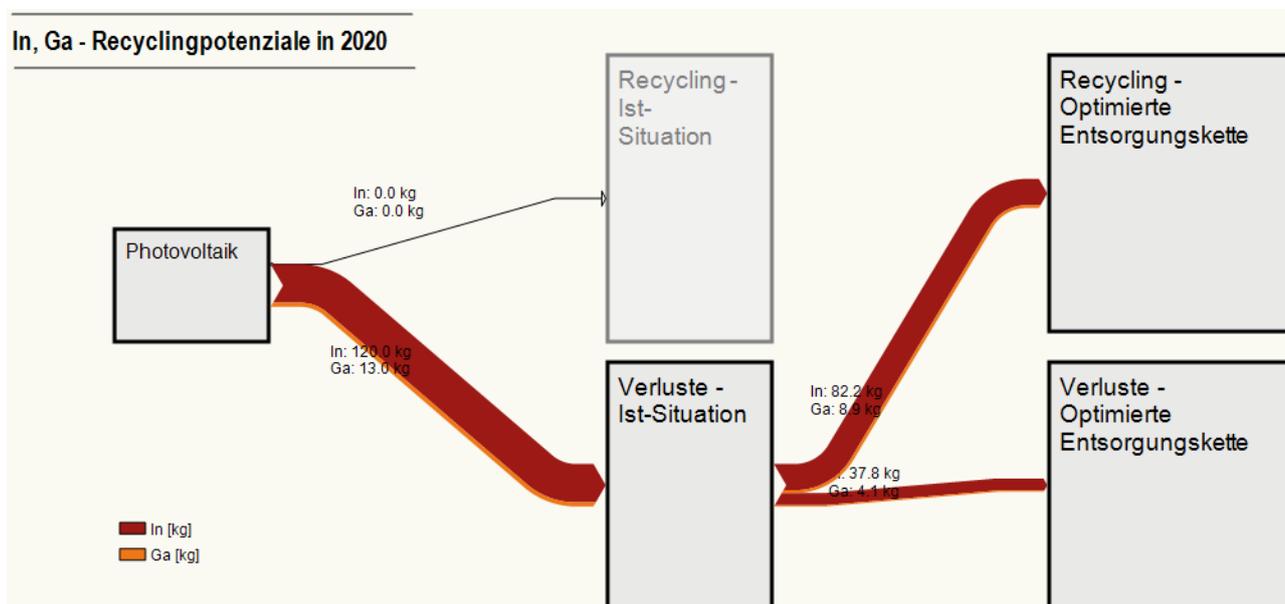


Abbildung 4: Mengenströme von Indium und Gallium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette



1.5 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-Zielmetalle 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 Kreislaufführung 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 Röntengeräten).

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

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

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.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 6: Überblick Handlungsempfehlungen

ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle)	Handlungsansatz	Aufwand Initialisierung	Aufwand Durchführung	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 Konstruktion	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 Verfahrensentwicklung 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
	Behandlungsanforderungen	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-Behandlungsv))	mittel			

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle)	Handlungsansatz	Aufwand Initialisierung	Aufwand Durchführung	Wirkung Menge	Wirkung Umwelt (KEA*Anteil)	Kritikalität EU (2014)
	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					
Röntgengeräte (Gd)	Entwicklung Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren	gering	hoch (finanziell)	mittel	gering	kritisch
Windenergieanlagen (Nd, Dy)	Schnittstelle ElektroG2	hoch (Gesetzgebungsprozess)	gering	gering	gering	kritisch
	Behandlungsanforderung	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-Behandlungsv))	gering			
	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					
Elektrofahrräder (Nd, Dy, Tb)	Behandlungsanforderung	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-Behandlungsv))	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 Rahmen der ElektroG2-Behandlungsv))	mittel	gering	mittel	kritisch
	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					
Rechenzentren (Pd)	Behandlungsanforderung	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-Behandlungsv))	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 %

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

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

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

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)
Raumklimaanlagen		ElektroG		Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG				Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung	Label Komponente (Kompressor)

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

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
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 infrage.

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

2 Summary

2.1 Background and objective

Many modern products contain so-called strategic raw materials, which are of major importance for their functioning. In addition to their high economic relevance, strategic raw materials are subject to supply risks, which result from geological, technical, structural, geopolitical, socio-economic and environmental settings. Thus, strategic metals shall be captured at the end of the products use phase and recycled.

It has been the objective of the project 'ReStra' to identify mass flows of strategic metals in selected products and product groups and with regard to the disposal situation in the year 2020, to identify potentials to optimise the disposal chains and to elaborate recommendations to mobilise the potentials.

2.2 Identification of strategic metals

In order to identify strategic metals for the in-depth analysis in ReStra, the concept of criticality matrix, which has been established in recent years for the identification of relative raw material shortages, has been applied. Criticality results in that concept from the dimension of economic relevance and from the dimension of supply risks respectively availability: the higher the supply risk and the higher the economic relevance, the higher the criticality of the examined raw material.

The criteria for the quantification of the supply risk and the economic relevance, which are used in relevant literature have been extended by an environmental perspective. The assessment of the economic relevance has been applied in the project ReStra also with regard to the relevance for next generation technologies with the potential of environmental relief. In addition to the usually applied technical, geopolitical and economic criteria concerning supply risks the criterion of environmental relevance of production of primary raw material has been applied in order to address the environmental relief effect from substitution of primary raw materials by secondary raw materials.

The indicators have been weighted as summarised in the following table.

Table 1: Weighting of criteria concerning economic relevance and supply risk

Field	Criterion	Weighting
Economic relevance	Relevance for next generation technologies with environmental relevance	25 %
	Actual consumption in Germany	25 %
	Expected global demand impulse	25 %
	Possibility for substitution	25 %
Supply risk	Country concentration reserves	15 %
	Country risk production	10 %
	Company risk	10 %
	Main-/by-product	15 %
	Environmental relevance (CED)	30 %
	Recyclability	15 %
	Recycling rate	5 %

Two sensitivity analysis have been performed in order to check robustness of the analysis. As a result, strategic metals located in the zone of high or highest criticality have been identified for in depth analysis in the course of the project ‘ReStra’ (‘ReStra target metals’). Since production of primary gold is often characterised by high environmental relevance due to the use of Cyanide and/or Mercury (Blacksmith, 2011), it has been added to the range of metals for the in depth analysis. The following table lists the outcome of the analysis.

Table 2: Selected ReStra target metals

Element	Comment
Rare Earths	Zone of highest criticality in the basic scenario and in both sensitivity analysis
Palladium	Zone of highest criticality in the basic scenario and in both sensitivity analysis
Gallium	Zone of high criticality in the basic scenario and in one sensitivity analysis
Germanium	Zone of high criticality in the basic scenario and in one sensitivity analysis
Indium	Zone of high criticality in the basic scenario and in one sensitivity analysis
Gold	Zone of high criticality in one sensitivity analysis, environmental relevance (Blacksmith, 2011)
Rhodium	Zone of high criticality in the basic scenario and in both sensitivity analysis, due to its character as platinum group metal, Rhodium will be analysed together with Palladium
Platinum	Zone of high criticality in the basic scenario and in one sensitivity analysis, due to its character as platinum group metal, Rhodium will be analysed together with Palladium

Further refinement has been performed for Rare Earth Elements (REE). This concerns especially light REE, which are regarded as less critical. Cerium and Lanthanum have been chosen as light REE due to their mass relevance. Neodymium has been chosen for those cases where no sufficient data was available for other REE in the same application field (e.g. magnets).

Less critical elements of the heavy REE like Holmium, Thulium and Lutetium have not been further analysed. Concluding, the following REE have been identified as ReStra target metals: Yttrium (Y), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Erbium (Er), Cerium (Ce) and Lanthanum (La) and, with limitations, Neodymium (Nd).

2.3 Identification of material flows

As a second working step the amount of selected end of life products and their content of ReStra target metals have been determined. The major approach was a (prospective) analysis where the waste volumes from selected products in the year 2020 was determined.

In addition availability and appropriateness of published waste analysis have been analysed regarding the identification of relevant waste streams with ReStra target metals. It has been found that number and characters of the published waste analysis were not appropriate as an input for the project.

A multi stage approach has been applied to determine the amount of strategic raw materials which will be available potentially as waste in the year 2020. As a first step relevant product groups have been identified on the basis of the application areas of the selected ReStra target metals. Within the next step, the product groups have been split into relevant products and prioritised according to their mass relevance of the strategic metal content.

As a subsequent step, the amounts of ReStra target metals in the selected products have been determined by applying a calculation model. This describes the amount of such metals which will potentially be available for recycling in the year 2020 in Germany.

The following table shows the product groups which have been identified based on the selection of ReStra target metals. The second and third column show the pre-selected metals and the finally selected metals, which are relevant for the identified products (column 4).

Metals, where the mass relevance have been unclear in the course of the identification of the product groups are shown in brackets.

Table 3: Overview of analysed products and metals

Product group	Pre-selected metals from identification of product groups	Relevant metals after product analysis	Analysed products
Industry catalysts	Ge, Pd, Pt, Rh, (Ce), La	Ge, Pd, Pt, Rh, Ce, La, (Nd, Pr)	FCC-Catalysts, Catalysts of the homogeneous catalysis, refinery catalysts, production of nitric acid, production of hydrocyanic acid, Solid- and fluidised bed catalysts, powder catalysts, polymerisation catalysts
Vehicle catalysts	Pd, Pt, Rh, Ce, La	Pd, Pt, Rh, Ce, La	Vehicle catalysts
Vehicle components	Gd, (Tb), Dy	Gd, Tb, Dy	Passenger cars, light duty vehicles
Metallurgy / alloys	Ce, La	Ce, La	Mix metal
Batteries	Sm, (Ce), La	SE (Ce, La, Nd, Pr)*	NiMH-batteries

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Product group	Pre-selected metals from identification of product groups	Relevant metals after product analysis	Analysed products
Application in optical industry	Er, Ce	Ce, La	Polishing agents and -sludge, special glasses
Laser applications	Er	Er	Medical laser (Er-YAg)
Wind energy plant	Gd, (Tb), Dy	Nd, Dy, Tb	DA-PM; IA-PM
Medical devices	(Tb), Dy, Gd, (Y)	Nd, Pr, Dy, Tb, Gd	MRT-appliances, X-ray appliances
Fuel cells	(Pt, Pd, Y)	Y, La	SOFC-BSZ
Optical fibre applications	Ge, Er	Ge, Er	Glass fibre infrastructure in public areas, glass fibres in data processing centres; Erbium-doped fibre amplifiers
Photovoltaic	In, Ga, Ge	In, Ga	CIGS, CdTe, a-Si
LEDs	In, Ga	In, Ga, Ce, Y, Au	LED display panel
Home appliances	(Tb, Dy)	Nd, Dy, Tb	e-bikes, hub dynamo, air conditioner
Ceramics	Y, (Ce)	Y	Grinding ceramics, ceramic heat protection
Absorber material and control sticks in nuclear power plants	In, Gd	In, Gd	Absorber material and control sticks in nuclear power plants
High temperature conductors	Y	Y	SQUIDS
Data processing centres	(Pd)	Pt, Pd, Au	Data processing centres

*DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast)

The following table shows the amounts of ReStra target metals estimated to be available as waste potential in Germany in 2020. The average resp. reference values are shown in relation to the global primary production of the respective metals.

Table 4: Summary of the expected amount of ReStra target metals in the year 2020 in Germany

Element	Mass in 2020 [kg]	Global (primary-) production [kg]	Share of global primary production [%]
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, unspecified.	299.152		

Sources: USGS; Bell 2013; Du und Graedel 2011b. Data for Pt, Pd, Au, In, Ga, Ge result from U.S. Geological Survey for 2012, Data for Rh result from Bell (2013) (no year specified), data for Rare Earths result from Da und Graedel (2011) and are related to 2007.

2.4 Identification of recycling and substitution potentials

In the next working step it has been investigated, which technologies are currently applied for the pre-treatment and the reclamation of ReStra target metals in the selected end of life products and which technologies are available but not yet or rarely applied. The optimisation effects on recycling of the selected metals have been estimated and it has been analysed whether path-dependencies are relevant for the existing disposal chains. The applied screening of technologies also comprised technologies which are implemented on laboratory or pilot level. The subsequent analysis of the disposal chains identified losses of ReStra target metals in the current disposal chains in Germany. Based on this, optimised disposal chains have been designed as far as possible.

The following table summarises the prognosis of mass flows.

Table 5: Comparison of material loss in the current situation and with optimised disposal chains for the year 2020

Product	Current situation	Optimised disposal chain	Difference
PGM-containing industry catalysts	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
FCC-catalysts	189-331 t REE	27-48 t REE	162-283 t REE
Vehicle catalysts	756-798 kg Pt 778-793 kg Rh 134.077-134.178 kg REE	427-451 kg Pt 578 - 589 kg Rh 134.077-134.178 REE	329-347 kg Pt 200-204 kg Rh 0 kg REE
Other vehicle components	55.102-55.770 kg REE	Depends on component	-
Special glasses	860 kg Ce	-	-
Photovoltaic	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
Heat protection ceramics	709-1.786 kg Y	Unclear	-
Mix metals	106-133 t Ce 46-58 t La	-	-
Batteries	187-303 t SE	112-197 t SE	75-106 t SE
Polishing agents	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
Laser applications	14 kg Er 8 kg Y	-	-
Wind energy plants	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
Medical devices	1.004-4.923 kg REE	134-710 kg REE	870-4.213 kg REE
Fuel cell (SOFC)	50.186 - 78.152 kg Y 30.767 - 47.770 kg La	-	-
Optical fibre applications	4 mg Er 1,2-3,4 kg Ge	-	-
LEDs display panels	0,14 kg Ga 0,11 kg In 0,03 kg Ce 0,96 kg Y 3,14 kg Au	Unclear	-
e-bikes	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
Hub dynamos	1.372-1.453 kg Nd	199-208 kg Nd	1.173-1.227 kg Nd

Product	Current situation	Optimised disposal chain	Difference
Air conditioner	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
Grinding ceramics	25-2.160 kg Y	-	-
Absorber materials and control sticks in nuclear power plants	70 kg Gd 650 kg In	-	-
High temperature supra conductors	42-140 kg Y	Unclear	-
Data processing centres	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	Average scenario: 75-94 kg Au 1,3-2 kg Pt 75-93 kg Pd low end scenario: 142-177 kg Au 1,7-2 kg Pt 97-118 kg Pd

Optimising potentials have been identified for the following products:

PGM-containing industry catalysts, FCC catalysts, vehicle catalysts, data processing centres, NiMH-batteries, polishing agents, MRTs, photovoltaic modules, wind power plants, e-bikes, hub dynamos, air conditioner.

The following graphs display the current and estimated optimised mass flows. The additional mass flows to the recycling in the optimised disposal chains show the potentials for substituting primary by secondary metals³.

³ The arithmetic averages have been calculated in the case of ranges.

Figure 1: Mass flows of Pd, Pt, Rh and Au in the current situation and with optimised disposal chains

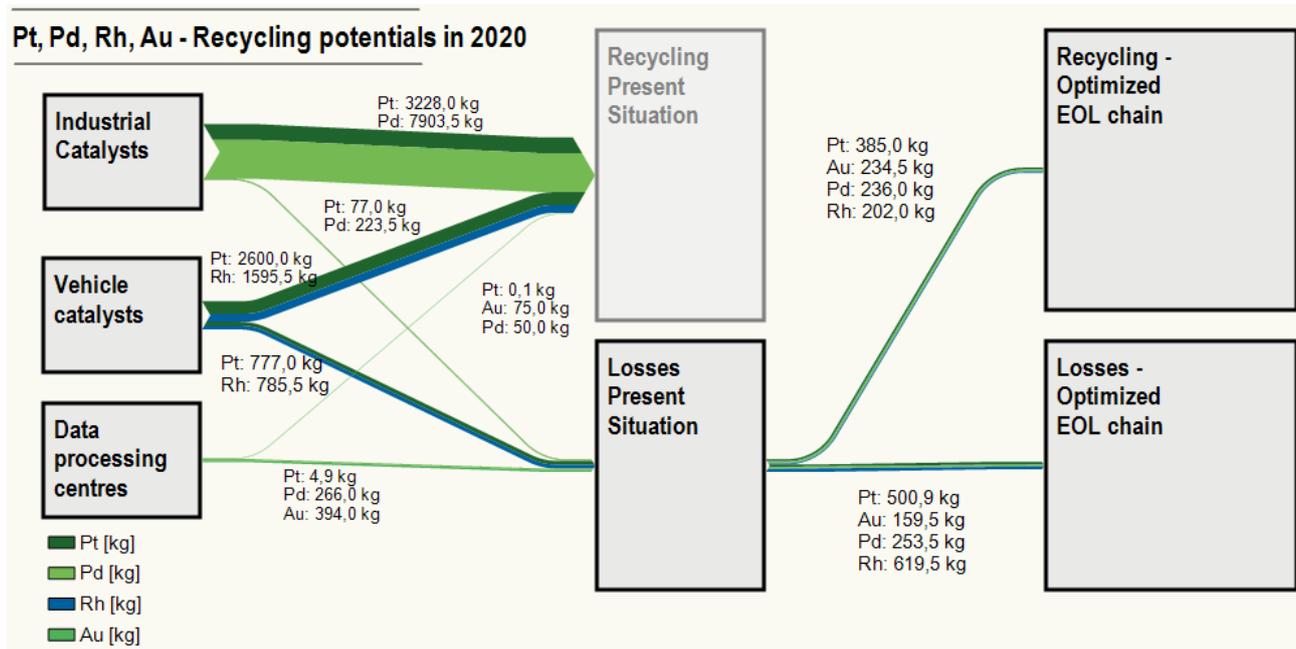


Figure 2: Mass flows of Nd, Dy and Tb in the current situation and with optimised disposal chains

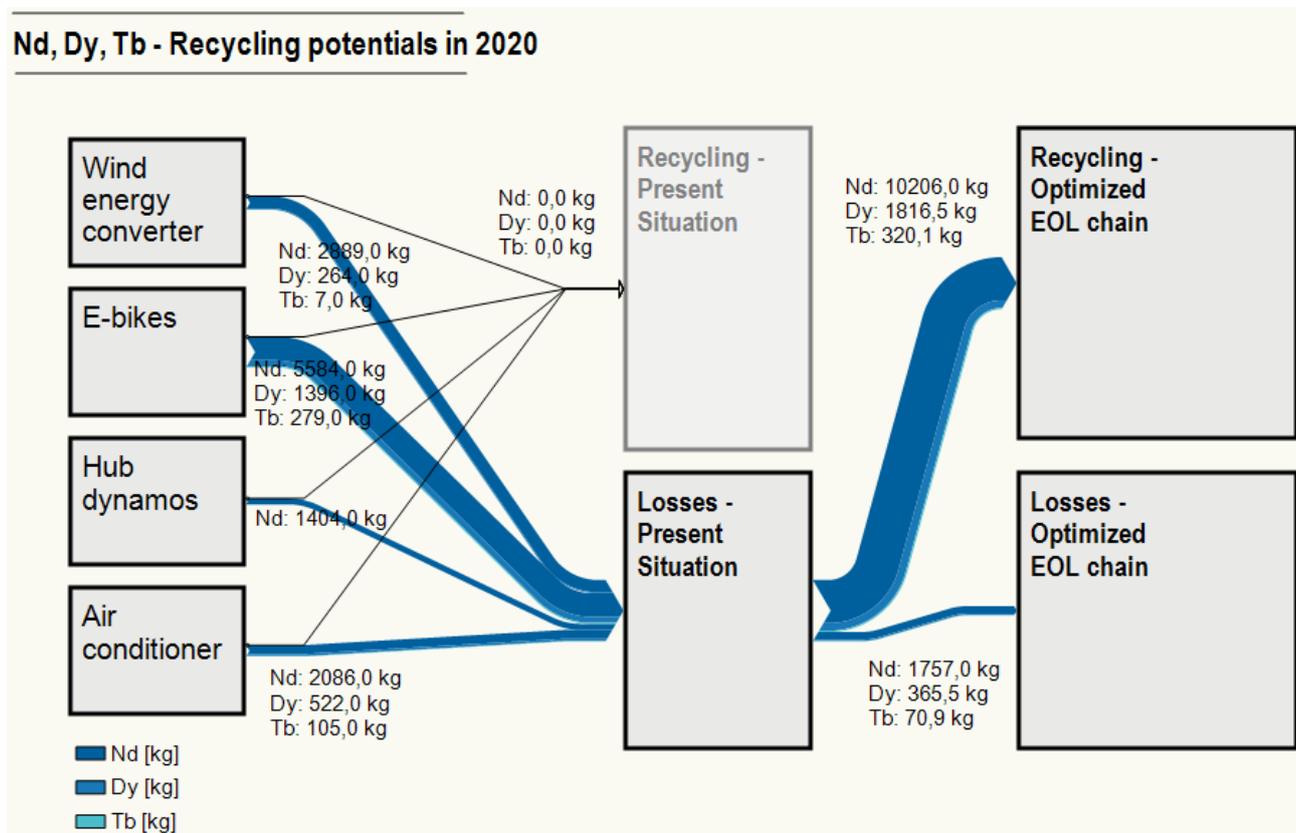


Figure 3: Mass flows of Ce, La and unspecified REE in the current situation and with optimised disposal chains

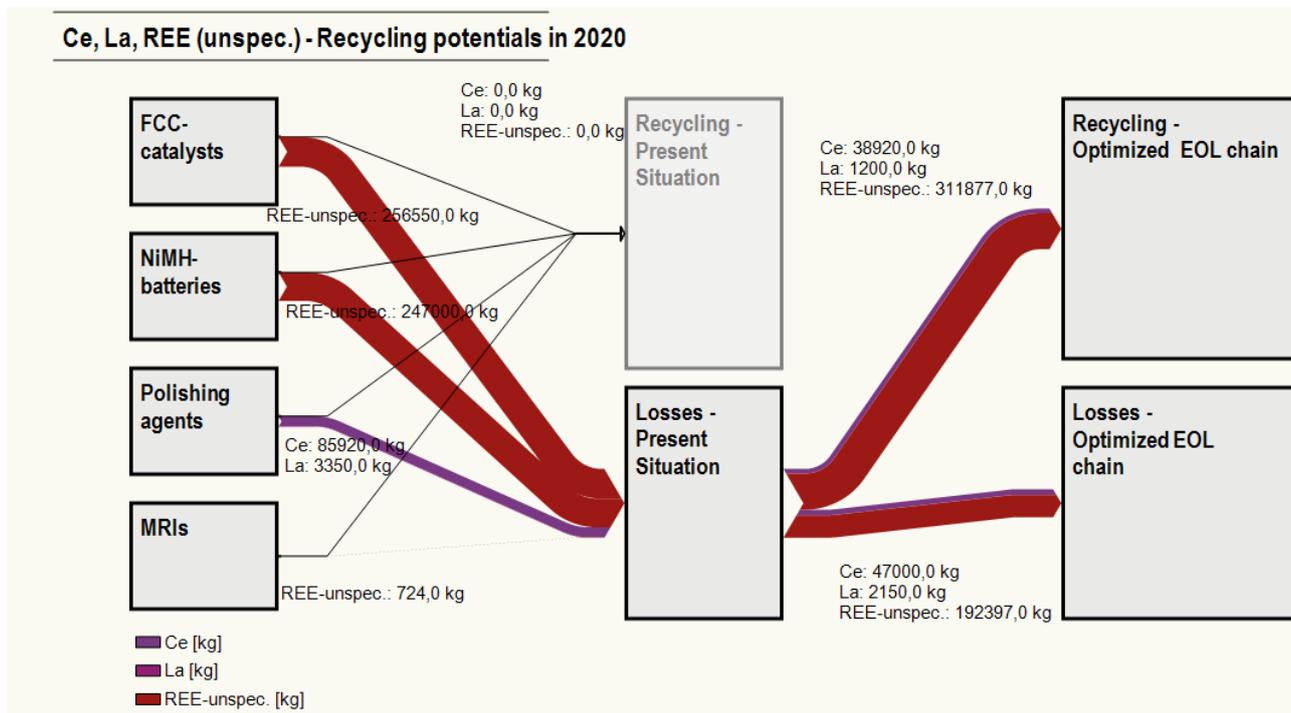
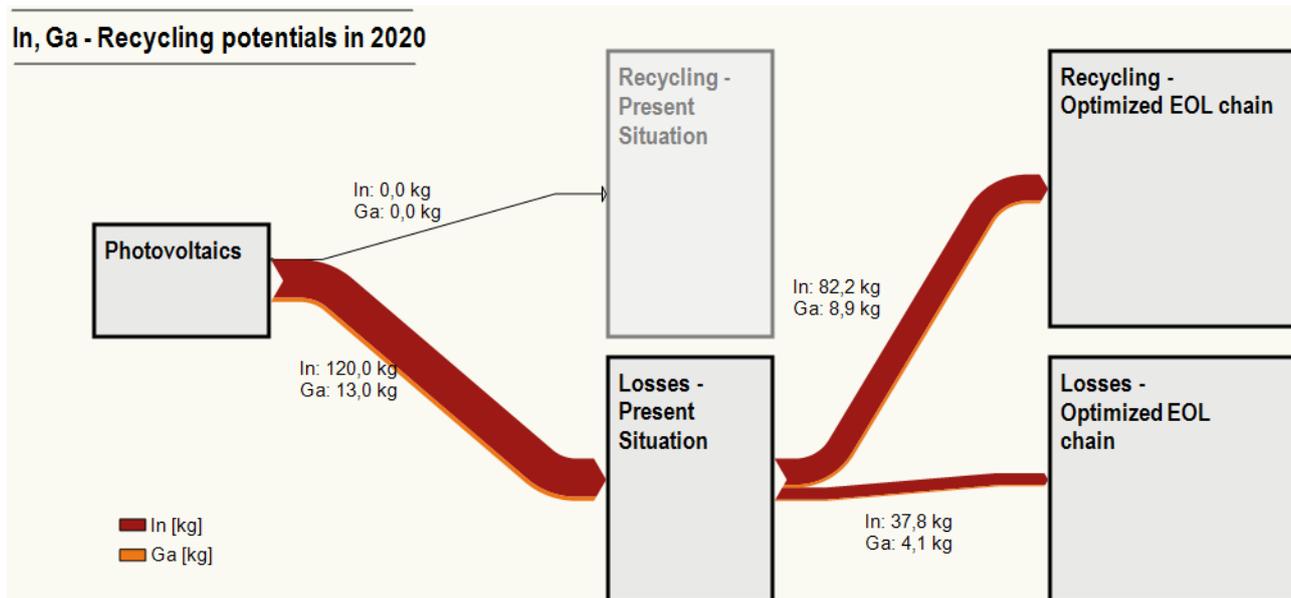


Figure 4: Mass flows of In and Ga in the current situation and with optimised disposal chains



2.5 Proposals

Based on the analysis in the previous working steps and for cases where optimising potentials have been identified, proposals have been deduced for a resource efficient design of the disposal chains of products.

Basically, economic considerations determine the decisions about the reclamation of strategic metals in the current situation. That should be re-thought with regard to environmental aspects

and political resource strategies, especially with regard to the strategic relevance of those metals for a high tech oriented economy. Ensuring partly autarky based on domestic raw material sources and the related robustness against raw material constraints and flexibility for technological developments should be taken into account in that context even where these factors cannot be directly transposed in monetary effects. Recycling becomes even more sensible when avoided environmental costs of primary raw material production are taken into account.

When future framework conditions are developed aspects of prospective supply safety and environmental costs shall be considered in addition to the economic situation which results from the current framework conditions. By considering those aspects, intermediate storage and material pools, where waste fractions are stored until recycling, are sensible even if profitability of reclamation is currently not given in all cases.

Basically, it is seen as sensible also to implement the objectives of resource efficiency and a mass flow oriented circular economy in a revised European Waste List e.g. in the form of a more material oriented structure of the catalogue.

The analysis of the current situation, the restrictions and the path dependencies showed that improved availability of information about the presence of ReStra target metals is an important option for improvement. In order to be efficient and effective the type of information and the way the information is provided must be closely adapted to the waste management practice.

Extended (obligations for) separate collection and implementation of best practice approaches for transport and handling have been identified as important topics to ensure improved recyclability of ReStra target metals.

The example of reclamation of ReStra target metals from automotive components has shown that “design for recycling” might be focussed on “design for dismantling” approaches in order improve the economic situation for the reclamation of ReStra target metals.

Improved circularity can be achieved for the majority of analysed end of life products via extended dismantling and treatment requirements. The requirements shall be made obligatory because an economic self-steering in the right direction currently does not exist.

In addition, development of treatment and reclamation chains shall be promoted (e.g. Yttrium from high temperature ceramics or Gadolinium from x-ray machines).

The analysis also revealed that the highest efficacy of interventions can often be expected when dual approaches are realised. The example of magnets with REE has shown that dual approaches are appropriate to solve the “hen and egg” problem, according to which no reclamation plants are run as long as there is no input material and at the same time no input material is generated as long as no recycling paths are available. Dual approaches support that magnets will be separated in pre-treatment (and ensure that input material is available) and at the same time recycling on industrial level is supported via process related measures.

Efficacy of dual approaches have also been identified in the area of information flows and design for dismantling approaches. By establishing corresponding measures on the product level and for the waste phase it is possible to reduce the risk of ineffective (isolated) measures.

The following table provides an overview of the measures, estimated efforts and expected effects of the measures.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Table 6: Overview of proposed measures

ReStra-EoL product (ReStra-target metal)	Measure	Efforts initialisation	Efforts performing	Effect mass	Effect env. (KEA*share)	Criticality EU (2014)
Homogeny catalysis (Pd, Pt)	Optimised information	Low	Low	Low	High	High
	Separate collection	High (new law)	Average			
Environmental catalyst (Pt)	Optimised information	Low	Low			
	Separate collection	High (new law)	Average			
FCC catalyst (Ce, La)	See raw material related measures below					
Vehicle catalyst (Pt, Rh, La, Ce)	best practice transport	High (new law)	Low (low number of affected parties)	Average to high	High	High
	For Ce and La see raw material related measures below					
Vehicle components (Gd, Dy, Tb, Nd)	General measures regarding REE see below					
	Design for dismantling	Average in case of voluntary activity, high in case of new laws	Low to average	Low	Low	High
	Optimised information					
	Dismantling requirements	High (new law)	High			
Interface to WEEE legisl.	High (new law)	Low				
Photovoltaic-module (In) (no measures for Ga, Ge)	Treatment requirement	High (new law)	High			
Heat protection ceramics (Y)	Support of development of recycling technologies	Low	High (financial)	Low	Low	High
Polishing agent (Ce, La)	For La & Ce see raw material related measures below					
NiMH-batteries (Ce, La, Sm)	For La & Ce see raw material related measures below					
	Optimised information	No (already initialised)	Low	Average	Average	High
Treatment requirement	Average (within the development of the treatment ordinance of the ElektroG2))	Average				
MRT (Dy, Tb)	Optimised information	No	Low			
	Treatment requirement	Average (within the development of the treatment ordinance of the ElektroG2))	Average			

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

ReStra-EoL product (ReStra-target metal)	Measure	Efforts initialisation	Efforts performing	Effect mass	Effect env. (KEA*share)	Criticality EU (2014)
	General measures regarding REE see below					
X ray	Development of treatment and reclamation processes	Low	High (financial)	Average	Low	High
Wind power plant (Nd, Dy)	Interface ElektroG2	High (new law)	Low	Low		
	Treatment requirement	Average (within the development of the treatment ordinance of the ElektroG2))				
	General measures regarding REE see below					
E-bike (Nd, Dy, Tb)	Treatment requirement	Average (within the development of the treatment ordinance of the ElektroG2))	Average	High	High	High
	General measures regarding REE see below					
Hub dynamos (Nd, Pr)	Treatment requirement	High (new law)	Average	Low	Average	High
	General measures regarding REE see below					
Air conditioner (Nd, Dy)	Treatment requirement	Average (consideration within the development of the treatment ordinance of the ElektroG2))	Average	Low	Average	High
	General measures regarding REE see below					
Data processing centre	Treatment requirement	Average (within the development of the treatment ordinance of the ElektroG2))	Average	Low	Average	High
	General measures regarding REE see below					
Dual approach for appliances of REE Magnets	Different, mostly average to high			High	High	High
Raw material related measures for CE & La						Different
Legal framework						Different

Legend: Categories for mass share and environmental effect: low: up to 10 %, average: >10 % to 30 %, high: >30 %

The analysis of the legal framework conditions has revealed that interfaces between legal areas should be optimised or realised (example: interface between ELV legislation and WEEE legislation regarding treatment of electronic appliances in vehicles). In other areas concrete legal bases to optimise circularity of strategic raw materials are missing. The following table summarises the findings.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Table 7: Overview of proposals for the further development of the legal framework regarding the objective of the project ReStra

Product	ReStra target metal	Legal framework existing	Legal framework to be developed	Separate collection responsibilities existing	Separate collection responsibilities to be developed	Treatment requirements existing	Treatment requirements to be developed	Labelling/ information requirements existing	Labelling/ information requirements to be developed
Industrial catalysts	Ge, Pd, Pt, Rh, (Ce), La		Raw material ordinance		Commercial user		Shipment to reclamation, for La and Ce long term storage if needed		Information obligation producer → user
Vehicle catalysts	Pd, Pt, Rh, Ce, La	ELV ordinance		Last owner (shipment to dismantling company)		Separation and shipment to reclamation,	best practice transport and treatment		-
Automotive components	Gd, Tb, Dy	ELV ordinance		Last owner (shipment to dismantling company)			Separation of REE magnets, shipment to reclamation		Information obligation producer → waste management
Photovoltaic	In, Ga	ElektroG (WEEE law)		Last owner			Separation of REE magnets, shipment to reclamation		Label (PV-module)
Heat protection ceramics	Y		Raw material ordinance		User		Shipment to reclamation		Information obligation producer → user
NiMH-Batteries	SE (Ce, La, Nd, Pr)*	BattG (Battery law), ElektroG2 (WEEE law)		Last owner (collection system according to BattG), Waste management (separation from end of life product)		Separation from appliance in the framework of the ElektroG2	Shipment to Reclamation	Label	
Polishing agent	Ce, La				User		Shipment to reclamation or long term storage		Information obligation producer → user

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Product	ReStra target metal	Legal framework existing	Legal framework to be developed	Separate collection responsibilities existing	Separate collection responsibilities to be developed	Treatment requirements existing	Treatment requirements to be developed	Labelling/ information requirements existing	Labelling/ information requirements to be developed	
MRT	Nd, Pr, Dy, Tb, Gd	ElektroG (WEEE law)		Last owner, collection system according to ElektroG				Separation of REE magnets, shipment to reclamation		
X-ray		ElektroG (WEEE law)		Last owner, collection system according to ElektroG				Separation Gd-component, shipment to reclamation	Label (component)	
Wind power plant	Nd, Dy, Tb		Raw material ordinance		Owner (Destruction company)			Separation of REE magnets, shipment to reclamation		
e-bike		ElektroG (WEEE law)		Last owner, collection system according to ElektroG				Separation of REE magnets, shipment to reclamation		
Hub-dynamo			Raw material ordinance			Waste management			Separation of REE magnets, shipment to reclamation	Label component (hub dynamo)
Air conditioner		ElektroG (WEEE law)		Last owner, collection system according to ElektroG					Separation of REE magnets, shipment to reclamation	Label component (compressor)
Data processing centre	Pt, Pd, Au	ElektroG (WEEE law)		Last owner, collection system according to ElektroG		Partly		Separation of REE magnets, shipment to reclamation		

*The analysis has been performed for batteries for REE in general because a specific analysis per REE was not possible.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

In addition the instrument of “Best Available Techniques” in the framework of the Industrial Emission Directive⁴ is seen as an option to improve recycling of strategic raw materials.

⁴ Directive 2010/75/EU

3 Einleitung

Viele Produkte und Anlagen enthalten sogenannte strategische Metalle. Sie sind für die Funktion vieler moderner Produkte und Anlagen bzw. für die produzierende Wirtschaft von großer Bedeutung und unterliegen gleichzeitig einer Reihe von Versorgungsrisiken, die geologischer, technischer, struktureller, geopolitischer, sozioökonomischer und schließlich auch Risiken 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 recherchiert 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.

Der vorliegende Bericht identifiziert zunächst solche strategischen Metalle, die im Rahmen des Projektes ReStra vertieft untersucht wurden („ReStra-Zielmetalle“) (Kapitel 4). In einem zweiten Schritt wurden die mengenrelevantesten Produkte identifiziert, in denen die ReStra-Zielmetalle vor allem genutzt werden und die als Altprodukte das Potenzial für eine Kreislaufführung der ReStra-Zielmetalle darstellen (Kapitel 5). Die mit den Altprodukten verbundenen Stoffströme (Potenzial und Verluste) wurden anschließend quantifiziert und unter Einbeziehung der Ergebnisse von Hemmnisanalysen und Pfadabhängigkeiten optimierte Entsorgungsketten entworfen (Kapitel 6). In Abschluss wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet, um die dargestellten Potenziale für eine optimierte Kreislaufführung zu mobilisieren (Kapitel 7).

4 Identifikation der ReStra-Zielmetalle

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Arbeitspakets 1 „Bedarf an strategischen Metallen“ des Forschungsprojektes ReStra zusammen. Gegenstand des Arbeitspaktes 1 (AP 1) ist es, strategische Metalle insbesondere unter Beachtung ihrer Umweltrelevanz bei ihrer Herstellung und Verwendung zu identifizieren. Denn Ziel des Vorhabens ist es, Vorschläge für eine verbesserte Kreislaufführung strategischer Metalle zu entwickeln, um einerseits die Rohstoffverfügbarkeit speziell für grüne Zukunftstechnologien zu verbessern und andererseits natürliche Ressourcen zu schonen sowie Umweltentlastungseffekte durch die Substitution von Primärrohstoffen zu bewirken.

Die Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes bilden so die Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte.

4.1 Metallvorauswahl und Indikatoren zur Bewertung der Rohstoffverfügbarkeit

Es wurde mit dem UBA abgestimmt, dass eine möglichst weitgehende Parallelität mit dem Projekt „Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten“ (RePro) hergestellt wird (Umweltbundesamt, 2012).

4.1.1 Erweitertes Konzept der Rohstoffkritikalität

Für die Bestimmung der zu untersuchenden „strategischen“ Metalle wurde in beiden Vorhaben das Konzept der Rohstoffkritikalitätsmatrix angewendet, das sich in den letzten Jahren zur Bestimmung der Rohstoffverfügbarkeit etabliert hat (siehe z. B. Quellen der Tabelle 8). Nach diesem Konzept setzt sich die Kritikalität eines Rohstoffs, also die Unsicherheit über die Stabilität der gegenwärtigen oder zukünftigen Rohstoffversorgung, aus zwei Dimensionen zusammen:

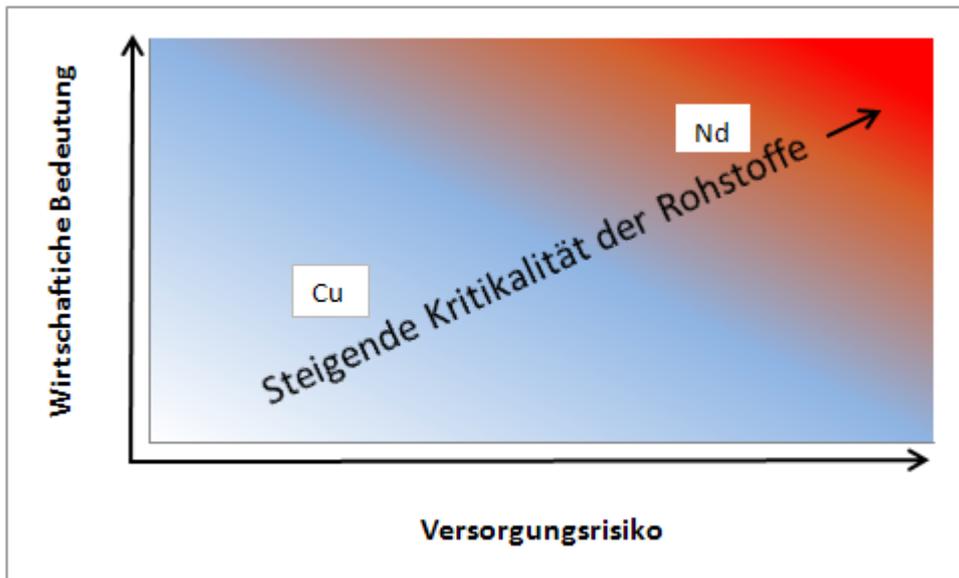
- der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffs und
- dem Versorgungsrisiko bzw. der Verfügbarkeit eines Rohstoffs.

Dabei ist die Dimension „wirtschaftliche Bedeutung“ immer abhängig vom spezifischen Untersuchungsrahmen. Das Rohstoff nachfragende System kann Länder/Regionen, einzelne Branchen oder Technologien umfassen. Das Ergebnis zur Rohstoffknappheit ist daher immer subjektiv.

Analog zur „Vulnerabilität“ in der Diskussion zur Klimaanpassung kann die Dimension „wirtschaftliche Bedeutung“ zur „Vulnerabilität“ erweitert werden, wenn die Anpassungskapazität des Rohstoff nachfragenden Systems in den Indikator einfließt (Gößling-Reisemann, 2012).

Je höher sein Versorgungsrisiko **und** je höher seine wirtschaftliche Bedeutung, umso kritischer wird die Versorgungslage des untersuchten Rohstoffs bewertet (siehe Abbildung 5). Aus der Abbildung wird auch deutlich, dass es keine scharfe Grenze zwischen „unkritisch“ zu „kritisch“ gibt, sondern dass es sich um einen kontinuierlichen Verlauf handelt: Die Kritikalität nimmt entlang der Winkelhalbierenden zu. Da sich die Werte der Indikatoren zeitlich ändern können, beispielsweise bei einer Erhöhung der Weltproduktion, stellt die Bewertung auch immer nur eine Momentaufnahme dar.

Abbildung 5: Die zwei Dimensionen der Kritikalität von Rohstoffen: wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko/Verfügbarkeit (nach Erdmann/Graedel 2011)



Die Kriterien zur Quantifizierung des Versorgungsrisikos und der wirtschaftlichen Bedeutung wurden auf Basis der in anderen Kritikalitätsstudien angewandten Kriterien an die spezielle Ausrichtung des jeweiligen Vorhabens angepasst. Die Metallauswahl der beiden Projekte „RePro“ und „ReStra“ unterscheidet sich wesentlich bei den Indikatoren der Dimension „Wirtschaftliche Bedeutung / Vulnerabilität“: Während RePro auf Metalle für Elektrogeräte (nach Elektro- und Elektronikgerätegesetz inkl. fest eingebaute Batterien) fokussiert, liegt der Schwerpunkt bei ReStra auf strategischen Metallen aus umweltpolitischer Sicht. Darunter werden hier solche Metalle verstanden, die eine hohe Bedeutung für so genannte grüne Zukunftstechnologien, d. h. Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial, haben und daher aus umweltpolitischer Sicht prioritär zurückgewonnen werden sollten (siehe Abschnitt 4.1.3). Zur Bestimmung des Versorgungsrisikos wurden in beiden Vorhaben neben gängigen technischen, geopolitischen und ökonomischen Kriterien auch umweltbezogene Kriterien angewandt, um den umweltentlastenden Effekt einer Substitution von Primärrohstoffen zielsicher zu erreichen (siehe Abschnitte 4.1.4.5 bis 4.1.4.8). Darüber hinaus hängt aus Sicht des Umweltbundesamtes die mittel- bis langfristige Verfügbarkeit eines Rohstoffs auch von den mit der Rohstoffgewinnung bzw. -bereitstellung verknüpften Umweltbelastungen und seiner Rezyklierbarkeit ab. Das zunehmende gesellschaftliche Interesse für die ökologischen und sozialen Risiken der Rohstoffgewinnung beeinflusst das Verhalten der Akteure auf den Rohstoffmärkten und somit auch die Verfügbarkeit von Rohstoffen, wenn z. B. durch zunehmende Regulierung (Dodd-Frank Act⁵) Investitionen in neue Minenprojekte mit größerer Unsicherheit verbunden sind. Eine Internalisierung der Kosten der negativen

⁵ Der „Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act“ ist ein US-Bundesgesetz, welches als Reaktion auf die Finanzmarktkrise von 2007 das Finanzmarktrecht der Vereinigten Staaten umfassend ändert. Im Artikel

Umwelt- und Sozialwirkungen hätte auch Einfluss auf die Bewertung der erschlossenen wirtschaftlich förderbaren Rohstoffmenge (Reserve).

4.1.2 Metallvorauswahl

Basis der Untersuchung sind die 12 vom Umweltbundesamt in der Ausschreibung vorgeschlagenen Metalle: Germanium, Gallium, Wolfram, Kobalt, Gold, Indium, Palladium, Silber, Mangan, Zinn, Zink und die Gruppe der Seltenen Erden (mit den 17 Metallen Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pm, Pr, Sc, Sm, Tb, Tm, Y und Yb).

Zu Beginn des AP 1 werden die Metalle ausgewählt, deren Kritikalität im Projektkontext untersucht werden soll. Dabei kann auf mehrere umfangreiche Studien zu kritischen Rohstoffen zurückgegriffen werden, die sich bezüglich ihrer untersuchten Materialien, ihrer Methodik, ihres geografischen Fokus, ihres Zeithorizontes u. a. unterscheiden. In einer aktuellen Veröffentlichung vergleichen Erdmann et Graedel (2011) insgesamt zehn derartige Studien, s. Tabelle im Anhang 1. Dabei wird deutlich, dass die Bewertung der Kritikalität subjektiv ist, abhängig von den angewandten Parametern und deren Gewichtung zueinander. Während beispielsweise in der Studie der nationalen Forschungsorganisationen der USA aus dem Jahre 2008 (NAP, 2010) die Rohstoffversorgungslage der gesamten Industrie mit dem geografischen Bezug auf die USA untersucht wird, hat die Studie des US Department of Energy (DOE, 2010) die Rohstoffverfügbarkeit für Energietechnologien weltweit im Fokus. Entsprechend unterschiedlich fallen die Ergebnisse aus, vergleiche Tabelle 1.

Tabelle 8: Beispielhafte Übersicht über kritische Rohstoffe aus verschiedenen Quellen

UK (2008) 69 Rohstoffe	USA (2008) 11 Rohstoffe	EU (2008) 41 Rohstoffe	USA (2010) 6 Rohstoffe	DE (2011) 13 Rohstoffe
„hohes Risiko“ Au, PGM (Pt, Rh), Hg, Sr, Ag, Sb, Sn	„besonders kritisch“ In, Mn, PGM (Pd, Pt, Rh), Seltene Erden, Nb	„kritisch“ Sb, Be, Co, Ge, Ga, In, Mg, PGM (Pt, Pd, Rh), Graphit, Ta, W, Seltene Erden, Nb, Flussspat	„Critical“ Short term: Dy, Nd, Tb, Eu, Y, In	„höchste Kritikalität“ Ge, Re, Sb
„geringeres Risiko“ Co, Nb, V, Cu	„weniger kritisch“ Li, Cu, Ti, Ga, Ta, V	Insgesamt 41 Roh- stoffe untersucht.	„Near Critical“: Ce, La, Te	„hohe Kritikalität“ Ag, Bi, Cr, Ga, In, Nb, Pd, SE, Sn, W
(RPA, 2008)	(NRC, 2008)	(EU, 2010)	(DOE, 2010)	(IZT/adelphi, 2011)

1502 dieser Verordnung wird der Erlass eines Gesetzes über Meldepflichten für so genannte Konfliktrohstoffe aus der DR Kongo und den angrenzenden Ländern angewiesen.

Die untersuchten Metalle hängen natürlich vom Untersuchungsrahmen ab. Die Vorauswahl der Metalle wird aber nicht in allen Studien nachvollziehbar dokumentiert.

Die Synopse von Erdmann et Graedel (2011) kommt zu dem Ergebnis, dass von den zehn untersuchten Studien vor allem Seltene Erden und Platingruppenmetalle als kritisch bewertet werden. Aber auch Wolfram, Niob und Indium werden häufig genannt. Andere Metalle wie z. B. Gold oder Platin werden in einigen Studien gar nicht untersucht, mit der Begründung, dass sie dem Einfluss von Finanzspekulationen in großem Maße ausgesetzt seien.

Die Auswahl der in AP 1 untersuchten 23 Metalle (bzw. 22 Metalle und die Gruppe der Seltenen Erden mit 17 Elementen) basiert auf den vom Umweltbundesamt vorgeschlagenen Metallen (siehe oben) und wurde um die in der Literatur als kritisch bewerteten Elemente auf Basis der Ergebnisse der Diskussion im Parallelprojekt „RePro“ ergänzt. Die untersuchten Metalle sind Antimon, Beryllium, Kobalt, Gallium, Germanium, Gold, Indium, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Palladium, Platin, Rhenium, Rhodium, die Gruppe der Seltenen Erden, Silber, Tantal, Titan, Wolfram, Zink und Zinn.

Im Folgenden werden die hier angelegten Kriterien und Bewertungsmaßstäbe zur Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos erläutert.

4.1.3 Indikatoren für die wirtschaftliche Bedeutung

Für die wirtschaftliche Bedeutung werden vier Indikatoren herangezogen, die den Systembezug auf grüne Zukunftstechnologien und die Rohstoffversorgungssituation der Bundesrepublik widerspiegeln, vergleiche Tabelle 2:

Tabelle 9: Verwendete Indikatoren für die Dimension „Wirtschaftliche Bedeutung“

Indikator	Erläuterung	Zeitliche Relevanz
Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Bedarf für „grüne Zukunftstechnologien“	Mittel- bis langfristig
Aktueller Verbrauch in Deutschland	Anteil Deutschlands am Weltverbrauch	Kurzfristig
Erwarteter globaler Nachfrageimpuls	Bedarf für neue Technologien	Mittel- bis langfristig
Substituierbarkeit	Substituierbarkeit auf Materialebene	Mittel- bis langfristig

Um diese Kriterien (nach einer Gewichtung, siehe Abschnitt 4.2) jeweils zu einem Gesamtwert für die wirtschaftliche Bedeutung summieren zu können, wurden die erhobenen Daten jeweils dimensionslos gemacht. Dazu wurden die Daten je nach ihrem Beitrag zur wirtschaftlichen Bedeutung in vier Abstufungen klassiert:

- 0,0 für keinen/ fast keinen Beitrag,
- 0,3 für einen geringen Beitrag,
- 0,7 für einen hohen Beitrag,
- 1,0 für einen sehr hohen Beitrag.

Für die Bewertungsmaßstäbe wurde, soweit verfügbar, auf bereits anderweitig in der Literatur genutzte Maßstäbe zurückgegriffen, insbesondere auf (IZT, adelphi, 2011).

Im Folgenden werden die Kriterien und die Bewertungsmaßstäbe erläutert.

4.1.3.1 Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial

Unter Zukunftstechnologien werden industriell verwertbare technische Fertigkeiten verstanden, die revolutionäre Innovationsschübe weit über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren hinaus auslösen, wie z. B. die Elektromobilität (Angerer et al., 2009; Elsner et al., 2010). Der Indikator „Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial“ gibt für jeden untersuchten Rohstoff an, wie hoch der erwartete Bedarf für „grüne“ Zukunftstechnologien ist. Darunter werden hier solche Zukunftstechnologien verstanden, deren Bereitstellung zwar einerseits temporär einen erheblichen Mehraufwand an natürlichen Ressourcen in Form von Metallrohstoffen erfordert, die andererseits aber das Potenzial haben, natürliche Ressourcen zu schonen bzw. die Umwelt zu entlasten.

Zur Entwicklung des Indikators „Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial“ wurde eine Liste mit über 92 Technologien erstellt und mit Auftraggebern und Projektpartnern abgestimmt. Bei der Durchsicht zeigte sich aber, dass die Liste unübersichtlich ist, sodass evtl. fehlende Technologien nicht leicht zu erkennen sind und Dopplungen aufgrund unterschiedlicher Gliederungsebenen vorliegen. Daher wurde die Liste bis auf die Komponentenebene bzw. die kleinste, nicht weiter zu untergliedernde Ebene, aufgeschlüsselt. In einer Telefonkonferenz mit Vertretern des UBA, BMU, ISI und Ökopool wurden den Technologien Umweltentlastungspotenziale zugeordnet. Dabei wurden noch Technologien aus der Liste entfernt bzw. Technologien zusammengefasst, sodass am Ende die im Anhang dargestellte Liste mit 68 Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial verblieb (vgl. Anhang).

Folgende Zukunftstechnologien aus (ISI/IZT 2009) wurden bezüglich ihres Umweltentlastungspotenzials diskutiert, aber nicht in die Liste aufgenommen:

1. Katalytischer Kraftstoffzusatz: Cer als Kraftstoffadditiv zur integrierten katalytischen NO_x-Reduktion. Bei dieser Technologie ist unklar, welche langfristigen Folgen die dissipative Verbreitung von Cer auf die Umwelt hat.
2. Mikroelektronische Kondensatoren mit Ta und Nb bzw. MLCC (multi layer ceramic capacitor = Keramikvielschicht-Chipkondensatoren) mit Ag, Pd, Ni, Ti und Ba. Obwohl die Mikroelektronik einen Beitrag zur Materialeffizienz leistet, stellt sich die Frage, ob sich im Bereich der Consumer-Elektronik nicht Reboundeffekte durch Einführung immer neuer Gerätegenerationen einstellen bzw. die Metalle nicht zurückgewonnen werden.
3. Elektrische Kontaktierung mikroelektronischer Bauteile durch bleifreie Lote, die Sn, Ag, Cu und Bi enthalten, Direktmontage durch Bumping (Kontaktierelement in „Hügel“-Form) von ungehausten Halbleitern mit Au oder Ni sowie Kontakte aus Re und Ag.
4. Abbau mariner Lagerstätten: Der verstärkte Abbau mariner Lagerstätten ist zukünftig sehr wahrscheinlich, doch sind die Umweltrisiken nicht absehbar.
5. Recyclinggerechtes Design von Produkten: hat natürlich ein Umweltentlastungspotenzial, lässt sich aber als grundsätzliches Verfahren nicht einzelnen Rohstoffen zuordnen.
6. Kompaktleuchtstofflampen mit W-Elektroden und Seltenen Erden als Leuchtmittel stellen einerseits keine Zukunftstechnologie mehr da und sind andererseits nicht so effizient wie andere Leuchtmittel, beispielsweise LED.

7. Trichromatische Fluoreszenzlampen, die zur Verbesserung der Farbwiedergabe RGB-Leuchtstoffmischungen aus beispielsweise La, Ce, Tb, Ba und Gd enthalten, sind ebenfalls nicht so effizient wie andere Leuchtmittel.
8. Wellenkraftwerke benötigen zwar korrosionsfeste, aber keine besonderen Werkstoffe.
9. Wärmepumpen und Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung stellen keine Zukunftstechnologien da.
10. Feinstaubabscheider für Kleinfeuerungsanlagen als nachrüstbare Naturzug-Filtersysteme sind keine Zukunftstechnologien, sondern schon am Markt verbreitet.
11. Wärmerückgewinnung aus Abwässern wird in der Industrie teilweise schon durchgeführt und sollte auch für geringere Temperaturdifferenzen anwendbar sein, benötigt aber keine besonderen Materialien.
12. Kreislaufschließung von Aquakulturen: Der nachhaltige Betrieb von Aquakulturen ist eine der zukünftigen Herausforderungen der Nahrungsmittelproduktion, benötigt aber nicht notwendigerweise Metalle.

Im folgenden Arbeitsschritt wurde die Tabelle nach Metallen „aufgelöst“, die in den jeweiligen Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial eingesetzt werden. Als Zusatzinformation bzw. für Folgeprojekte und der Vollständigkeit halber sind auch Metalle in der Tabelle enthalten, die von der Untersuchung ausgeschlossen wurden, wie beispielsweise Aluminium oder Arsen. Die „aufgelöste“ Tabelle zeigt beispielsweise, dass Neodym in Komponenten wie Permanentmagneten in mehreren Technologien wie Windkraftanlagen oder elektrischen Traktionsmotoren für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt wird (vgl. Anhang). Die Bedeutung der Rohstoffe für mögliche Umweltentlastungen kann in erster Näherung über den zukünftigen Markt der Technologie, dem spezifischen Rohstoffbedarf, dem zukünftigen Recyclingpotenzial und dem Umweltentlastungspotenzial abgeschätzt werden: D. h., je größer der Markt, je höher der Rohstoffbedarf, je geringer das Recyclingpotenzial und je höher das Umweltentlastungspotenzial, umso größer die Bedeutung des betrachteten Rohstoffs für Umweltentlastungen durch Technologie.

Am Beispiel von Silber ist in Tabelle 3 dargestellt, wie die Berechnung einer Kennzahl erfolgt, die den Beitrag dieses Metalls für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial widerspiegelt. Die Kennzahl setzt sich zu je 25 % aus den Teilindikatoren Markt 2030, Rohstoffbedarf 2030, Recyclingpotenzial 2030 und Umweltentlastungspotenzial zusammen. Die Teilindikatoren werden über die in der Tabelle angegebenen Faktoren berechnet. Beispielsweise wird für die Anwendung „Silber in RFID Tags“ für den Markt 2030 eine Sättigung angenommen, entsprechend geht der „Markt 2030“ mit dem Faktor 1 zu 25 %, also mit 0,25 in die Kennzahl ein. Hinzu kommen 25 % von 0,3 (0,075) für den Rohstoffbedarf 2030, 0,25 für das Recyclingpotenzial und 0,125 für das Umweltentlastungspotenzial. Die Kennzahl beträgt somit 0,7. Um einen Gesamtwert für Silber zu erhalten, wird der Mittelwert aller Technologie-Kennzahlen berechnet; er beträgt für Silber 0,48. Silber hat nach diesem Berechnungsverfahren also eine mittlere Bedeutung für technologieinduzierte Umweltentlastungen.

4.1.3.2 Aktueller Verbrauch in Deutschland

Der aktuelle Verbrauch in Deutschland wird analog zur IZT/adelphi Studie als Anteil Deutschlands am Weltverbrauch für 2008 erfasst (IZT/adelphi, 2011). Dieser Wert signalisiert die Bedeutung eines Rohstoffs für die Industrie in Deutschland. Der Weltverbrauch an Primärrohstoffen

kann mithilfe der Primärproduktion angenähert werden. In diesem Indikator werden alle Handelsformen der Metalle erfasst, die direkt von Deutschland importiert werden, d. h. Erze, Erzkonzentrate, Schrotte und Halbzeuge. Sie gehen jeweils mit ihrem Metallgehalt in den Indikator ein. Der Rohstoffverbrauch in Deutschland findet jedoch vielfach indirekt auf verschiedenen höheren Wertschöpfungsstufen statt, wie z. B. in importierten Maschinen, Bauteilen, Fertigwaren. Da für die Metallgehalte dieser Importwaren aber keine einheitlichen Daten vorliegen bzw. eine Abschätzung dieser indirekten Rohstoffimporte auf Metallebene den Rahmen dieses Vorhabens sprengen würde, wurden sie hier nicht weiter berücksichtigt.

Der Indikator kann folgende Werte annehmen:

- 1 für einen Anteil Deutschlands am Weltverbrauch (2008) von $\geq 10\%$,
- 0,7 für einen Anteil Deutschlands am Weltverbrauch (2008) zwischen $< 10\%$ und $\geq 5\%$,
- 0,3 für einen Anteil Deutschlands am Weltverbrauch (2008) zwischen $< 5\%$ und $\geq 1\%$ und
- 0 für einen Anteil Deutschlands am Weltverbrauch (2008) von $< 1\%$.

Tabelle 10: Berechnung der Bedeutung von Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzialen, welche Silber verwenden

Bewertungs- bereich	Faktor- bestimmung	An- tenne; RFID Tags	OLED	Halb- leiter; Thermo- elekt- rische Ener- gie- wand- lung	Elektro- den; Farb- stoffso- larzel- len	Elekt- roden; Varis- toren zur Über- span- nungs- ablei- tung	Spie- gel; Solar- ther- mische Kraft- werke	Wärmere- flexion AgCl; Sensi- tive schalt- bare Gläser
Markt 2030	Einführung Faktor: 0			X				
	Nutzung Faktor: 0,5		X		X		X	X
	Sättigung Faktor: 1	X				X		
Rohstoff- bedarf 2030	unkritisch Faktor: 0		X		X	X		
	intensiv Faktor: 0,3	X		X			X	
	sensitiv Faktor: 0,7			X				X
	sehr sensitiv Faktor: 1							
Recycling- potenzial 2030	Ja Faktor: 0		X				X	
	Eingeschränkt Faktor: 0,5			X	X	X		X
	Nein Faktor: 1	X						
	Nein, dissipa- tiv Faktor: 1							
Um- weltent- lastungs- potenzial	Mittel-groß Faktor: 0,5	X		X	X	X	X	X
	Sehr groß Faktor: 1							
	Polit. Zielvor- gabe Faktor: 1		X					
Ergebnis		0,7	0,375	0,5	0,375	0,5	0,325	0,55

Anmerkung: Die Gewichtung der Bereiche Markt 2030, Rohstoffbedarf 2030, Recyclingpotenzial 2030 und Umweltentlastungspotenzial liegt bei jeweils 25 %.

4.1.3.3 Erwarteter globaler Nachfrageimpuls

Während es beim Indikator „Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial“ darum geht, vor allem die Metalle zu berücksichtigen, die für eine „Green Economy“ von besonderer Bedeutung sind, dient dieser Indikator dazu, einen allgemeinen zukünftigen Nachfrageimpuls für die Metalle zu antizipieren, der aufgrund zukünftig höherer Nachfrage durch neue Technologien besteht. Dieser Indikator ist einerseits ein Maß für die wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffs, spiegelt aber gleichzeitig ein marktbezogenes Versorgungsrisiko wieder. Daher sind beide Indikatoren notwendig.

Dabei gibt es zum Teil Überschneidungen, da beispielsweise gerade Energietechnologien häufig einen hohen Nachfrageimpuls für die Metalle erzeugen, die zu ihrem Bau notwendig sind und andererseits ein hohes Umweltentlastungspotenzial haben.

Von den global anwendbaren Technologien wird erwartet, dass ihr Marktwachstum viel schneller ist, als das allgemeine Wirtschaftswachstum. Nach IZT/adelphi (2011) werden folgende dimensionslosen Klassen gebildet:

- 1 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) von ≥ 200 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (sehr sensitiv),
- 0,7 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) zwischen < 200 % und ≥ 100 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (sensitiv),
- 0,3 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) zwischen < 100 % und ≥ 50 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (intensiv) und
- 0 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) von < 50 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (unkritisch).

4.1.3.4 Substituierbarkeit

Die Substituierbarkeit gibt an, inwieweit das Metall als Werkstoff durch andere Stoffe substituiert werden kann. Hierzu wird, wie in der Literatur beschrieben (IZT/adelphi, 2011; EU 2010), die Substituierbarkeit für die wesentlichen Rohstoffanwendungen in vier Klassen geschätzt, für die jeweils ein numerischer Wert vergeben wird:

- 1 für fehlende Substituierbarkeit,
- 0,7 für Substituierbarkeit zu hohen Kosten und/oder mit Funktionalitätsverlust,
- 0,3 für Substituierbarkeit zu geringen Kosten und
- 0 für leichte und vollständige Substituierbarkeit ohne zusätzliche Kosten.

Diese Werte werden über alle Anwendungen gemittelt und geben einen allgemeinen Wert für die Substituierbarkeit des Metalls.

Die Einzelergebnisse für die wirtschaftliche Bedeutung sind im Anhang dargestellt.

4.1.4 Indikatoren für das Versorgungsrisiko / die Verfügbarkeit

Wie hoch das Risiko für einen Versorgungsausfall eines Rohstoffs ist, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Hierzu gehören

- geopolitische Risiken, z. B. die Konzentration der Förderung auf wenige Länder oder die politische Stabilität der Förderländer,
- Marktrisiken, wie die Konzentration der Produktion auf wenige Unternehmen oder geökonomische Aspekte wie das Verhältnis von globalen Reserven zu globaler Produktion (statische Reichweite) sowie
- Strukturrisiken, wie der Anteil der Gewinnung als Nebenprodukt.

Aber auch umweltbezogene Aspekte haben einen Einfluss auf die Verfügbarkeit eines Rohstoffs (siehe 4.1.1). Hierzu zählen:

- die Umweltbelastungen bei der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sowie
- die Möglichkeit einer Rückgewinnung der Rohstoffe.

Folgende Indikatoren wurden für die Bestimmung des Versorgungsrisikos bzw. der Verfügbarkeit ausgewählt:

Tabelle 11: Verwendete Indikatoren für die Dimension „Versorgungsrisiko / die Verfügbarkeit“

Indikator	Erläuterung	Zeitliche Relevanz
Länderkonzentration der Reserven	Betrachtung der Reserven in den drei Ländern mit den größten Reserven	Mittel- bis langfristig
Länderrisiko globale Produktion	Governance Indikatoren für die drei globalen Hauptproduktionsländer	Kurzfristig
Firmenkonzentration der globalen Produktion	Betrachtung der drei Unternehmen mit den größten Produktionsanteilen	Kurzfristig
Anteil der Nebenproduktion	Abhängigkeit als Koppelprodukt vom Hauptprodukt	Mittel- bis langfristig
Recyclingfähigkeit	Grundsätzliche Möglichkeit einer physikalisch-chemischen Rückgewinnung	Mittel- bis langfristig
Recyclingquote	Heutiges End-of-life Recycling	Kurzfristig

Um diese Kriterien (nach einer Gewichtung, siehe Abschnitt 4.2) jeweils zu einem Gesamtwert für das Versorgungsrisiko summieren zu können, wurden die erhobenen Daten jeweils dimensionslos gemacht und analog zur Vorgehensweise bei der Dimension „wirtschaftliche Bedeutung“ nach ihrem Beitrag zur zum Versorgungsrisiko in vier Abstufungen klassiert:

- 0,0 für keinen/ fast keinen Beitrag,
- 0,3 für einen geringen Beitrag,
- 0,7 für einen hohen Beitrag,
- 1,0 für einen sehr hohen Beitrag.

4.1.4.1 Länderkonzentration der Reserven

Die Werte für den Indikator Länderkonzentration der Reserven wurden direkt aus der IZT/adelphi Studie (2011) genommen und für Gold und Rhodium ergänzt (USGS, 2012). Es wird dabei die Konzentration der Reserven in den drei Ländern mit den größten Reserven addiert und zu den Gesamtreserven ins Verhältnis gesetzt. Einer maximalen Länderkonzentration entspricht der Wert 1, eine minimale Länderkonzentration tendiert gegen 0. So ergibt sich beispielsweise für Germanium ein Wert von 0,46, da sich 18,6 % der weltweiten Reserven in den USA, 16,5 % in China und 10,5 % in Australien befinden (IZT/adelphi, 2011).

4.1.4.2 Länderrisiko globale Produktion

Für eine störungsfreie Rohstoffproduktion sind auch die Regierungsführung und die strategische Rohstoffpolitik der Länder von Interesse, in denen die Produktion stattfindet. Große Produktionsländer können die Versorgungssituation zahlreicher Empfängerländer, so auch Deutschlands, beeinflussen.

Es werden die Daten von IZT/adelphi (2011) genutzt, bei denen die Produktionsanteile der drei globalen Hauptproduktionsländer zugrunde gelegt wurden und mit den Risikofaktoren Worldwide Governance Indikator der Weltbank (WGI, 2012) (im Hinblick auf den Einfluss der operativen Regierungsführung auf die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung) und eventuellen Exportrestriktionen (OECD) gleichwertig gewichtet und zu einem Gesamtrisiko mit Werten zwischen 0 (minimales Risiko) und 1 (maximales Risiko) addiert wurden.

4.1.4.3 Firmenkonzentration der globalen Produktion

Sie gibt einen Hinweis darauf, inwieweit Mono- oder Oligopole möglicherweise das Rohstoffangebot und die Rohstoffpreise beeinflussen können. Es wurden die Produktionsanteile der drei Unternehmen mit den größten Produktionsanteilen addiert. Es werden die Daten der IZT/adelphi Studie genutzt (2011). Die Daten für Gold und Rhodium wurden ergänzt. Einer maximalen Unternehmenskonzentration entspricht der Wert 1, einer minimalen Unternehmenskonzentration ein Wert, der gegen 0 tendiert.

4.1.4.4 Anteil der Nebenproduktion

Die Produktion vieler Metalle, die als Nebenprodukte gewonnen werden, hängt von der Nachfrage nach den jeweiligen Hauptprodukten ab. Wächst die Nachfrage nach Nebenprodukten dauerhaft stärker als nach dem Hauptprodukt, so steigt der Preis für das Nebenprodukt, weil das Angebot an Nebenprodukten nicht entsprechend ausgeweitet werden kann. Aufgrund dieser Abhängigkeit besitzen Rohstoffe, die ausschließlich als Nebenprodukte anderer Rohstoffe gewonnen werden, im Allgemeinen ein höheres Versorgungsrisiko.

Der Indikator nach IZT/adelphi (2011) gibt an, zu welchen Anteilen ein Rohstoff im globalen Maßstab als Haupt- oder Nebenprodukt gewonnen wird. Der Indikator kann folgende Werte annehmen:

- 1 für ausschließliche Nebenproduktion,
- 0,7 für überwiegende Nebenproduktion,
- 0,3 für überwiegende Hauptproduktion und
- 0 für ausschließliche Hauptproduktion.

So wird beispielsweise Gallium nur als Nebenprodukt der Aluminium- und Zinkproduktion hergestellt und erhält den Wert 1, vergleiche Anhang 6.

4.1.4.5 Umweltrelevanz

Für die Umweltrelevanz der Rohstoffbereitstellung wird der Kumulierte Energieaufwand (KEA), von der Entnahme des Rohstoffs bis zur Bereitstellung in Deutschland als Annäherung verwendet. Giegrich et al. (2012) konnten durch Analyse der Korrelationen von Indikatoren von Umweltwirkungskategorien mit der inputseitigen Ressourceninanspruchnahme (Energie, Rohstoffe, Wasser, Fläche) zeigen, dass für die Umweltbelastung in erster Näherung der kumulierte Energieaufwand (KEA) repräsentativ ist. Ausgehend von den bei Giegrich et al. (2012) gefundenen spezifischen KEA für die Metalle (in MJ/kg) wurde für jedes Metall über die Weltproduktion der absolute kumulierte Energieaufwand (TJ/a) berechnet, um die teilweise um mehrere Größenordnungen abweichenden Fördermengen der einzelnen Metalle zu berücksichtigen. Die Ergebnisse wurden wie folgt klassifiziert:

- 1 für > 500.000 TJ/a,
- 0,7 für ≥ 100.000 bis 500.000 TJ/a,
- 0,3 für ≥ 10.000 bis 100.000 TJ/a,
- 0 für < 10.000 TJ/a.

Für Antimon, Beryllium, Germanium, Seltene Erden, Niob und Rhenium konnten keine Daten für den kumulierten Energieaufwand ermittelt werden. Hier wurden KEA-Werte von anderen Metallen übernommen:

- KEA von Antimon \approx KEA von Kupfer, weil auch Antimon wie Kupfer vor allem aus sulfidischen Lagerstätten gefördert wird, deshalb einem Röstungsprozess unterworfen werden muss und reineres, 99,9%iges Sb durch elektrolytische Raffination wie beim Kupfer erhalten wird (Römpp, 2012).
- KEA von Beryllium \approx KEA von Gold, weil Beryllium auch über komplizierte Aufschlussverfahren gewonnen wird. Die Be-Minerale werden über komplexe Fluoride oder über Sulfate aufgeschlossen und hieraus $\text{Be}(\text{OH})_2$ hergestellt, die dann nach Überführung in BeCl_2 bzw. BeF_2 durch Elektrolyse oder Reduktion mit Magnesium in reines Beryllium umgesetzt werden (Römpp, 2012).
- KEA von Germanium \approx KEA von Kupfer, da Germanium als Nebenprodukt bei der Kupfergewinnung anfällt, daneben aber auch bei der Gewinnung anderer Metalle (Zink, Blei). Ein weiterer Energieaufwand zur Gewinnung von sehr reinem Germanium für die Elektronik durch Zonenschmelzen wird hier nicht betrachtet.

- KEA von Seltenen Erden: In einer worst-case-Betrachtung wird angenommen, dass der KEA der Seltenen Erden so groß wie von Silber ist. Dieecoinvent Daten im Kapitel Chemikalien (Althaus et al., 2007) nennen Werte für Seltene Erden Konzentrate von 19,3 MJ/kg (für ein 70%iges Seltene Erden Konzentrat) bis 1010 MJ/kg (für ein 94%iges Samarium, Europium, Gadolinium Konzentrat).
- KEA von Niob \approx KEA von Tantal, da Niob mit Tantal vergesellschaftet in Lagerstätten vorkommt. Die Aufarbeitung der Tantalerze erfolgt durch Aufschluss auf nasschemischem Weg mit Flusssäure, mit Hilfe von Salzschmelzen oder durch Chlorierung. Zur Trennung des Tantals von Niob wird überwiegend die Flüssig-Flüssig-Extraktion mit 4-Methylpentan-2-on oder die Destillation der Pentachloride eingesetzt und mit Tantal zusammen hergestellt (Römpp, 2012; Lassner et al., 2009).
- KEA von Rhenium \approx KEA von Molybdän, da die Weltproduktion an Re (46 t im Jahr 2010) aus den Röstgasen der Molybdän- bzw. Kupfer-Röstung bestritten wird.

4.1.4.6 Recyclingfähigkeit

Ein sehr wichtiges Kriterium für die **Recyclingfähigkeit** eines Materials ist die Frage, ob sein Einsatz stückig erfolgt oder dissipativ, wie z. B. bei Nanosilber oder Lithium in Pharmazeutika.

Die Klassifizierung der Recyclingfähigkeit eines Rohstoffs in einer Anwendung kann folgende Werte annehmen, wobei hohe Recyclingfähigkeiten niedrigen Kennzahlen zugeordnet werden, da das Versorgungsrisiko mit zunehmender Recyclingfähigkeit abnimmt:

- 1 für physikalisch-chemisch nahezu unmögliches Recycling,
- 0,7 für Recycling möglich zu hohen Kosten und/oder bei Qualitätsverlust,
- 0,3 für Recycling möglich zu geringen Kosten und
- 0 für Metalle, bei denen bereits derzeit in Deutschland aufgrund ökonomischer Treiber und bestehender Technologien ein Recycling erfolgt.

In Anlehnung an die Substituierbarkeit, siehe oben, erfolgt in IZT/adelphi (2011) die Berechnung, indem die Anteile eines Rohstoffs in seinen wesentlichen Verwendungen mit spezifischen Faktoren für die Recyclingfähigkeit gewichtet werden. Beispielsweise wird Antimon zu 71 % in Flammenschutzmitteln eingesetzt, aus welchen derzeit kein Recycling von Antimon erfolgt. Es wäre aber möglich, besonders flammhemmend ausgerüstete Geräteteile wie etwa Fernsehgehäuse oder EDV, die Antimon im Prozentbereich enthalten, vorzusortieren und Antimon partiell zurück zu gewinnen. Der Wert für diese technisch mögliche, aber mit hohen Kosten verbundene Recyclingfähigkeit wird in der von IZT/adelphi (2011) verwendeten Tabelle mit 0,7 angegeben (Erdmann, 2012). Weitere fünf Prozent des Antimons werden in Gläsern eingesetzt. Aus diesen ist es nahezu unmöglich, Antimon zurückzugewinnen (Kennzahl der Recyclingfähigkeit = 1). Unter den weiteren Anwendungen sind Legierungsmetalle, aus denen Antimon zu geringen Kosten recycelt werden kann (Faktor 0,3). Die resultierenden Werte werden gewichtet und zu einem Gesamtwert für die Recyclingfähigkeit gemittelt.

4.1.4.7 Recyclingquote

Als Vergleichswert zum zukunftsorientierten Indikator Recyclingfähigkeit, der ein Potenzial angibt, wird auch die derzeitige **Recyclingquote** mit in die Bewertung einbezogen. So wird berück-

sichtigt, dass einige Metalle trotz einer hohen Recyclingfähigkeit derzeit nicht bzw. nur in geringem Umfang zurückgewonnen werden. Die entsprechenden Hemmnisse sollen in AP 4 identifiziert und Maßnahmen zur Hebung der Potenziale genannt werden.

Für die Recyclingquote werden Werte der UNEP (2011) verwendet und wie folgt klassifiziert:

- 1 für End of life Recycling < 1 %,
- 0,7 für End of life Recycling ≥ 1 und < 10 %,
- 0,3 für End of life Recycling ≥ 10 und < 50 %,
- 1 für End of life Recycling ≥ 50 %.

Auch hier gilt, dass eine hohe Recyclingquote eine niedrige Kennzahl bedeutet, da das Versorgungsrisiko bei einem hohen Recyclinggrad geringer ist.

4.1.4.8 Umweltrisiko

Der Indikator Umweltrisiko wurde beim Kick-off Treffen des Projektes besprochen und sollte die Trends von Umweltbelastungen und das Umweltrisikopotenzial beim Bergbau, bspw. durch abnehmende Erzgehalte wiedergeben. Es zeigte sich aber, dass die Quantifizierung des Umweltrisikos methodisch schwierig und sehr aufwendig ist, sodass es den Aufwand dieses Arbeitspaketes sprengen würde. Auch ist die Datenlage teilweise sehr schlecht. Daher geht das Umweltrisiko nicht in die Gesamtbewertung mit ein. Die im Rahmen der Recherche erhobenen Daten sind in Anhang 4 zusammengefasst.

4.2 Gewichtung

Die Gewichtung der Kriterien innerhalb der beiden Dimensionen „Wirtschaftliche Bedeutung“ und „Versorgungsrisiko“ erfolgte in Anlehnung an vorliegende Studien und wurde in den Diskussionen mit dem Umweltbundesamt angepasst, vergleiche Tabelle 12 und

Tabelle 13. Die dargestellte Gewichtung ist, wie jede Gewichtung, nicht generalisierbar, sondern das Ergebnis eines Abstimmungsprozesses zwischen den Akteuren im Projekt, die auch individuelle Festlegungen einbringen, die nicht wissenschaftlich begründbar sind.

Tabelle 12: Zusammenfassung des Ergebnisses zur Gewichtung der Auswahlkriterien – Teil 1: Wirtschaftliche Bedeutung

Wirtschaftliche Bedeutung	Gewichtung
Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	25 %
Aktueller Verbrauch in Deutschland	25 %
Erwarteter globaler Nachfrageimpuls	25 %
Substituierbarkeit	25 %

Tabelle 13: Zusammenfassung des Ergebnisses zur Gewichtung der Auswahlkriterien – Teil 2: Versorgungsrisiko

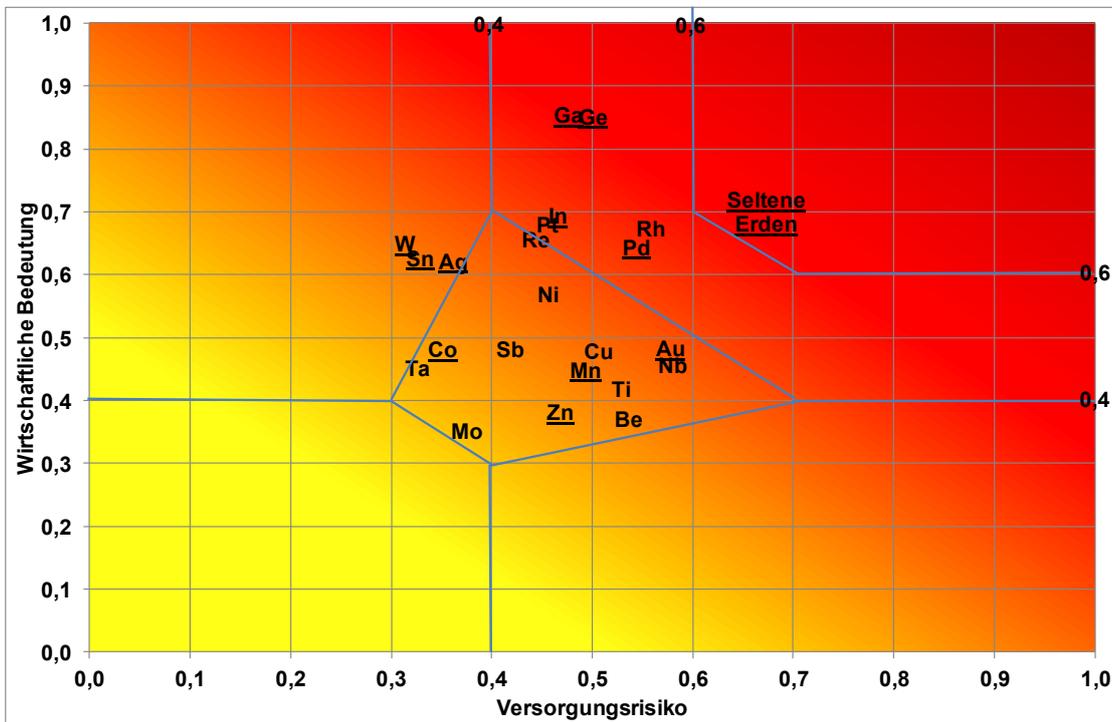
Versorgungsrisiko	Gewichtung
Länderkonzentration Reserven	15 %
Länderrisiko Produktion	10 %
Firmenkonzentration	10 %
Haupt-/Nebenprodukt	15 %
Umweltrelevanz (KEA)	30 %
Recyclingfähigkeit	15 %
Recyclingquote	5 %

Die Gewichtung beim Versorgungsrisiko erfolgt wie beim Forschungsvorhaben RePro. Kernpunkt der Überlegungen war dabei die These, dass sich die Werte von einigen Indikatoren wie z. B. „Länderkonzentration Reserven“ oder „Haupt-/Nebenproduktion“ in längeren Zeiträumen (> 5 Jahre) weniger verändern werden als die von anderen Indikatoren (z. B. „Firmenkonzentration“), vergleiche auch Tabellen 2 und 4. Indikatoren, deren Werte sich erwartungsgemäß in längeren Zeiträumen weniger ändern werden, sind besser geeignet, zu einer Prognose herangezogen zu werden und wurden hier stärker gewichtet, um dem prognostischen Ansatz der Studie gerecht zu werden: Ziel von ReStra ist es, durch Handlungsempfehlungen mittel- bis langfristig ressourcen-effiziente Recyclinginfrastrukturen für strategische Metalle zu etablieren.

Für die wirtschaftliche Bedeutung wurde in der Projektbesprechung am 22. März 2012 eine Gleichgewichtung aller vier Indikatoren vereinbart. Die Indikatoren „Aktueller Verbrauch in Deutschland“, „Erwarteter globaler Nachfrageimpuls“ und „Substituierbarkeit“ wurden auch im IZT/adelphi Projekt (2012) verwendet. Der Indikator „Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial“ wurde, wie unter Kapitel 4.1.3.1 beschrieben, im Rahmen dieser Studie entwickelt.

4.3 Ergebnisse

Abbildung 6: Ergebnis der Ermittlung von wirtschaftlicher Bedeutung und des Versorgungsrisikos für 23 Metalle



Als Ergebnis der Bewertung sind in Abbildung 6 die wirtschaftliche Bedeutung und das Versorgungsrisiko der 22 Metalle und der Gruppe der Seltenen Erden aus der Metallliste dargestellt. In der Abbildung sind Linien bei jeweils 0,4 und 0,6 für die wirtschaftliche Bedeutung und das Versorgungsrisiko eingezeichnet, um die verschiedenen Zonen unterschiedlicher Kritikalität in Clustern darzustellen. Diese Darstellung von Zonen erhöht die Übersichtlichkeit und trägt dem Umstand Rechnung, dass es keine speziellen Schwellenwerte oder „Quadranten“ gibt, ab oder in denen das Versorgungsrisiko für Stoffe kritisch sind. Je weiter rechts die Metalle angeordnet sind, desto höher ist das Versorgungsrisiko bzw. je weiter oben, desto größer die wirtschaftliche Bedeutung.

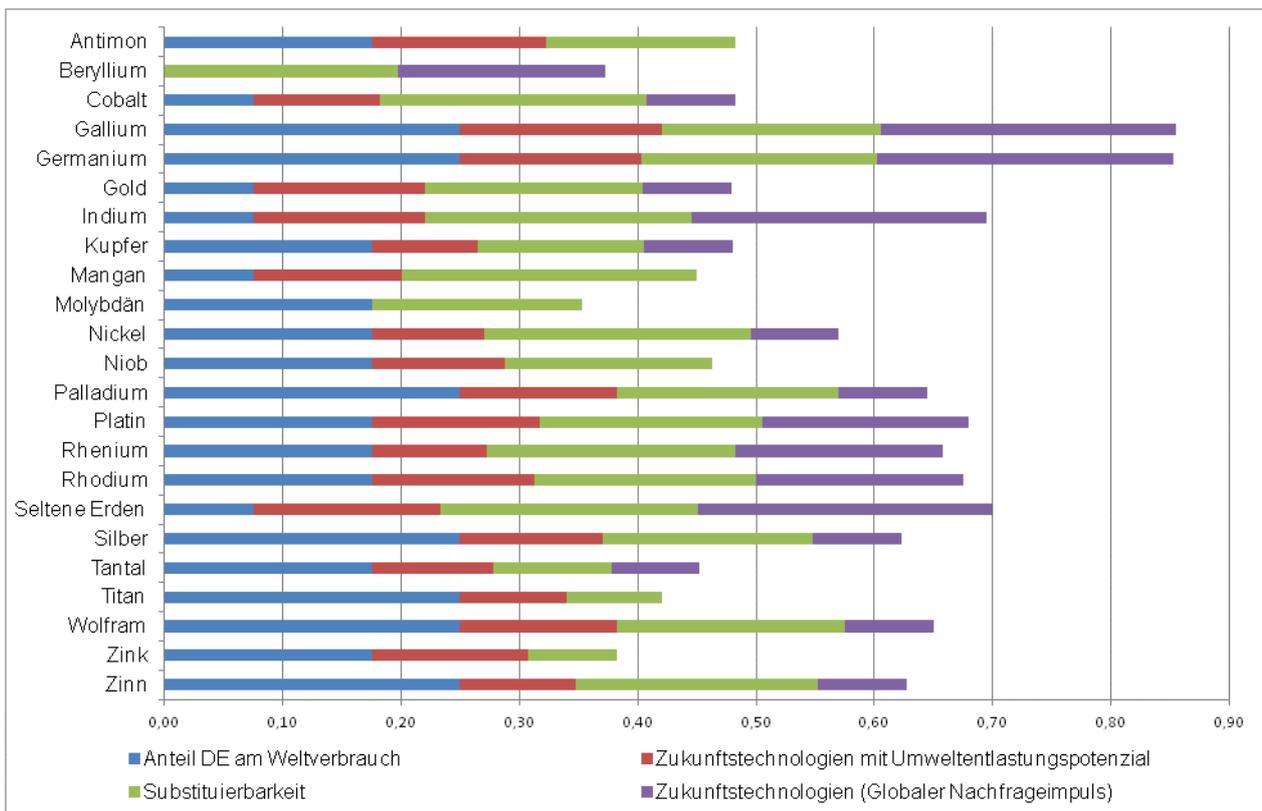
Es wird deutlich, dass die Gruppe der Seltenen Erden die höchste Kritikalität aufweist. In einer Zone hoher Kritikalität liegen Gallium, Germanium, Indium sowie die Platingruppenmetalle (PGM) Rhodium, Palladium und Platin.

Bis auf Wolfram, Zinn und Silber, liegen alle Metalle der Vorauswahl in einem Bereich mittlerer Kritikalität.

4.3.1 Berechnung der Ergebnisgrößen

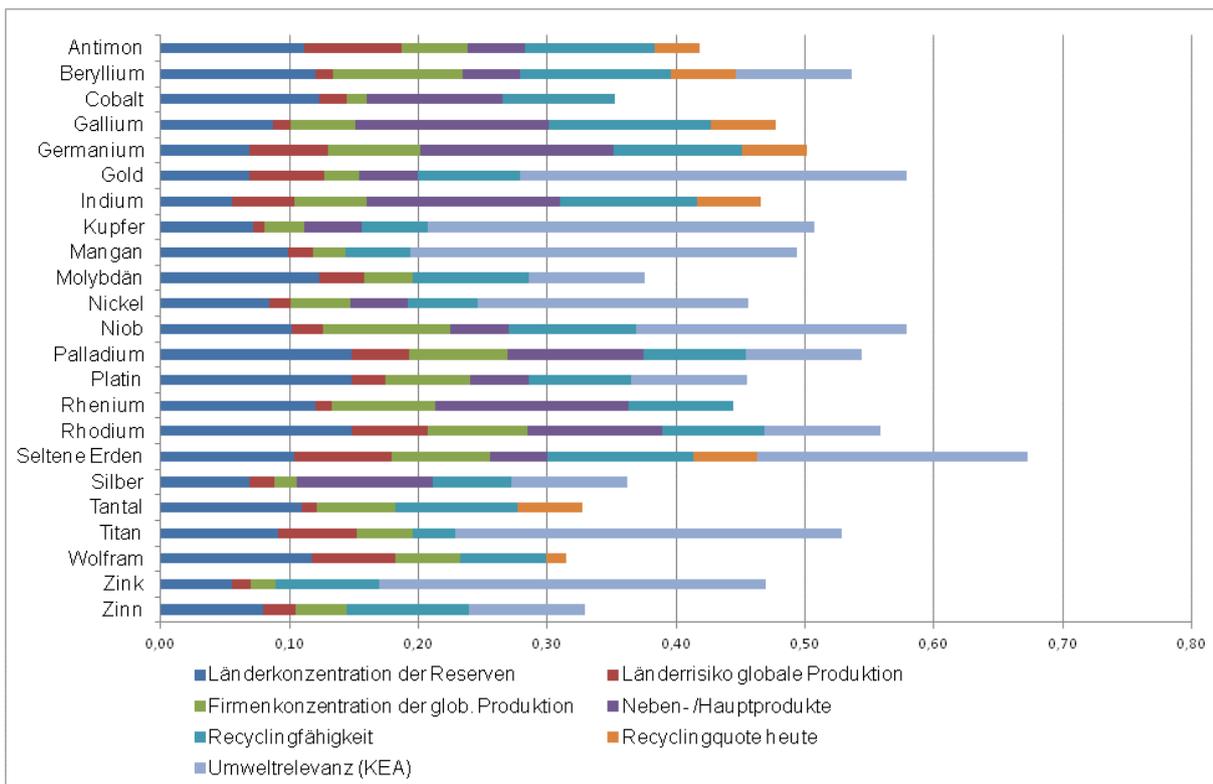
Für die ausgewählten Metalle in Kapitel 4.1.2 wurden die Daten der Kriterien zur wirtschaftlichen Bedeutung (Kapitel 4.1.3) und zum Versorgungsrisiko (4.1.4) ermittelt und, wie oben beschrieben, in dimensionslose Kennzahlen umgerechnet. Die Kennzahlen wurden entsprechend Kapitel 4.2 gewichtet und zu den Ergebnisgrößen für wirtschaftliche Bedeutung (siehe Abbildung 7 und Tabelle im Anhang 9.2) und Versorgungsrisiko (siehe Abbildung 8 und Anhang 9.3) summiert.

Abbildung 7: Zusammensetzung der Ergebnisgrößen zur wirtschaftlichen Bedeutung



Die vier Kriterien für die wirtschaftliche Bedeutung können prinzipiell Werte von 0 bis 1 annehmen und, entsprechend ihrer Gewichtung mit 25 %, mit einem Beitrag von 0 bis 0,25 in die Ergebnisgröße eingehen. Tatsächlich lässt sich keines der betrachteten Metalle vollständig substituieren, weshalb alle einen Wert > 0 und einen grünen Anteil im Balken in Abbildung 7 haben. Mangan lässt sich in keiner Anwendung substituieren und hat als Wert 1 (und geht mit 0,25 in die Ergebnisgröße ein), vergleiche die Tabelle in Anhang 5. Wie die „Substituierbarkeit“ sind auch die Werte des Indikators „Zukunftstechnologien mit Umweltbelastungspotenzial“ berechnet, den höchsten Wert erreicht dabei Gallium mit 0,7 (bzw. 0,2 in der Ergebnisgröße). Bei den skalierten Indikatoren „Anteil Deutschlands am Weltverbrauch“ und „Zukunftstechnologien (Globaler Nachfrageimpuls)“ wird bei 7 Metallen bzw. 4 Metallen der maximale Wert 1 erreicht (mit einem Anteil von Deutschland am Weltverbrauch $\geq 10\%$ bzw. einem globalen Nachfrageimpuls > 200 % für 2030). Metalle wie Gallium oder Germanium, die bei den letztgenannten Indikatoren die maximalen und bei den anderen beiden Kriterien hohe Werte erreichen, haben insgesamt hohe Ergebnisgrößen, vergleiche Abbildung 7

Abbildung 8: Zusammensetzung der Ergebnisgrößen zum Versorgungsrisiko



Zum Versorgungsrisiko trägt bei vielen Metallen besonders der Indikator „Umweltrelevanz“ bei, der mit 30 % gewichtet wird und dadurch mit einem Faktor von bis zu 0,3 in die Ergebnisgröße eingehen kann. 0,3 wird bei Gold, Kupfer, Mangan, Titan und Zink erreicht, vergleiche Abbildung 8. Die drei Indikatoren zu Konzentrationen haben zusammen eine Gewichtung von 35 %; für die Summe dieser drei Indikatoren ergibt sich als größter Beitrag für die Ergebnisgröße 0,28 für Rhodium, 0,27 für Palladium und 0,26 für die Seltenen Erden. Die Seltenen Erden haben den zweithöchsten Beitrag von 0,11 für die „Recyclingfähigkeit“ (Wert von 0,75) nach Gallium mit 0,13 (Wert 0,84, vergleiche die Tabelle in Anhang 9.3). Bei den Indikatoren „Recyclingquote“ und „Neben-/Hauptprodukte“ sind die Werte bei einzelnen Metallen gleich Null.

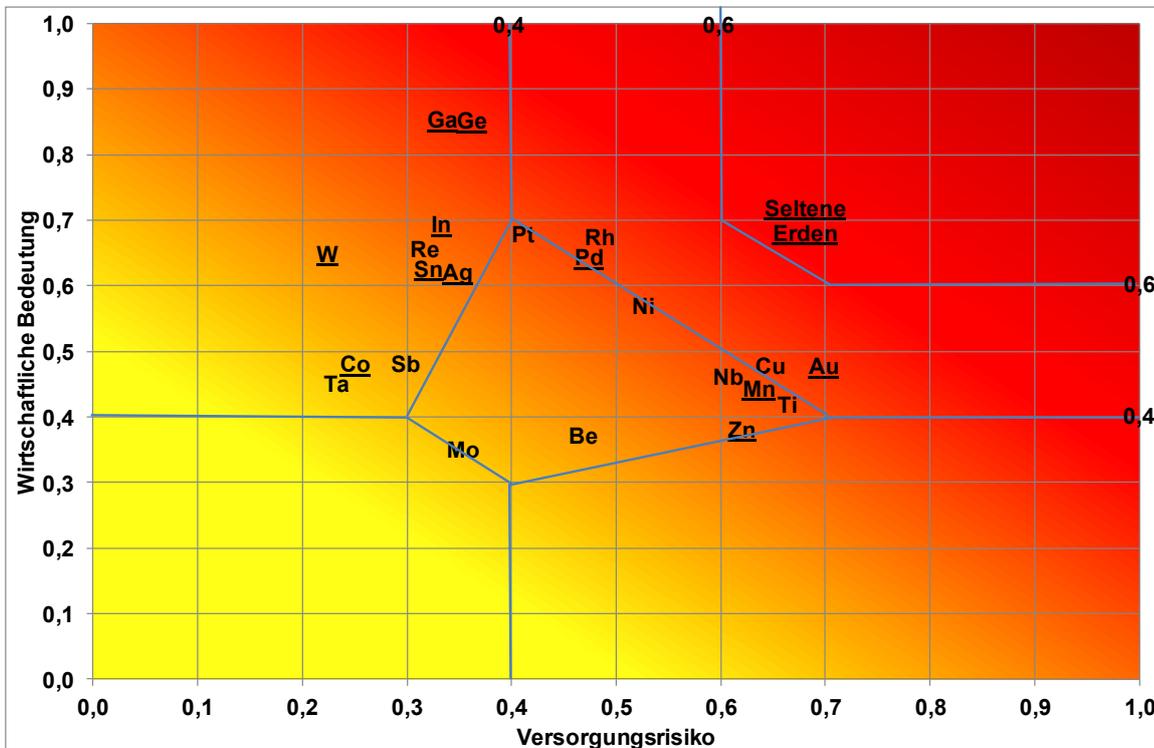
4.3.2 Sensitivitätsanalyse

Es wurden zwei Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um abzuschätzen, welchen Einfluss die beiden im Projektkontext neu entwickelten Indikatoren „Umweltrelevanz“ und „Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial“ auf das Ergebnis der Kritikalitätsanalyse haben, bzw. wie stabil das Ergebnis insgesamt ist.

In einer ersten Sensitivitätsanalyse wurde innerhalb der Dimension Versorgungsrisiko die Umweltrelevanz stärker gewichtet (50 % statt 30 %, die restlichen Indikatoren entsprechend zusammen mit 50 % statt mit 70 %). Auf diesem Wege wurde Rohstoffen mit einer sehr umweltrelevanten Primärgewinnung (v. a. Gold, Kupfer, Mangan, Titan, Zink) ein höheres Versorgungsrisiko beigemessen. Andererseits berechnen sich für Rohstoffe mit einem niedrigen gesamten kumulierten Energieaufwand (aufgrund einer niedrigen Produktionsmenge oder eines geringen spezifischen Energieaufwands) geringere Versorgungsrisiken, beispielsweise für Wolfram, Tantal, Kobalt, Antimon, Rhenium und Zinn. Es resultiert eine Verschiebung zu kleineren und höheren Wer-

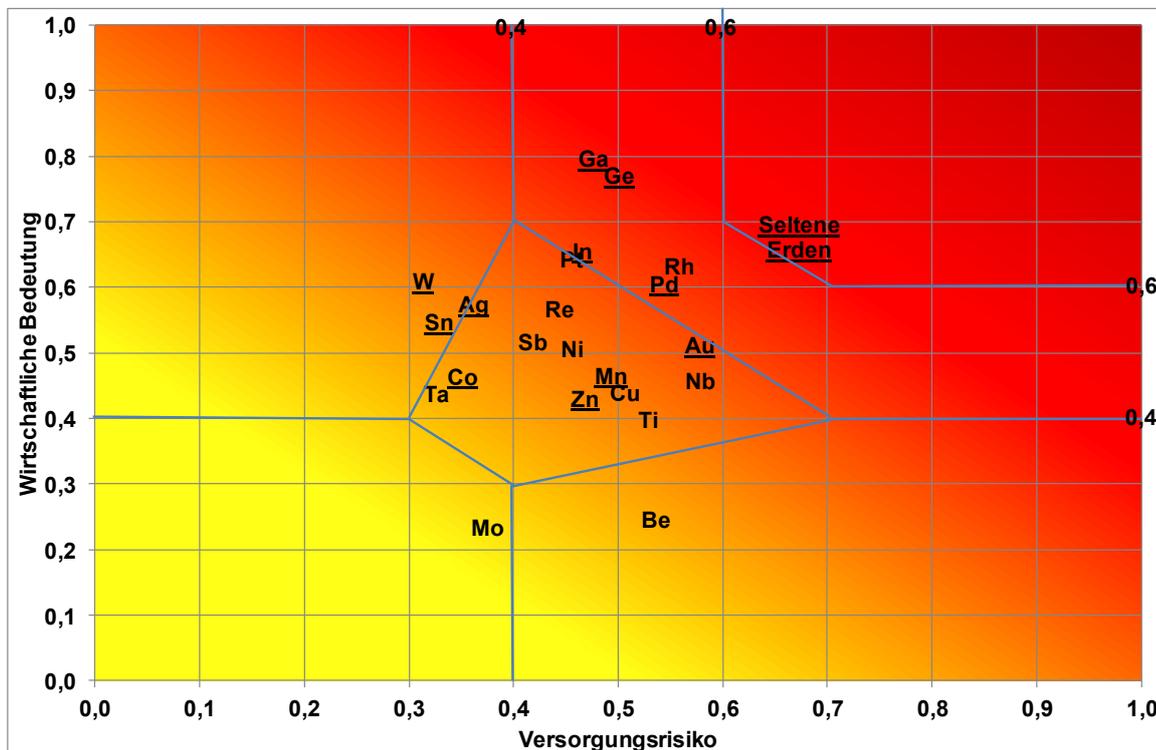
ten für das Versorgungsrisiko, sodass sich im Bereich mittlerer Kritikalität weniger Rohstoffe befinden, vergleiche Abbildung 9. In der Zone höchster Kritikalität verbleiben die Seltenen Erden und in der Zone hoher Kritikalität die Metalle Rhodium und Palladium.

Abbildung 9: Veränderung des Versorgungsrisikos bei einer Gewichtung der Umweltrelevanz von 50 Prozent



In einer zweiten Sensitivitätsanalyse wurde innerhalb der Dimension Wirtschaftliche Bedeutung der Indikator Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial mit 50 % statt mit 30 % gewichtet. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Seltenen Erden bleiben am kritischsten. In der Zone hoher Kritikalität verbleiben die Metalle Gallium, Germanium, Indium, Rhodium und Palladium; ihre wirtschaftliche Bedeutung ist aber gegenüber der Basisbewertung etwas reduziert. Platin rutscht in den Grenzbereich zur mittleren Kritikalität, während Gold aufgrund einer erhöhten wirtschaftlichen Bedeutung aus der mittleren Kritikalität zum Grenzbereich der hohen Kritikalität hin aufsteigt. Molybdän und Beryllium werden kaum für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial eingesetzt; daher rutschen sie aus dem Bereich mittlerer Kritikalität in den Bereichen eines geringen Versorgungsrisikos.

Abbildung 10: Veränderung der Wirtschaftlichen Bedeutung bei einer Gewichtung des Rohstoffeinsatzes in Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial von 50 Prozent



4.3.3 Fazit der Kritikalitätsanalyse

Wird die Umweltrelevanz der Rohstoffbereitstellung höher gewichtet, verschiebt sich das Bild dahingehend, dass Platin, Indium, Gallium und Germanium den Bereich hoher Kritikalität verlassen, während Kupfer und Gold in den Bereich hoher Kritikalität übertreten (vgl. Abbildung 9). Es fällt weiter auf, dass eine Reihe von Metallen aus dem Bereich mittlerer Kritikalität in den Bereich mit einem geringen Versorgungsrisiko übergehen. Dies betrifft Antimon, Rhenium, Kobalt, Tantal und Indium. Bei diesen Metallen liegt der kumulierte Energieaufwand unter 10.000 TJ, sodass die dimensionslose Kennzahl für den KEA gleich 0 wird, d. h. die Dimension Versorgungsrisiko besteht mit der Gewichtung der Umweltrelevanz auf 50 % zur Hälfte aus dem Wert 0, zusätzlich gehen die anderen Indikatoren nur noch zu 50 % (statt zu 70 % wie im Basisfall) in die Dimension Versorgungsrisiko ein, sodass hohe Werte in den anderen Indikatoren das Endergebnis weniger bestimmen.

Die Sensitivitätsanalyse für den Indikator „Bedeutung für Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial“ ergibt eine Verschiebung von Platin und Indium in den Grenzbereich zur mittleren Kritikalität. Gleichzeitig bewegt sich Gold aus dem Bereich der mittleren Kritikalität in den Grenzbereich zur hohen Kritikalität, vergleiche Abbildung 10.

Bei den Seltenen Erden ist zu beachten, dass sie als Gruppe untersucht worden sind und deshalb mit ihrer gesamten Produktionsmenge in die Berechnung des Versorgungsrisikos eingehen. Ein Schwerpunkt sollte bei den folgenden Arbeitsschritten auf den schweren Seltenen Erden (Y, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb und Lu) liegen, da in vielen Lagerstätten außerhalb Chinas hauptsächlich leichte Seltene Erden vorhanden sind (Roskill, 2011; Elsner, 2011;). Mittelfristig besteht

bei den schweren Seltenen Erden weiter ein Versorgungsrisiko, da die Volksrepublik China Exporteinschränkungen für diese Metalle eingeführt hat und der Bedarf die gewinnbare Menge voraussichtlich deutlich übersteigen wird (Hatch, 2011; Kingsnorth, 2012).

4.4 Auswahl der Metalle für die weitere Untersuchung

Aus der Diskussion der Ergebnisse ergibt sich die Auswahl der strategischen Metalle, die im weiteren Verlauf des Projektes näher untersucht werden sollen. Dies sind die Metalle, die sich im Basisfall in der Zone höchster oder hoher Kritikalität befinden: Seltene Erden, Gallium, Germanium, Indium und die Platingruppenelemente Platin, Palladium und Rhodium.

Da Gold bei der Gewinnung eine hohe Umweltrelevanz durch die Toxizität der verwendeten Chemikalien wie Quecksilber oder Cyanide aufweist (Blacksmith, 2011), wurde es in den Untersuchungsrahmen mit aufgenommen. Somit ergeben sich als Metalle für die weitere Untersuchung, vergleiche Tabelle 6.

Tabelle 14: Ergebnistabelle zur Berechnung des Versorgungsrisikos (rot markierte Metalle = vom UBA zur Prüfung benannt)

Auswahl	Metalle	Bemerkung
Ausgewählte Metalle der ursprünglichen UBA-Liste	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)
Ausgewählte weitere Metalle	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
Nicht ausgewählte Metalle der UBA-Liste	Wolfram	Zone geringer Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen
	Kobalt	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse, in einer Analyse in der Zone geringer Kritikalität
	Silber	Zone geringer Kritikalität im Basisfall und in einer der beiden Sensitivitätsanalysen, in einer Analyse mittlere Kritikalität
	Mangan	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen
	Zinn	Zone geringer Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen
	Zink	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen
Nicht ausgewählte weitere Metalle	Kupfer	Zone hoher Kritikalität in einer Sensitivitätsanalyse, aber hohe EOL Recyclingquote und Versorgungslage nach Literatur unkritisch (vergl. Angerer et al, 2010)
	Antimon	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse, in einer Analyse in der Zone geringer Kritikalität
	Beryllium	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse, in einer Analyse in der Zone geringer Kritikalität
	Molybdän	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse, in einer Analyse in der Zone geringer Kritikalität
	Nickel	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen
	Niob	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen
	Rhenium	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse, in einer Analyse in der Zone geringer Kritikalität
	Tantal	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in einer Sensitivitätsanalyse, in einer Analyse in der Zone geringer Kritikalität
	Titan	Zone mittlerer Kritikalität im Basisfall und in beiden Sensitivitätsanalysen

Die Abbildung 11 stellt die Elemente zusammenfassend im Kontext des Periodensystems dar.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Abbildung 11: Analyisierte strategische Metalle im Projekt ReStra

1																	2				
H																	He				
Hydrogen																	Helium				
3	4															5	6	7	8	9	10
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Lithium	Beryllium															Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen	Fluorine	Neon
11	12															13	14	15	16	17	18
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
Sodium	Magnesium															Aluminium	Silicon	Phosphorous	Sulfur	Chlorine	Argon
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Potassium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdenum	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silver	Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium	Iodine	Xenon				
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86				
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Caesium	Barium		Hafnium	Tantalum	Tungsten	Rhenium	Osmium	Iridium	Platinum	Gold	Mercury	Thallium	Lead	Bismuth	Polonium	Astatine	Radon				
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118				
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo				
Francium	Radium		Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Mitnerium	Darmstadtium	Roentgenium	Ununbium	Ununtrium	Ununquadium	Ununpentium	Ununhexium	Ununseptium	Ununoctium				
Lanthanoids		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71						
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
		Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium					
Actinoids		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103					
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	Np	Lr					
		Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Amaricum	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium					

5 Ermittlung von Recycling- und Substitutionspotenzialen

Das Kapitel „Ermittlung von Recycling- und Substitutionspotenzialen strategischer Metalle in bestimmten Abfällen“ hat zum Gegenstand, die in Deutschland aus bestimmten Produkten als Abfall anfallenden Mengen strategischer Metalle zu bestimmen.

Dies beinhaltet zum einen ein (prospektives) produktspezifisches Vorgehen, indem ausgehend von ausgewählten Produkten die aus diesen Produkten im Jahre 2020 als Abfall zu erwartende Menge strategischer Metalle bestimmt wird. Die Produktauswahl erfolgt anhand der in Kapitel 4 „Identifikation der ReStra-Zielmetalle“ festgelegten Materialliste. Zum anderen erfolgt eine Bestimmung der aufgrund der Metallauswahl besonders relevanten Abfallarten. Die diesbezüglichen Untersuchungen richten sich nicht auf die Zukunft, sondern beschreiben die aktuelle Situation.

Das Ergebnis des folgenden Kapitels zur Untersuchung von Recycling und Substitutionspotenzialen ist dementsprechend zweigeteilt. Zum einen liegt eine Liste mit (heute) besonders relevanten Abfallarten vor. Zum anderen erfolgt eine Quantifizierung der Mengen strategischer Metalle, die aus verschiedenen Produkten im Jahr 2020 als Abfall zu erwarten sind.

5.1 Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen lässt sich entsprechend den beiden eingangs erwähnten Ansätzen, der Analyse auf Produktebene und der Betrachtung von Abfallarten, untergliedern. Das Vorgehen im Detail wird im Folgenden dargestellt.

5.1.1 Analyse auf Produktebene

Die Analyse der Mengen strategischer Metalle, die aus Produkten⁶ im Jahr 2020 potenziell als Abfall anfallen, erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren. In einem ersten Schritt erfolgte basierend auf der Auswahl von ReStra-Zielmetallen und der Anwendungsfelder dieser Metalle eine Auswahl relevanter Produktgruppen. 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 die Untersuchung der Frachten strategischer Metalle in 2020.

5.1.1.1 Produktgruppenidentifizierung

Auf Basis der Ergebnisse der Metallauswahl wurden für jedes Metall die potenziell relevanten Produktgruppen identifiziert. Das schrittweise Vorgehen stellt sich im Einzelnen wie folgt dar:

1. Identifizierung relevanter Produktgruppen

Für jedes Metall wurden die relevanten Anwendungsfelder im Sinne der prozentualen Verteilung des globalen Metalleinsatzes identifiziert. Die Anwendungsfelder wurden bei Bedarf so

⁶ Produkte im Sinne dieser Studie sind auch Business-to-Business Produkte (bspw. Industriekatalysatoren), medizinische Geräte (bspw. MRTs oder Röntgengeräte) und Einrichtungen der Infrastruktur (bspw. Glasfaserkabel).

weit zerlegt, dass sie durch Produktgruppen repräsentiert werden⁷. Hier wurden in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit die Anwendungsfelder der Metalle über mehrere Jahre betrachtet, um eventuelle jährliche Schwankungen zu berücksichtigen.

2. Anwendung von Ausschlusskriterien

Auf die identifizierten Produktgruppen bzw. Anwendungsfelder wurden Ausschlusskriterien angewandt, die bestimmte Produktgruppen von der weiteren Betrachtung ausschließen. Ausgeschlossen wurden zum einen Produktgruppen, die keinen „klassischen“ Lebenszyklus zeigen, d. h. Produkte, die entweder kein klassisches end-of-life-treatment oder eine reine Bestandsbildung (bspw. Platin in Schmuck, Einsatz von Edelmetallen als Investitionsgut) aufweisen. Zum anderen wurden Produktgruppen von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, die in dem UBA-Forschungsvorhaben RePro (FKZ 3711 95 318) betrachtet wurden.

3. Berücksichtigung der zukünftigen Relevanz

Für die identifizierten Anwendungsfelder erfolgte eine Betrachtung möglicher zukünftiger (globaler) Nachfrageimpulse. Hintergrund ist, dass aufgrund des Zeithorizonts (Stichjahr: 2020) Anwendungen, die heute noch keine besondere Mengenrelevanz aufweisen, bis zum Jahr 2020 eine höhere Relevanz erhalten könnten und sich hieraus nennenswerte Mengen strategischer Metalle im Abfall ergeben können. Primär ist dies für Produkte mit kurzen Lebenszyklen (< 8 Jahre) von Relevanz, deren Absatz gegenüber heute noch wächst.

4. Anwendung eines Abschneidekriteriums

Produktgruppen bzw. Anwendungsfelder, die weniger als 5 % des globalen Verbrauchs des jeweiligen Metalls ausmachen, wurden in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt, insgesamt sollten die Produktgruppen aber 95 % des Metalleinsatzes - abzüglich der ausgeschlossenen Kategorien (siehe Schritt 2) - abdecken.

5. Diskussion mit Umweltbundesamt

Die auf diese Weise identifizierte Produktgruppenauswahl wurde mit dem Auftraggeber abgestimmt.

6. Ergänzung um gesetzte Produktgruppen

Die Produktgruppenauswahl wurde um die gesetzten Produktgruppen (PKW, Batterien), die sich aus der Leistungsbeschreibung des Auftraggebers ergaben, ergänzt, sofern diese nicht ohnehin Ergebnis des Vorgehens sind.

Das methodische Vorgehen zur Identifizierung der Produktgruppen bringt gewisse Einschränkungen bezüglich der Interpretierbarkeit der Ergebnisse mit sich. Zunächst einmal beruht die Auswahl der Produktgruppen auf den derzeit bekannten Anwendungsfeldern der ausgewählten Metalle und verfügbaren Zahlen über den Bedarf an Metallen in diesen Anwendungsfeldern. Auch wenn zukünftige Nachfrageimpulse berücksichtigt wurden, besteht immer noch die Gefahr, dass sich die Anteile einiger Anwendungsfelder durch eine hohe Marktdynamik verschoben haben und zu Beginn der Analyse oberhalb (oder auch unterhalb) des Abschneidekriteriums von 5 % liegen. Zusammengefasst ergeben sich hieraus Unsicherheiten bei den fas das Jahr 2020

⁷ Bspw. im Gegensatz zu Wirtschaftssektoren oder Technologiezweigen, die eine höhere Aggregationsebene darstellen.

abgeschätzten Metallmengen. Durch die Berücksichtigung von zu erwartenden Nachfrageimpulsen dürften die Metallströme bis 2020 eher überschätzt als unterschätzt werden. Für die Zeit nach 2020 gilt aber vermutlich eher das Gegenteil, sodass die Ergebnisse keinesfalls einfach über 2020 hinaus als korrekt angesehen werden dürfen. Da Empfehlungen für beispielsweise Infrastrukturaufbau, gesetzliche Regelungen oder Produktgestaltungen eine durchaus längere zeitliche Reichweite haben, sollte diese Unsicherheit angemessen berücksichtigt werden.

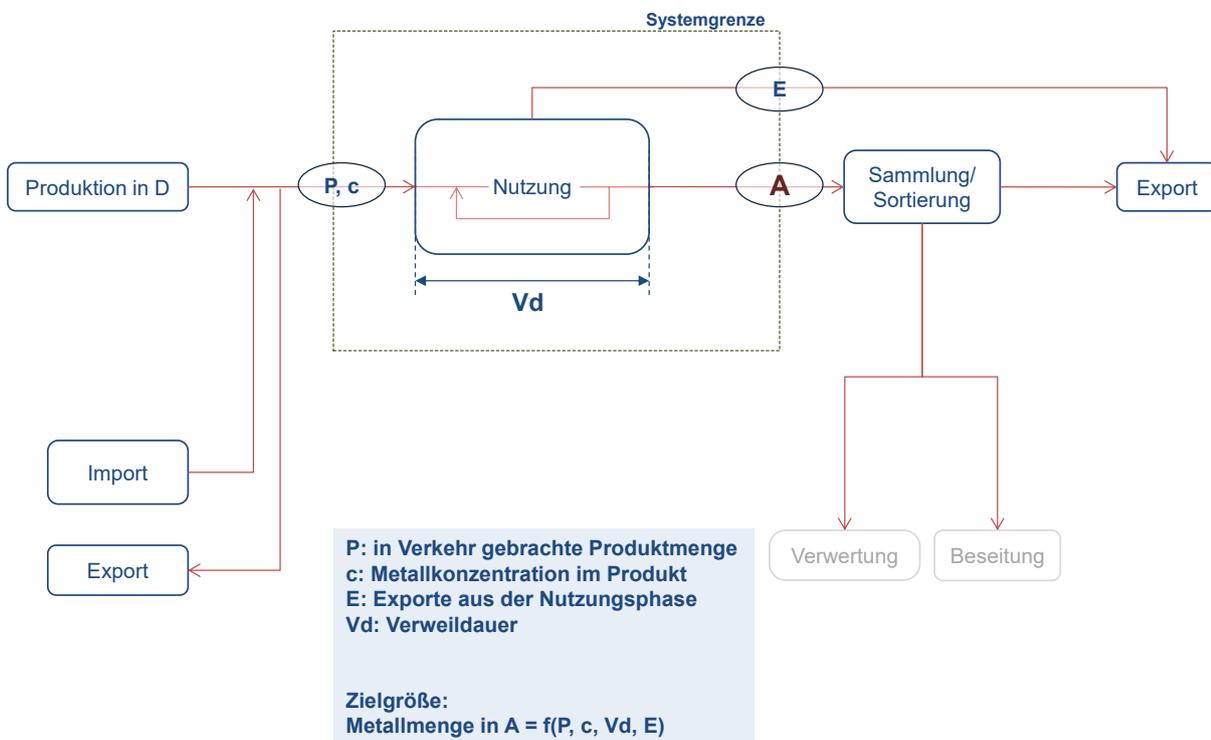
5.1.1.2 Zerlegung in Produkte

Jede im vorherigen Schritt für die weitere Analyse identifizierte Produktgruppe PG_i wurde in einzelne Produkte P_{ij} zerlegt, die in der weiteren Analyse betrachtet wurden. Hierbei waren nur Produkte zu berücksichtigen, die Gehalte der betrachteten Metalle aufweisen. Die identifizierten Produkte wurden soweit möglich in eine Rangfolge (nach Mengenrelevanz strategischer Metalle) gebracht, in der sie analysiert wurden. Diese Zuweisung geschah auf Basis von Expertenmeinungen und Literaturangaben zur Frage nach der zu erwartenden Metallmenge aus diesem Produkt im Bezugsjahr 2020.

5.1.1.3 Analyse der Produkte

Die in 2020 potenziell in Deutschland als Abfall anfallenden Mengen an ReStra-Zielmetallen wurden für die im vorherigen Schritt identifizierten Produkte ermittelt, indem die historisch in Verkehr gebrachten Mengen mit den jeweiligen Verweildauern (bzw. deren Verteilungskurven) multipliziert und um die aus der Nutzungsphase direkt exportierten Mengen korrigiert wurden (vgl. Abbildung 12).

Abbildung 12: Relevante Parameter der Produktanalyse



Wo dies angebracht war, wurden die anfallenden Metallmengen um dissipative Verluste während der Nutzungsphase berichtigt. Benötigt wurden also zunächst 4 Parameter (bzw. deren Zeitreihen) für jedes Produkt PG_i , sowie bei Bedarf ein weiterer Parameter dV , der die dissipativen Verluste in der Nutzungsphase beschreibt:

1. **In Verkehr gebrachte Mengen (P)** in den Jahren vor 2020 (möglichst Zeitreihen oder genügend Stützstellen für Interpolation). Zeitreihen müssen bis zu einem weiter unten spezifizierten Jahr X zurückreichen.
2. **Verweildauern der Produkte in der Nutzungsphase (Vd)** (inkl. Hortung und Zweitverwendung beim Endnutzer; typischerweise Weibull-verteilt). Prinzipiell sind auch die Verweildauern dynamisch. Zum einen werden hier aber Zeitreihen selten berichtet, zum anderen ist der Einfluss eventueller dynamischer Verweildauern in Bezug zur Berechnung der Materialmengen in 2020 als gering einzuschätzen.
3. **Konzentrationen der betroffenen strategischen Metalle in den Produkten (c)**, möglichst inkl. Spannbreite oder Standardabweichung. Je nach Produkt können auch die Metallkonzentrationen im Produkt dynamisch sein. Wo entsprechende Daten vorlagen, wurden sie verwendet; ansonsten wurde mit Spannbreiten oder Durchschnittswerten gerechnet.
4. Angaben über die **Exporte direkt aus der Nutzungsphase (E)** (z. B. Anteil der Exporte von Gebrauchtwagen, möglichst Zeitreihen, langjährige Mittel oder Abschätzung für 2020).
5. Bei einigen Produkten: **dissipative Verluste (dV)** in der Nutzungsphase (z.B. Verbleib von Katalysatormaterial im Reaktionsprodukt). Da diese Verluste nur bei wenigen Produkten auftreten, sind sie in der obigen Abbildung nicht dargestellt.

Anwendung der Weibullverteilung für die Verweildauer in der Nutzungsphase

Für die Analyse auf Basis der genannten Parameter wurde für die Verteilung der Verweildauern eine Weibullverteilung angenommen. Die Weibullverteilung stellt eine gute Annäherung an die Lebensdauerverteilung von Produkten dar. Zahlreiche in der Literatur beschriebene Analysen haben sie als die angemessenste Verteilung ergeben (siehe OECD 2001; Oguchi et al. 2008; Tasaki et al. 2004; Kagawa et al. 2006).

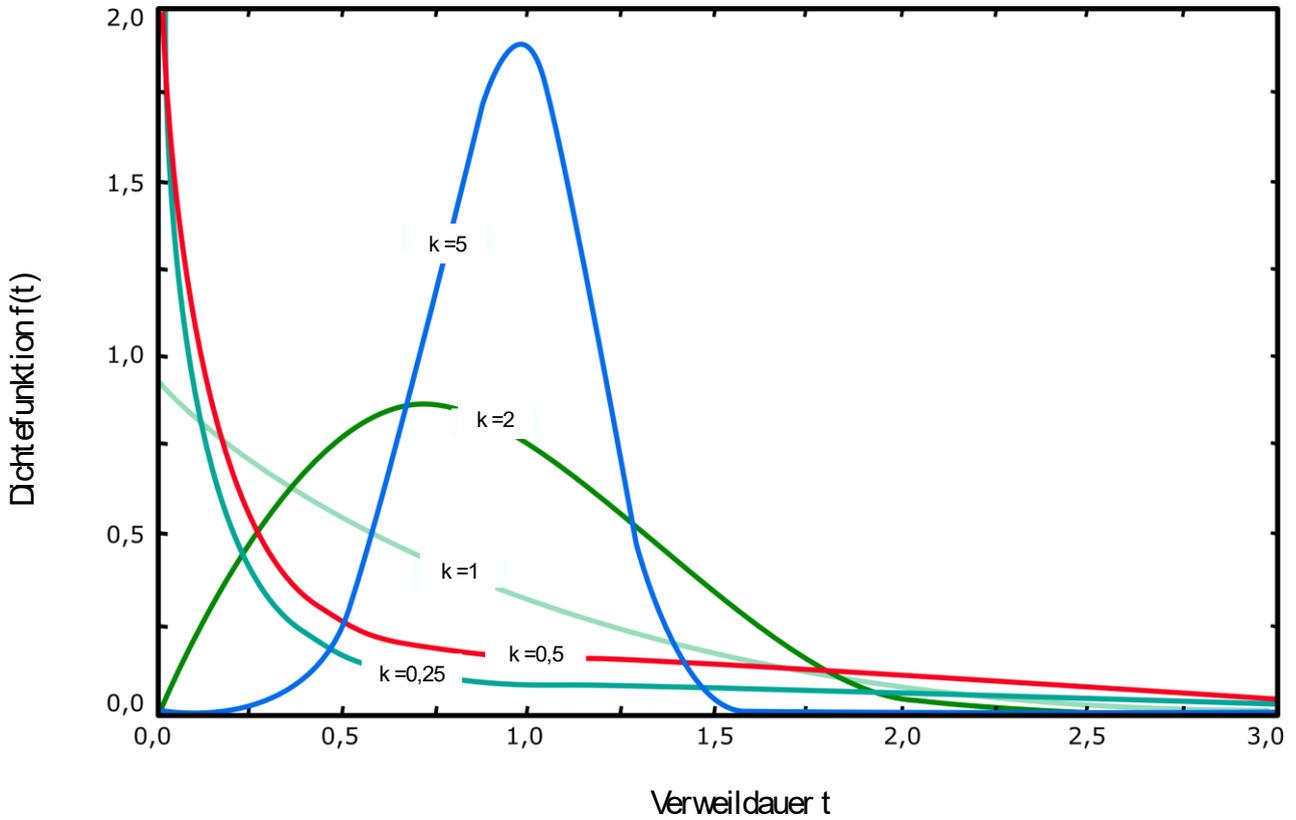
Es gilt jedoch zu beachten, dass sich im Falle konstanter Inverkehrbringung und konstanter Produktlebens- bzw. Verweildauern bei Anwendung der Weibullverteilung keine Abweichungen von der Berechnung mit durchschnittlichen Lebens- bzw. Verweildauern ergibt. Für den Fall, dass die Produktanalyse konstante Werte für die Inverkehrbringung und die Lebensdauer ergibt, konnte also vereinfachend mit Durchschnittswerten gerechnet werden und es muss keine Weibullverteilung angenommen werden. Ein weiterer Sonderfall ergibt sich für Produkte mit kurzer Lebensdauer (< 1 Jahr). Hier konnte vereinfachend die im Jahr 2020 in Verkehr gebrachte Menge mit der als Abfall anfallenden Menge gleichgesetzt werden.

Die Weibullverteilung ist folgendermaßen definiert:

$$f(t, \lambda, k) = \lambda k (\lambda t)^{k-1} e^{-(\lambda t)^k}$$

Wobei t die Verweildauer angibt, λ die Lage (Skalierungsparameter) und k die Form der Kurve (Formparameter) beschreibt.

Abbildung 13: Dichtefunktion der Weibullverteilung für verschiedene Formparameter k



Die aus der Nutzungsphase zum Zeitpunkt t ausscheidende Menge an Produkten A (noch ohne Korrektur durch die direkten Exporte aus der Nutzungsphase) ergibt sich nun aus der Multiplikation der in der Vergangenheit in Verkehr gebrachten Menge P mit der Verweildauerverteilung.

$$A(t) = \int_0^{\infty} P(t - t_i) f(t_i, \lambda, k) dt_i$$

$1/\lambda$ ist dabei die Verweildauer, nach der rund. 63 %⁸ der Produkte aus der Nutzungsphase ausgeschieden sind, und wird in diesem Zusammenhang in der Regel als typische Verweildauer T bezeichnet. Kleine Werte für k signalisieren, dass die meisten Produkte früh aus der Nutzungsphase ausscheiden, hohe Werte für k signalisieren, dass die Produkte eher spät ausscheiden. Untersuchungen an der Uni Bremen in Bezug auf die Verweildauer von elektrischen und elektronischen Geräten haben Werte für k zwischen 2 und 5.6 ergeben (Göbbling-Reisemann et al. 2009). Andere Studien berichten k -Werte zwischen 1 und 2 (OECD 2001) bzw. zwischen 1 und 3 (NIES 2010; Nomura 2005; Oguchi et al. 2008); in einzelnen Studien sind allerdings Werte bis 5,4 (Kuitche 2010)

⁸ Genau genommen sind dies $(1 - \frac{1}{e})$, unabhängig von den Weibullparametern.

oder noch höher zu finden (Kumar und Sarkan 2013). In der Produktanalyse werden bei Anwendung der Weibullverteilung die k -Werte für die einzelnen Produkte entweder basierend auf vorhandenen einschlägigen Veröffentlichungen gewählt oder es erfolgt eine Analyse für verschiedene k -Werte auf Basis für andere Produkte vorhandener Daten, wobei in diesen Fällen insbesondere der Einfluss abweichender k -Werte untersucht wird.

Der Wert für λ ergibt sich als Kehrwert der charakteristischen Lebensdauer T aus der durchschnittlichen Lebensdauer \bar{T} , welche im Rahmen der Produktanalyse ermittelt wird. Hier gilt:

$$\bar{T} = T * \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) \Leftrightarrow T = 1/\lambda = \frac{\bar{T}}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)}$$

Für k -Werte zwischen 1 und 5 ergibt sich dabei $0.8856 * T \leq \bar{T} \leq T$ (vgl. Nomura 2005).

Bestimmung des Jahres X - Bestimmung der zu berücksichtigenden Dauer zur retrospektiven Parametererfassung

Um zu bestimmen, wie weit die in Verkehr gebrachten Mengen in die Vergangenheit zurückverfolgt werden müssen, wo also das oben genannte Jahr X liegt, wurde Folgendes festgelegt: Es sollen 95 % der potenziell als Altgeräte anfallenden Produktmengen erfasst werden. Bei schwieriger Datenlage sind wenigstens 90 % Erfassung anzupfeilen. Um daraus das Jahr X näherungsweise zu bestimmen, wurde davon ausgegangen, dass die Verweildauer von Produkten in der Nutzungsphase einer Weibullverteilung genügt. Sie ist definiert als:

$$f(t, \lambda, k) = \lambda k (\lambda t)^{k-1} e^{-(\lambda t)^k}$$

De facto kann die in Verkehr gebrachte Menge P nicht bis in die unendliche Vergangenheit zurückverfolgt werden, sondern nur bis zum Zeitpunkt X. Der erfasste Anteil \bar{A} sollte aber mindestens 95 % der Gesamtmenge betragen:

$$\frac{\bar{A}(t)}{A(t)} = \frac{\int_0^T P(t - t_i) f(t_i, \lambda, k) dt_i}{\int_0^\infty P(t - t_i) f(t_i, \lambda, k) dt_i} \geq 0,95$$

Solange die historisch in Verkehr gebrachte Menge P nicht bekannt ist, lässt sich dieser Ausdruck nicht nach T auflösen. Wenn aber P in einer ersten Näherung konstant gesetzt wird, also ein konstanter Absatz angenommen wird, so ergibt sich der einfache Ausdruck:

$$\int_0^T f(t_i, \lambda, k) dt_i \geq 0,95.$$

Das heißt, gesucht ist das 95 % Perzentil der Weibullverteilung, gegeben durch die Bedingung:

$$1 - e^{-(\lambda T)^k} = 0,95$$
$$T = \frac{1}{\lambda} \sqrt[k]{\ln\left(\frac{100}{5}\right)}$$

Wenn nun $1/\lambda$ mit der mittleren Verweildauer⁹ gleichgesetzt wird und für k -Werte zwischen 2 und 5 angenommen wird, ergibt sich ein Wert für T , der zwischen dem 1,2 und 1,7-fachen der mittleren Verweildauer liegt.

Als Richtwert für die Sammlung von Daten über in Verkehr gebrachte Mengen gilt also, dass ein Zeitraum abgedeckt werden sollte, der etwa 1,5-mal die mittlere Verweildauer vor dem Referenzjahr 2020 abdeckt. Für Produkte mit einer typischen Verweildauer von 20 Jahren (z. B. Windenergieanlagen) mussten also Daten gesammelt werden, die bis 1990 zurückreichen. Falls nach der Recherche ohnehin Daten vorlagen, die weiter zurückreichen, so wurden diese auch berücksichtigt. Trotz der getroffenen Annahmen ($1/\lambda$ mit der mittleren Verweildauer gleichgesetzt; Annahme eines konstanten Absatzes) ist dieser Richtwert als hinreichend genau anzusehen. Für Produkte mit über die Zeit wachsendem Absatz, die in Bezug auf die analysierten Metalle von größerer Relevanz sind, liegt der Anteil der entsprechend dem gewählten Vorgehen erfassten potenziell als Abfall anfallenden Produkte eher oberhalb der anvisierten 90 bzw. 95 %.

Bezüglich des k -Werts wurde in der Produktanalyse für jedes Produkt auf Basis von Literaturangaben oder begründeten Annahmen individuell bestimmt, welche Werte für k anzunehmen sind.

⁹ Für k -Werte zwischen 1 und 5 ist $0,8856 \cdot \frac{1}{\lambda} \leq \bar{T} \leq \frac{1}{\lambda}$ bzw. $0,8856 \cdot T \leq \bar{T} \leq T$.

Durchführung der Produktanalyse

Die eigentliche Analyse der Mengen an ReStra-Zielmetallen, die sich im Jahr 2020 als Abfall aus den untersuchten Produkten ergeben, erfolgte entsprechend der Reihenfolge ihrer (vermuteten) Mengenrelevanz¹⁰. Hier ist anzumerken, dass dieses Vorgehen (gestaffelte Analyse nach vermutter Mengenrelevanz) nur dann wirklich sinnvoll ist, wenn die Zerlegung der Produktgruppen in einzelne relevante Produkte eine hohe Anzahl verschiedener Produkte ergibt, ansonsten werden alle identifizierten Produkte analysiert.

Die Berechnung der zu erwartenden Metallmenge in 2020 basiert dann auf der in Verkehr gebrachten Menge in den Jahren vor 2020, der Verweildauer der Produkte in der Nutzungsphase, den direkten Exporten aus der Nutzungsphase (z. B. Gebrauchtwagenverkäufe ins Ausland) und den produktspezifischen Metallgehalten.

Die so berechnete Metallmenge wurde mit Y_{i1} bezeichnet. Das nächste Produkt P_{i2} wurde wieder so gewählt, dass es unter den verbleibenden Produkten den vermutlich größten Beitrag zur Metallmenge aus PG_i in 2020 liefert. Die Berechnung der zu erwartenden Metallmengen ergab nun den Wert Y_{i2} . Analog wurde weiter verfahren für Y_{i3} , Y_{i4} usw. Die Hinzunahme von weiteren Produkten wurde abgebrochen, wenn der zusätzliche Beitrag eines Produkts zur Metallmenge voraussichtlich gering war. Dafür wurde für das letzte betrachtete Produkt P_{ij} das Verhältnis $Z_{ij} = Y_{ij} / (Y_{i1} + Y_{i2} + Y_{i3} + \dots + Y_{ij-1})$ gebildet. Ist $Z_{ij} \cdot X_i \leq 0,03$, ist also der Zuwachs der Metallmenge bezogen auf die bisher ermittelte Menge geringer als drei Prozent, so wurde die Hinzunahme von Produkten abgebrochen. Für Produktgruppen, die für mehrere Metalle relevant sind, wurde das Verfahren für jedes Metall durchgeführt. Für die Evaluierung des Abbruchkriteriums wurde jeweils auf die Mittelwerte für die nötigen Parameter zurückgegriffen, ansonsten wurden aber jeweils Bandbreiten berechnet.

Datenqualität und Quellen für Parameter

Damit für alle Produkte eine vergleichbare Datenqualität angestrebt werden konnte, wurde bei allen Produktgruppen bzw. Produkten bei der Bestimmung der o. g. Parameter so einheitlich wie möglich vorgegangen. Die zuverlässigsten Datenquellen wurden dabei zuerst untersucht, und erst wenn diese nicht ergiebig waren, oder unvollständig, wurden weitere Datenquellen herangezogen. Im Folgenden findet sich eine Auflistung von Quellen, die in dieser Reihenfolge herangezogen werden:

¹⁰ Begonnen wird die Analyse also mit dem Produkt P_{i1} , für das in Produktgruppe PG_i die höchste Metallmenge in 2020 erwartet wird.

1. Die **in Verkehr gebrachten Mengen** lassen sich je nach Produkt aus folgenden Quellen ermitteln:
 - a) Erhebungen der Konsumgüterforschung (z. B. GfK) oder der Verbände (z. B. BITKOM, BWE, KBA, VDA),
 - b) Export/Import und Produktionsstatistiken (DESTATIS),
 - c) Literaturangaben (z. B. Marktstudien über Brennstoffzellen, andere Stoffflussstudien),
 - d) Expertenbefragung,
 - e) begründete Schätzungen (z. B. analoge Produkte oder Extrapolation historischer Daten).
2. Die **Verweildauern** betreffen die Dauer, die ein Produkt in der Nutzungsphase verbringt, inkl. etwaiger Lagerung nach Ende der eigentlichen Gebrauchsphase. Hier sind als Quellen zu nennen:
 - a) Studien über "Lebensdauern", die die echte Verweildauer berücksichtigen (z.B. basierend auf Erhebungen bei Schrottplätzen, Recyclern etc.);
 - b) Angaben von Ämtern und Behörden sowie Verbänden (z. B. KBA, VDA, BITKOM);
 - c) Herstellerangaben¹¹;
 - d) Expertenaussagen;
 - e) begründete Schätzung (bspw. über analoge Produkte):
3. **Konzentrationen** der betroffenen Metalle, ggf. auch zunächst für Komponenten in den Produkten und Hochrechnung:
 - a) Herstellerangaben,
 - b) Zerlegestudien und chemische Analysen (z. B. von Recyclingunternehmen, Sekundärmetallhütten),
 - c) Wissenschaftliche Literatur (z. B. MFA Studien, Studien über Metallbedarfe für Zukunftstechnologien, Fachliteratur zu spez. Produkten),
 - d) Expertenaussagen,
 - e) begründete Schätzung (z. B. analoge Produkte).
4. **Exporte** direkt aus der Nutzungsphase:
 - a) Erhebungen der statistischen Ämter und der Verbände,
 - b) Hersteller/Vertreiber (z. B. bei med. Geräten),
 - c) Marktstudien und andere Sekundärliteratur,

¹¹ Häufig verfälscht, da hier die technische Lebensdauer, nicht die Verweildauer angegeben wird. Die Angaben sind in diesen Fällen entsprechend zu korrigieren.

- d) Expertenaussagen,
- e) begründete Schätzung

Zur Einordnung der Qualität der Ergebnisse erfolgte eine Bewertung der Datenqualität. Die hierbei angewendete Methodik sowie die einzelnen Bewertungen finden sich in Anhang 9.5.

5.1.2 Analyse von Abfallarten

Neben der Analyse auf der Produktebene bezogen auf das Jahr 2020 erfolgte eine Analyse relevanter Abfallarten basierend auf der Situation zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie. Die hier ermittelten Ergebnisse stehen für sich und sind nicht mit der Bestimmung der Verluste in den Entsorgungsketten (siehe Kapitel 6) in Bezug zu setzen. Bei der Abfallartenanalyse wurden Abfallarten, die einen relevanten Gehalt an den ausgewählten strategischen Metallen aufweisen, identifiziert. Vor diesem Hintergrund wurden unter Berücksichtigung der Produktauswahl Vorschläge für vertiefend zu untersuchende Abfallgruppen unterbreitet. Die identifizierten Abfallarten wurden auf Basis der Mengenrelevanz in der Abfallstatistik des Bundes gewichtet. Das Vorgehen stellt sich im Einzelnen wie folgt dar.

Die identifizierten ReStra-Zielmetalle, sämtlich Nichteisen (NE) Metalle, werden in einer Vielzahl von Produkten genutzt und sind demzufolge ebenso in vielen Abfallarten enthalten. Grundsätzlich lassen sich diese in folgende Kategorien einteilen:

- Kategorie 1: Getrennt gesammelte Metalle (Alt- und Neuschrotte),
- Kategorie 2: Nach mechanischer Behandlung anfallende Metallfraktionen (relevante Abfallströme sind bspw. Altagautos, Bauabfälle, Schlacken),
- Kategorie 3: Dissipativ verwendete Metallfraktionen (relevante Abfallströme sind bspw. Beschichtungen).

Die metallhaltigen Stoffströme der ersten beiden Kategorien sind für die Nichteisenmetallfraktion statistisch dokumentiert. Betrachtet wurden die Abfallarten nach der Kategorisierung entsprechend der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV, Stand 2014). Zur Darstellung dieser Stoffströme diente insbesondere die Fachserie 19 Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes in Verbindung mit Angaben zu spezifischen Metallgehalten in den unterschiedlichen Abfallgemischen. Hinsichtlich der Eisenmetalle (Fe-Metalle) und getrennt erfasster NE-Metalle wurde durch den Abgleich mit den Statistiken der Wirtschaftsvereinigung Stahl sowie der Wirtschaftsvereinigung Metalle deutlich, dass Mengendifferenzen zu den über die Abfallstatistik ermittelten Materialströmen bestanden. Diese waren sicherlich auf frei gehandelte Mengen zurückzuführen, welche ohne Aufbereitung einer Verwertung zugeführt wurden. Da die Stoffströme der Fe- und getrennt erfassten NE-Metalle (Kupfer, Aluminium, Magnesium Zink, Nickel) im vorliegenden Fall allerdings von geringerer Bedeutung sind (abgesehen von einem geringen Umfang an Legierungselementen für Fe-Metalle), konnten die Daten der Abfallstatistik herangezogen werden. Weiterführende Betrachtungen zum Einsatz Seltener Erden in Stahl, wie beispielsweise von Cer-Mischmetall bei der Herstellung von Gusseisen, sind in Kapitel 5.3 zu finden.

Für die dissipativ verwendeten Metalle konnten die Daten der Abfallstatistik nur eingeschränkt genutzt werden. Angaben zu deren Gehalten in den einzelnen Abfallarten lagen nicht bzw. nicht vollumfänglich vor. Die NE-Metallgehalte der Abfallarten wurden insbesondere aus Sekundärliteraturquellen und Daten der Datenbank ABANDA abgeleitet.

Nach einer Betrachtung der NE-Metallgehalte der Abfallarten entsprechend der Ergebnisse des UFOPLAN-Projektes FKZ 3709 33 316¹², wurden im nächsten Prüfschritt Abfälle mit hohen NE-Metallgehalten, entsprechend der Metallauswahl, ermittelt.

Über Literaturrecherchen speziell zu Metallen der in AP1 getroffenen Metallauswahl wurden parallel zum oben genannten Vorgehen relevante Abfallströme mit entsprechenden Metallgehalten recherchiert. Dies erfolgte mitunter über die im Projekt betrachteten Produkte der Produktgruppenauswahl, welche potenziellen Abfallarten zugeordnet wurden.

Auch die Mengenrelevanz der Abfallströme bildete ein Entscheidungskriterium, sofern Rechercheergebnisse hinsichtlich der Metallgehalte einzelner Abfallarten nicht eindeutig waren, wurde die Größe des Abfallstromes betrachtet, um abzuschätzen, ob tief greifendere Nachrecherchen relevante Ergebnisse hinsichtlich erzielbarer Mengen hervorbringen würden.

Um Doppelzählungen zu vermeiden, wurden Abfälle der Abfallschlüsselnummer 19 - Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen - nicht betrachtet. Für die Abfallschlüsselnummern 19 01 11 und 19 01 12 (Aschen und Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen) wurde eine Ausnahme gemacht, da hier insbesondere Restfraktionen (nach der vorgeschalteten Wertstoffabtrennung) sowie stofflich nicht verwertbare Abfälle eingesetzt werden, eine Stoffumwandlung erfolgt und damit andere Materialeigenschaften vorliegen.

5.2 Produktgruppenidentifizierung

Für die identifizierten ReStra-Zielmetalle wurden gemäß dem oben beschriebenen Vorgehen die relevanten Produkte und Produktgruppen identifiziert. Die relevanten Anwendungsfelder wurden für jedes Metall einzeln auf Grundlage einer Literaturrecherche sowie anhand von Statistiken identifiziert. Die Verteilung der Anwendungsfelder wurde dabei nicht für ein einzelnes Jahr als Momentaufnahme betrachtet, sondern über mehrere Jahre hinweg, um den Einfluss kurzweiliger Schwankungen der Anwendungsstruktur des jeweiligen Metalls zu reduzieren¹³. Je nach Datenverfügbarkeit wurden Quellen der Jahre 2008 bis 2011 herangezogen. Auf die hieraus resultierende Vorauswahl wurden die weiteren Schritte (Anwendung von Ausschlusskriterien, Bedeutung für Zukunftstechnologien, Abschneidekriterien, Diskussion) angewandt.

Das Vorgehen wird im Folgenden für jedes Metall einzeln dargelegt. Gemäß der Leistungsbeschreibung sind Altfahrzeuge und Altbatterien in jedem Fall als Produkte gesetzt. Bei der Anwendung der Methodik bleibt dies jedoch zunächst unberücksichtigt.

¹² Umweltbundesamt: Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens; FKZ.: 3709 33 316; erstellt durch INTECUS GmbH; Dessau-Roßlau, 2011

¹³ Als Beispiel hierfür lässt sich u.a. das Gallium Neutrino Observatory in Grand Sasso, Italien nennen. Aus der Errichtung dieser Einrichtung ergab sich ein temporärer zusätzlicher Galliumbedarf von 30 Tonnen, welcher den Anteil von Forschungs- und Entwicklungsanwendungen kurzzeitig deutlich erhöhte.

5.2.1 Indium

Tabelle 15: Anwendungsfelder von Indium

Anwendungen	Anteile
LCDs	74-85%
Legierungen und Lote	8-12%
Halbleiter (LEDs, Photovoltaikzellen)	5%
Sonstige Anwendungen	2-4%

Quelle: Buchert et al. 2009; Handke 2008; Angerer et al. 2009; Kammer 2011; Hagelüken und Meskers 2009; Jungbluth und Tuchschnid 2007; European Commission 2010; Tolcin 2012

5.2.1.1 Anwendung von Ausschlusskriterien

LCDs aus den Bereichen private Anwendungen und dual-use-Geräte wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da diese bereits im UBA-Projekt RePro¹⁴ betrachtet wurden. Eine Ausnahme stellten hier zunächst LCD-Bildschirme dar, die nur in gewerblichen Anwendungen genutzt werden. In Absprache mit dem Auftraggeber wurden diese jedoch ebenfalls aus der Betrachtung ausgeschlossen.

5.2.1.2 Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Kräftige Nachfrageimpulse sind von CIGS Photovoltaikzellen zu erwarten. Für die USA wird beispielsweise von einer Vervierfachung des Metalleinsatzes bis 2016 im Vergleich zu 2009 ausgegangen (Goonan 2012).

5.2.1.3 Anwendung von Abschneidekriterien

Die sonstigen Anwendungen wurden aufgrund ihrer geringen Mengenrelevanz (<5 %) nicht in die weitere Betrachtung einbezogen.

5.2.1.4 Ergebnisse

LEDs und Photovoltaikzellen ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung. Bei dem Anwendungsfeld „Legierungen und Lote“ war eine genauere Betrachtung notwendig. Legierungen und Lote machen als Anwendungsfeld zwischen 8 - 12 % des globalen Indiumeinsatzes aus. Hier war zu klären, ob einzelne Produktgruppen bzw. Endprodukte in ihrer Relevanz oberhalb des Abschneidekriteriums (5 %) lagen. Die Datenlage stellte sich hierbei jedoch äußerst schwierig dar (vgl. Tolcin 2012; Goonan 2012). Teilweise konnte hierbei daher nur qualitativ vorgegangen werden. Auf Grundlage eines Literaturscreenings ergab sich eine Zerlegung in folgende Produktgruppen:

¹⁴ Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro), Forschungskennzahl (UF-PLAN) FKZ 3711 95 318

- Lote in Elektronikprodukten,
- Dentallegierungen,
- Kontrollstäbe,
- Hilfsmittel bei Poliervorgängen in der optischen Industrie,
- Sprinkleranlagen und ähnliche Produkte.

Im Bereich der Lotlegierungen kommt Indium in widerstandsfähigen bleifreien Lötlegierungen zum Einsatz. ElektroG2 und RoHS verbieten seit 1. Juli 2006 den Einsatz bleihaltiger Lote in Elektronikprodukten. Daher ließen sich Elektronikprodukte, von denen die privaten und dual-use-Geräte bereits im UBA-Projekt RePro behandelt werden, als ein wesentliches Einsatzgebiet von indiumhaltigen Lötlegierungen vermuten. In eventuellen anderen Anwendungen ließen sich minimale Indiumgehalte bezogen auf die Endprodukte vermuten, da die Menge an Lötmaterial bezogen auf das gesamte Produkt in der Regel vernachlässigbar gering ausfällt.

Unter den indiumhaltigen Legierungen finden sich Legierungen mit Edel- sowie unedlen Metallen. Die Edelmetalllegierungen finden in der Zahnmedizin Anwendung (Dentallegierungen; vgl. Jorgenson und George 2004). Bei den sonstigen Legierungen ist zum einen der Einsatz in Kontrollstäben von Kernkraftwerken zu nennen. Hier kommen Legierungen mit 5 % Indium, 15 % Silber und 80 % Cadmium zum Einsatz (Jorgenson und George 2004). Weitere Einsätze von Legierungen aus Indium mit unedlen Metallen sind in verschiedenen Bereichen zu finden, in denen niedrige Schmelzpunkte erforderlich sind. Hier ist in erster Linie der Einsatz in der Fertigung der optischen Industrie zu nennen. Linsen werden hier mit Indium beschichtet, bevor diese poliert werden. Anschließend kann die Indiumbeschichtung bei niedrigen Temperaturen wieder entfernt werden (American Indium Corporation o. J.). Weitere Anwendungen mit geringerer Relevanz sind der Einsatz in Sprinkleranlagen und Sicherungen sowie als Zusatz für Gold in Elektronikprodukten (Tolcin 2012).

Vor diesem Hintergrund ergaben sich folgende Schlussfolgerungen für die weitere Betrachtung:

- **Indiumhaltige Lötlegierungen** wurden aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen nicht näher betrachtet.
- Der **Einsatz in Dentallegierungen** war für das Projekt in Abstimmung mit dem Auftraggeber nicht von Relevanz, vor allem da es keinen Zugriff auf „Altprodukte“ gibt (der Zugriff auf „end-of-life“-Produkte, die auf Friedhöfen oder Krematorien anfallen, gestaltet sich nicht zuletzt aus ethischen Aspekten äußerst problematisch). Für entsprechende Abfälle aus Zahnarztpraxen gibt es zwar bereits weitgehend geschlossene Kreisläufe (vgl. Abschnitt 0), jedoch konnte nicht belegt werden, dass hierbei auch eine Indiumrückgewinnung stattfindet. Dennoch ist hier von einer äußerst geringen Mengenrelevanz auszugehen.
- Die Betrachtung des Einsatzes in **Kontrollstäben in Kernkraftwerken** erfolgte ergänzend zu der Betrachtung der Absorbermaterialien (siehe 5.2.8.4).
- Der Einsatz von **Indium bei Poliervorgängen der optischen Industrie** wurde im Rahmen der Produktanalyse nicht näher betrachtet.
- Weitere Einsatzgebiete (Sprinkleranlagen etc.) wurden nicht näher betrachtet. Hier ließ sich eine geringe Mengenrelevanz vermuten (8 - 12 % abzüglich der bereits genannten Einsatzgebiete). Eine grobe Abschätzung der hierdurch vernachlässigten Menge wurde vorgenommen.

5.2.2 Gallium

Tabelle 16: Anwendungsfelder von Gallium

Anwendungen	Anteile
Elektronik (Mikrochips, Schaltkreise)	61-66%
Optoelektronische Anwendungen (LEDs, Photovoltaikzellen)	20-38%
Forschung und Entwicklung ¹⁵	1-15%
Sonstige (Legierungen, Hochtemperaturanwendungen, (Zahn-) medizinische Anwendungen, Schmiermittel)	~1%

Quelle: Buchert et al. 2009; Behrendt et al. 2010; Angerer et al. 2009; Kammer 2011; Jungbluth und Tuschmid 2007; Hagelüken und Meskers 2009; Graedel et al. 2011a; USGS - U.S. Geological Survey

5.2.2.1 Anwendung von Ausschlusskriterien

In der Produktgruppe Elektronik findet Gallium in erster Linie in Form von Galliumarsenid-Wafern (GaAs) Anwendung. Zwar sind derzeit weltweit 90 % aller produzierten Wafer aus Silicium (Angerer et al. 2009), GaAs findet jedoch als Halbleitermaterial in Hochleistungs-Mikrochips für besondere Leistungsanforderungen Anwendung¹⁶ (Angerer et al. 2009). Eine besondere Eignung von GaAs-Schaltkreisen ergibt sich hieraus für Hochfrequenzleistungsanwendungen. In erster Linie ist dies die Anwendung in Mobiltelefonen, wo Gallium u. a. in den Sende- und Empfangsverstärkern eingesetzt wird (Angerer et al. 2009; Kammer 2011; strategyanalytics 2012). Weitere Anwendungen von Gallium in Elektronikprodukten sind Notebooks, drahtlose Netzwerke (WLAN) und GPS-Navigationssysteme (Emsley 2011; Angerer et al. 2009). Die genannten Elektronikanwendungen (Mobiltelefone, Navigationsgeräte, Notebooks) wurden im UBA-Projekt RePro betrachtet und daher hier von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Anwendungen der Forschung und Entwicklung wurden nicht weiter betrachtet, da diese zum einen keinen klassischen Lebenszyklus aufweisen und es sich zum anderen wie beim Gallium Neutrino Observatory in Grand Sasso um einzelne und sich nicht (regelmäßig) wiederholende Anwendungen handelt, von denen kein größeres Metallaufkommen in Abfallströmen zu erwarten ist. Zudem sind Detektoren vergleichbarer Größe in Deutschland nicht bekannt.

¹⁵ Für das Gallium Neutrino Observatory, Grand Sasso, Italien wurden insgesamt 30t Gallium benötigt, daraus ergibt sich ein zeitweilig erhöhter Verbrauch (MaRes); weitere FuE-Anwendungen umfassen u.a. hocheffiziente PV-Module, Nuklearmedizin (Angerer 2009).

¹⁶ Zu den verbesserten Eigenschaften zählen u. a. höhere Elektronengeschwindigkeiten und Elektronenmobilität, was Transistoren ermöglicht, die bei mehreren hundert Gigahertz arbeiten. Bauteile aus GaAs sind zehnfach schneller als vergleichbare aus Silicium (Angerer et al. 2009).

Die Verwendung von Ga in LEDs wurde teilweise durch die UBA-Projekte RePro bzw. GELLED¹⁷ abgedeckt. Die genaue Abgrenzung bzw. Festlegung der in der Produktgruppe LEDs zu betrachtenden Produkte erfolgt in Abschnitt 5.3.15.

5.2.2.2 Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Als wesentliche zukünftige Anwendungen wurden Photovoltaikzellen und (weiße) LEDs benannt (Buchert et al. 2009; Angerer et al. 2009).

5.2.2.3 Anwendung von Abschneidekriterien

Sonstige Anwendungen machen weniger als 1 % aus, diese werden daher nicht für die weitere Betrachtung herangezogen.

5.2.2.4 Ergebnisse

LEDs und Photovoltaikzellen ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Analyse.

5.2.3 Germanium

Tabelle 17: Anwendungsfelder von Germanium

Anwendung	Anteil
Optische Materialien – Infrarotsysteme	25-30%
Optische Materialien-Faseranwendungen	20-35%
(Polymer) Katalysatoren	15-30%
Elektronik + Photovoltaik	15-25%
Sonstige (Nachtsichtgeräte, Leuchtmittel, medizinische Anwendungen Chemotherapie)	<5%

Quelle: Buchert et al. 2009; Angerer et al. 2009; Kammer 2011; Hagelüken und Meskers 2009; European Commission 2010

5.2.3.1 Anwendung von Ausschlusskriterien

Die Produktgruppenidentifizierung zeigte eine unklare Mengenrelevanz von Elektronikprodukten, die in verschiedenen Quellen (Guberman 2008 - 2011; Angerer et al. 2009) gemeinsam mit Photovoltaikanlagen aufgeführt werden. In Buchert et al. (2009) finden Elektronikanwendungen jedoch keine Erwähnung (hier wird nur PV als Anwendungsfeld aufgeführt). Im Bereich der Elektronik und Photovoltaik wird Germanium in Form von Silicium-Germanium (SiGe) als Halbleitermaterial für besondere Leistungsanforderungen eingesetzt (Angerer et al. 2009). Neben Photovoltaikzellen lassen sich für SiGe in erster Linie Bauteile für WLANs, Festplatten, Automobilchips und GPS sowie der Einsatz in Hochfrequenz-Sendern und -Empfängern für Mobiltelefone identifizieren (Angerer et al. 2009; Guberman 2008 - 2011). Diese Produkte werden teilweise im UBA-Projekt RePro abgedeckt (WLANs, Festplatten im nicht-ausschließlich gewerblichen Anwendungsbereich,

¹⁷ Sander 2015

GPS, Mobiltelefone). Eine Überprüfung der Mengenrelevanz von Anwendungen im Auto erfolgt im Kapitel zur Produktgruppe „Automobile“.

5.2.3.2 Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Großer zukünftiger Bedarf ist aus Photovoltaikzellen (und anderen Halbleiteranwendungen) zu erwarten (Angerer et al. 2009; Buchert et al. 2009). Nach Angerer (2009) waren für den Untersuchungsrahmen relevante Nachfrageimpulse außerdem aus Glasfasern (Verdreifachung der Nachfrage bis 2030) zu erwarten, wobei unklar war, inwieweit sich hieraus bis 2020 relevante Metallfrachten in Abfallströmen ergeben. Von einer stabilen Nachfrage war hingegen für Katalysatoren auszugehen (Angerer et al. 2009).

5.2.3.3 Anwendung von Abschneidekriterien

Sonstige Anwendungen machten weniger als 5 % aus und wurden daher nicht für die weitere Betrachtung herangezogen.

5.2.3.4 Ergebnisse

Optische Faseranwendungen, (Polymerisations-) Katalysatoren und Photovoltaikzellen ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung. Bzgl. Photovoltaikzellen ist hierbei jedoch anzumerken, dass sich im Rahmen der Produktgruppenidentifizierung noch keine eindeutige Mengenrelevanz dieses Anwendungsfeldes feststellen ließ, da in den untersuchten Studien PV-Anwendungen zu den Elektronikanwendungen gezählt wurden (siehe bspw. Butterman und Jorgenson 2004). Eine nähere Betrachtung des Anwendungsfeldes mit Prüfung der Relevanz erfolgte im Rahmen der Produktanalyse. Im Bereich der Infrarotsysteme finden sich nach United States Geological Survey zu 90 % militärische Anwendungen wie Strahlendetektoren und Nachtsichtgeräte, welche in obiger Aufzählung bereits unter Sonstiges aufgeführt sind, was auf unterschiedliche Zuordnungen in den verwendeten Statistiken zurückzuführen ist. Militärische Anwendungen wurden nach Rücksprache mit dem Auftraggeber von der Betrachtung ausgeschlossen. Unter den verbleibenden Anwendungen fanden sich wenig mengenrelevante Produkte wie beispielsweise Thermographiekameras. Diese sonstigen Anwendungen werden nicht näher betrachtet.

5.2.4 Gold

Tabelle 18: Anwendungsfelder von Gold

Anwendung	Anteil USA 2011 ¹⁸	Anteile global 2005 (Lewis et al. 2007)
Schmuck	54%	67%
Zahntechnik	10%	2%
Elektronik	7%	7%
Sonstige	29%	
Andere industrielle Anwendungen		2%
Münzen/Wertmetalle		2%
Investitionen		18%

Quelle: USGS - U.S. Geological Survey; Geoscience Australia 2008; Lewis et al. 2007 (weltweite Daten bezogen auf 2005)

5.2.4.1 Anwendung von Ausschlusskriterien

Schmuck wurde nicht näher betrachtet, da es hier keinen „klassischen“ Lebenszyklus mit einer Verwertung am Lebensende gibt, sondern von Bestandsbildung bzw. bereits geschlossenen Kreisläufen über bereits etablierte Strukturen (Goldhändler, Goldschmiede) auszugehen ist (siehe bspw. Graedel et al. 2011b). Dasselbe gilt für den Einsatz von Gold als Investitionsgut.

5.2.4.2 Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Nachfrageimpulse ergeben sich in erster Linie aus für diese Studie nicht relevanten Elektronikprodukten (World Gold Council). Der Einsatz in der Zahntechnik ist rückläufig. Weitere zukünftige Wachstumsfelder könnten der Einsatz als Industrie-Katalysator, der Einsatz in Nanomaterialien in hier nicht relevanten Technologien wie (Touch-) Displays, der Einsatz in diagnostischer Medizin zur Krebstherapie (keine weitere Betrachtung, da kein Lebenszyklus mit Abfallentsorgung), Nanopartikel zur Wasseraufbereitung sowie der potenzielle Einsatz in Brennstoffzellen (Separatorplatte) und Lithium-Luft-Batterien und in Photovoltaikzellen sein. Bei letztgenannten Anwendungen ist jedoch von keinen relevanten Mengen im Betrachtungszeitraum auszugehen, ebenso bei Nanopartikeln zur Wasseraufbereitung. Bei den anderen Produkten ist von einem verstärkten Einsatz erst in einigen Jahren zu rechnen, wodurch sich aufgrund der vergleichsweise langen Lebensdauer keine Relevanz für 2020 ergab.

5.2.4.3 Anwendung von Abschneidekriterien

Elektronikanwendungen zeigen mit rund 7 % nur eine vergleichsweise geringe Relevanz als Anwendungsfeld von Gold. Einige der im Bereich Elektronik relevanten Anwendungsfelder wurden bereits im UBA-Projekt RePro betrachtet (PCs, Laptops, Tablet Computer, externe Festplatten,

¹⁸ Daten beziehen sich nur auf die USA, da keine weltweiten Daten oder Daten für Deutschland/EU für 2008 oder neuer zur Verfügung standen.

Navigationsgeräte, Mobiltelefone und Smartphones, LCD-Monitore und weitere). Es ist davon auszugehen, dass die verbleibenden Elektronikanwendungen deutlich unterhalb des 5%-Abschneidekriteriums liegen. Eine grobe Abschätzung für die USA für Mobiltelefone bestätigte dies: In 180 Mio. Mobiltelefonen, die in den USA 2004 in Benutzung waren, befanden sich 6,2 t Gold, was 3,1 % des Goldverbrauchs der USA entspricht (basierend auf Sullivan (2006)). Bezogen auf 130 Mio. Mobiltelefone, die 2005 aus der Nutzungsphase ausgeschieden sind, ergibt sich eine Goldmenge von 3,9 t, was zumindest gut 2 % des Goldverbrauchs entspricht (Sullivan 2006). Geht man davon aus, dass diese Zahlen sich in etwa auf die globale Situation übertragen lassen, so fallen die Elektronikanwendungen bereits durch die Herausnahme von Mobiltelefonen, welche in RePro betrachtet wurden, unter das 5 %-Abschneidekriterium.

Sonstige industrielle Anwendungen sowie Münzen wurden ausgeschlossen, da ihre Anteile ebenfalls unter 5 % liegen. Ebenfalls auszuschließen war der Einsatz in der Zahntechnik, der sich mit global 2 % deutlich unterhalb des Abschneidekriteriums befindet und zudem rückläufig ist. Eine Recherche bzgl. in Zahnarztpraxen als Abfall anfallender strategischer Metalle hat außerdem ergeben, dass hier bereits eine nahezu vollständige Sammlung und Zuführung zum Recycling erfolgt. Prinzipiell gehören Zahnersatz bzw. Implantate dem Patienten, werden jedoch häufig über die Zahnarztpraxen an Recyclingunternehmen abgegeben. Die Menge beträgt hier etwa 300 Gramm Edelmetall pro Praxis und Jahr. In Einzelfällen liegt der Edelmetallanfall bei 500 bis 600 Gramm pro Jahr. In einigen Praxen werden außerdem Feinfilter eingesetzt, die Schleifstaub aus der Anfertigung der Kronen aufnehmen und für ein Recycling zur Verfügung stellen (Reiss 2012).

5.2.4.4 Ergebnisse

Es ergeben sich aufgrund der Relevanz für Gold keine Produkte zur weiteren Betrachtung

5.2.5 Palladium

Tabelle 19: Anwendungsfelder von Palladium

Anwendung	Anteil
Autokatalysatoren	50%
Elektronik	14–19%
Schmuck	11%
Zahnmedizinische Anwendungen (u.a. Dentallegierungen)	13%
Sonstige (Membranen/Katalysatoren in der Nylonproduktion und sonstigen industriellen Anwendungen, Brennstoffzelle-Wasserstoffspeicher)	7–12%

Quelle: USGS - U.S. Geological Survey; Behrendt et al. 2010; Sullivan 2006; Angerer et al. 2009; Hagelüken und Meskers 2009

5.2.5.1 Anwendung von Ausschlusskriterien

Innerhalb der Elektronikanwendungen wird Palladium hauptsächlich in keramischen Vielschichtkondensatoren eingesetzt, welche in erster Linie in Laptops und Mobiltelefonen zum Einsatz kommen (Emsley 2011; Angerer et al. 2009). Diese Produkte wurden bereits im UBA-Projekt RePro untersucht und daher hier von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Daneben findet Palladium in Festplatten zur Erhöhung der Speicherkapazität Anwendung (USGS - U.S. Geological Survey). Abzüglich der bereits durch RePro abgedeckten internen und externen Festplatten im

privaten sowie Dual-Use-Bereich ergibt sich hier eine unklare Relevanz im Bereich der Rechenzentren. Diesbezüglich wurden weitere Recherchen durchgeführt, um Aussagen bezüglich der Mengenrelevanz treffen zu können. Sonstige Anwendungen im Bereich der Elektronik sind der Einsatz als Legierungselement für Gold bei Steckkontakten und der Einsatz als Lot als Ersatz für bleihaltige Lote (Hagelüken et al. 2005). Diese Anwendungen sind von nur geringer Bedeutung und liegen unterhalb des Abschneidekriteriums (Hagelüken et al. 2005) und wurden daher von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Schmuck wurde nicht weiter betrachtet, da es hier keinen „klassischen“ Lebensweg mit Verwertung am Lebensende gibt, sondern Bestandsbildung stattfindet bzw. geschlossene Kreisläufe außerhalb des Abfallregimes bereits etabliert sind.

5.2.5.2 Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Wesentliche Nachfrageimpulse sind aus Wasserstoffspeichern und Katalysatoren für Brennstoffzellen zu erwarten (Angerer et al. 2009; American Physical Society und Materials Research Society 2011), eine Steigerung der Relevanz für das Jahr 2020 ist dennoch nicht wahrscheinlich.

5.2.5.3 Ergebnisse

Autokatalysatoren und Industriekatalysatoren ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung. Ausgehend von Wasserstoffspeichern für Brennstoffzellen sind zukünftig Nachfrageimpulse zu erwarten. Inwieweit sich hieraus bereits für das Bezugsjahr 2020 relevante Abfallmengen ergeben, blieb unklar. Weitere Betrachtungen in Verbindung mit der Analyse von Brennstoffzellen erfolgten hierzu im Rahmen der Produktanalyse. Bzgl. des Palladiumeinsatzes in Rechenzentren sind ebenfalls weiteren Recherchen durchzuführen. Zahnmedizinische Produkte werden nicht näher betrachtet (siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 0).

5.2.6 Platin

Tabelle 20: Anwendungsfelder von Platin

Anwendung	Anteil
Autokatalysatoren	42-47%
Industriekatalysatoren	20-28%
Schmuck	23-38%
Sonstige (u. a. Brennstoffzellen, zahnmedizinische Anwendungen, Medikamente und sonstige medizinische Anwendungen)	8-15%

Quelle: Buchert et al. 2009; Hagelüken et al. 2005; Classen et al. 2009; Behrendt und Erdmann 2010a; Angerer et al. 2009

5.2.6.1 Anwendung von Ausschlusskriterien

Schmuck wurde nicht weiter betrachtet, da es hier keinen „klassischen“ Lebensweg mit Verwertung am Lebensende gibt, sondern Bestandsbildung stattfindet, bzw. geschlossene Kreisläufe außerhalb des Abfallregimes bereits etabliert sind.

5.2.6.2 Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Nachfrageimpulse für Platin sind in erster Linie durch den steigenden Einsatz von Brennstoffzellen zu erwarten (Angerer et al. 2009), eine gesteigerte Relevanz für das Jahr 2020 ist aber unsicher, vor allem da Brennstoffzellen eine vergleichsweise hohe Lebensdauer haben.

5.2.6.3 Anwendung von Abschneidekriterien

Für Brennstoffzellen ist die genaue Mengenrelevanz unklar, aufgrund der zu erwartenden zukünftigen Relevanz, wurden Brennstoffzellen aber nicht von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Für zahnmedizinische Anwendungen gelten die Ausführungen in Kapitel 0. Der Einsatz in Medikamenten, der ohnehin nur in sehr geringem Maßstab stattfindet, führt zu vollständiger Dissipation in der Nutzungsphase. Dieses Anwendungsfeld eignet sich daher nicht für die weitere Analyse und wurde ausgeschlossen.

5.2.6.4 Ergebnisse

Autokatalysatoren, Industriekatalysatoren und ggf. Brennstoffzellen ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung.

5.2.7 Rhodium

Tabelle 21: Anwendungsfelder von Rhodium

Anwendung	Anteil
Autokatalysatoren	80-87%
Industriekatalysatoren	5-6%
Sonstige (technische Spiegel, Scheinwerfer, Zündkerzenelektrode, Thermoelemente, Schleifkontakte in Elektromotoren, Schweißgeräte, Heizspiralen)	8-15%

Quellen: Scharp 2009; Classen et al. 2009; Hagelüken et al. 2005; Angerer et al. 2009

5.2.7.1 Anwendung von Ausschlusskriterien

Die sonstigen Anwendungen zählen teilweise als Komponente zur Produktgruppe Automobile (Scheinwerfer, Zündkerzenelektrode, teilweise Elektromotoren).

5.2.7.2 Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Nach Angerer et al. (2009) sind keine relevanten Nachfrageimpulse für Rhodium ausgehend von Zukunftstechnologien zu erwarten.

5.2.7.3 Anwendung von Abschneidekriterien

Für die unter ‚Sonstiges‘ verbleibenden Produkte (Produkte, die nicht bereits in der Produktgruppe Fahrzeuge enthalten sind) ließ sich eine geringe Mengenrelevanz vermuten (< 5 %). Daher wurden diese von der Betrachtung ausgeschlossen.

5.2.7.4 Ergebnisse

Autokatalysatoren und Industriekatalysatoren ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung.

5.2.8 Seltene Erden

Für Seltene Erden stellte sich die Datenlage insgesamt vergleichsweise schlecht dar. Als wesentliche Quellen für die Betrachtung der Anwendungsfelder der einzelnen für das Projekt relevanten Seltenen Erden dienen Veröffentlichungen der Yale School of Forestry and Environmental Studies (Du und Graedel 2011c, 2011b, 2011a). Folgende Tabelle beinhaltet eine Übersicht der Anwendungsfelder für die Seltenen Erden insgesamt. Auf die einzelnen Metalle wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Tabelle 22: Anwendungsgebiete Seltener Erden insgesamt

Anwendung	Anteil	Wachstumsrate
Katalysatoren	22%	4-7%
Magnete	22%	10-16%
Metalllegierungen	20%	15-20%
Poliermittel	9%	6-8%
Glas	9%	vernachlässigbar
Leuchtmittel	5%	7-10%
Sonstige	13%	5-9%

Quelle: Long 2011

5.2.8.1 Yttrium

Tabelle 23: Anwendungsfelder von Yttrium

Anwendung	Anteil
Beleuchtung/ Phosphor-Leuchtmittel (Glühbirnen, Displays, TV)	45%
LCD (Leuchtmittel)	33%
Keramiken (Stabilisator für Zirkon Keramiken)	8-12%
Elektronik	~7%
Metallurgie	~2%
Laseranwendungen	~2%
Brennstoffzellen	?
Hochtemperatursupraleiter	?

Quelle: Du und Graedel 2011c, 2011b; Scharp 2009; USGS - U.S. Geological Survey; Angerer et al. 2009

Anwendung von Ausschlusskriterien

Yttriumanwendungen in Lampen und LCDs wurden im UBA-Projekt RePro betrachtet und daher hier nicht weiter berücksichtigt. Dasselbe gilt für LED-Bildschirme, das genauere Vorgehen hierzu ist im Abschnitt zu den LEDs (Kapitel 5.3.15) näher beschrieben.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Von Yttrium-Barium-Kupfer-Oxiden als Hochtemperatursupraleiter kann in den kommenden Jahren ein wesentlicher Nachfrageimpuls ausgehen (Angerer et al. 2009).

Anwendung von Abschneidekriterien

Metallurgische Anwendungen und Laseranwendungen wurden ausgeschlossen, da sie (auch zusammen) unterhalb der 5 %-Grenze liegen. Eine unklare Mengenrelevanz hat sich für Hochtemperatursupraleiter ergeben, Elektronikanwendungen liegen mit 7 % knapp oberhalb des Abschneidekriteriums, wobei in einzelnen Quellen (Du und Graedel 2011a) Elektronik nicht als Anwendungsfeld von Yttrium aufgeführt wird. In zusätzlichen Recherchen konnten lediglich Hochtemperatursupraleiter (HTS) sowie Szintillatormaterial in Röntgengeräte (Angerer et al. 2009) als Anwendungen identifiziert werden, die potenziell unter „Elektronik“ fallen, weshalb von einer Redundanz in der obigen Tabelle auszugehen ist.

Ergebnisse

Keramiken werden als Produktgruppen in der weiteren Betrachtung berücksichtigt. HTS werden aufgrund ihrer zur erwartenden zukünftigen Relevanz sowie der Relevanz für „Elektronikanwendungen“ einbezogen. Für Brennstoffzellen bestand Unklarheit bzgl. der Mengenrelevanz, hier erfolgte eine genauere Prüfung im Rahmen der Produktanalyse. Röntgengeräte wurden aufgrund ihrer Relevanz für andere Metalle untersucht.

5.2.8.2 Samarium

Tabelle 24: Anwendungsfelder von Samarium

Anwendung	Anteil
NiMH Batterien	30-72%
Militärische Anwendungen (in erster Linie Stealth-Technology für Helikopter)	0-70%
SmCo-Magnete	<1%
Düngemittel	<1%
Sonstige	0-10%

Quelle: Goonan 2011; Angerer et al. 2009; Drasch et al. 2000; Hurst 2010

Anwendung von Ausschlusskriterien

Bzgl. der Bedeutung der militärischen Anwendungsgebiete bestehen größere Unsicherheiten. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber wurden militärische Anwendungen von der näheren Betrachtung ausgeschlossen, da diese keinen konventionellen Lebenszyklus aufweisen und aus Gründen der Geheimhaltung schlechte Datenverfügbarkeit zu erwarten ist.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Leichte Nachfrageimpulse sind ggf. im Bereich der SmCo-Magnete sowie als Nd-Substitut für NdFeB-Magnete zu erwarten (Buchert et al. 2011; Angerer et al. 2009), wobei bezogen auf das Jahr 2020 nicht von einem gesteigerten Abfallaufkommen auszugehen ist, vor allem da die Anwendungen eine vergleichsweise lange Lebensdauer haben.

Anwendung von Abschneidekriterien

Düngemittel wurden aufgrund der geringen Relevanz (< 1 %) und der dissipativen Anwendung von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. SmCo-Magnete liegen ebenfalls unterhalb von einem Prozent, trotz evtl. zu erwartender leichter Nachfrageimpulse ist hier von keiner Relevanz bis 2020 auszugehen.

Ergebnisse

NiMH-Batterien ergaben sich als Produktgruppe für die weitere Betrachtung.

5.2.8.3 Europium

Tabelle 25: Anwendungsfelder von Europium

Anwendung	Anteil
Beleuchtung/Leuchtmittel (Leuchtstofflampen)	51%
LCD	37%
Plasma-Bildschirme	12%

Quelle: Du und Graedel 2011a; Bleiwas 2010

Anwendung von Ausschlusskriterien

LCD¹⁹, Leuchtmittel und Plasmabildschirme wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da sie in den Betrachtungsraum des UBA-Projektes RePro fallen.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Bzgl. zu erwartender Nachfrageimpulse waren für Europium keine Daten verfügbar.

Ergebnisse

Für Europium ergab sich nach Anwendung der Kriterien keine Produktgruppe für die weitere Analyse.

5.2.8.4 Gadolinium

Tabelle 26: Anwendungsfelder von Gadolinium

Anwendung	Anteil
Computer	32%
Audiosysteme	25%
Windenergie	15%
Automobile	15%
Sonstige (u. a. Kontrastmittel, Absorbermaterial in Kernreaktoren, Röntgengeräte)	13%

Quelle: Du und Graedel 2011a, 2011c; PatentDe

Anwendung von Ausschlusskriterien

¹⁹ Ausgenommen LCD-Bildschirme in ausschließlich gewerblichen Anwendungen, siehe Abschnitt 5.2.1.

Computer, Audiosysteme und Leuchtmittel wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da sie in den Betrachtungsraum des UBA-Projektes RePro fallen. Kontrastmittel weisen keinen konventionellen Lebenszyklus auf (dissipative Anwendung, keine Entsorgung als Abfall) und wurden daher nicht weiter betrachtet.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Für Gadolinium waren keine spezifischen Daten verfügbar, von einem steigenden Bedarf aus Permanentmagnetanwendungen wie Windenergieanlagen usw. ist aber auszugehen.

Ergebnisse

Windenergieanlagen und Automobile ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung. Von den sonstigen Anwendungen, die insgesamt rund 13 % des Gadoliniumeinsatzes ausmachen, werden die Produktgruppen Absorbermaterial in Kernreaktoren sowie Röntgengeräte in der weiteren Betrachtung berücksichtigt, da sich hier eine Mengenrelevanz (> 5 %) vermuten ließ.

5.2.8.5 Terbium

Da bei Terbium vergleichsweise hohe Differenzen zwischen den verschiedenen Quellen bestehen, sind diese in der nachfolgenden Tabelle getrennt aufgeführt.

Tabelle 27: Anwendungsfelder von Terbium

Anwendung (nach Du und Graedel 2011b)	Anteil	Anwendung (nach Buchert et al. 2011)	Anteil
Beleuchtung	27%	Leuchtmittel	89%
LCD	20%	Magnete ²⁰ , davon 5,7% Elektrofahrzeuge	11%
Computer	15%		
Sonstige (re-writable Discs, Nd-Fe-B Magnete, ...)	?		

Quelle: Buchert et al. 2011 und Du & Graedel 2011b

Für die Verteilung der NdFeB-Permanentmagnete auf Anwendungsfelder ergibt sich für Tb folgendes Bild (nach Du und Graedel 2011c):

²⁰ Tb-Einsatz in NdFeB-Permanentmagneten (Stand 2007 nach Du und Graedel 2011c): Computer 1,1 t; Audiosysteme 0,8 t; Windturbinen 0,5 t; Automobile 0,5 t; Haushaltsanwendungen 0,2 t; MRT-Geräte 0,2 t

Tabelle 28: Magnetanwendungen von Terbium

Anwendung	Anteil für Magnete (Du und Graedel 2011c)	Anteil Gesamt (bezogen auf Mengen aus Buchert et al. 2011)
Computer	35,5%	3,9%
Audiosysteme	25,8%	2,8%
Windenergieanlagen	16,1%	1,8%
Automobile	16,1%	1,8%
Haushaltsanwendung	6,5%	0,7%
MRT	6,5%	0,7%

Quelle: Du und Graedel 2011c; Buchert et al. 2011

Anwendung von Ausschlusskriterien

Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen wurden im UBA-Projekt RePro bzw. im UBA-Projekt GELLED betrachtet und fielen daher hier aus der weiteren Betrachtung heraus. Dasselbe gilt für LCDs, Dual-Use-Festplatten sowie weitere Dual-Use-Computerkomponenten. Hierdurch ist bereits ein wesentlicher Teil der Anwendungen innerhalb der Produktgruppe „Computer“ abgedeckt und es wurde davon ausgegangen, dass die verbleibenden Anwendungen unterhalb des 5 %-Abschneidekriteriums liegen.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Magnetanwendungen gelten als wesentliches zukünftiges Anwendungsfeld (Buchert et al. 2011).

Anwendung von Abschneidekriterien

Die potenziell relevanten Anwendungen - Windenergie, Automobile, Haushaltsanwendungen, MRT - liegen deutlich unterhalb der 5 %-Abschneideregulierung und machen auch in Summe lediglich etwa 5 % aus. Allerdings gelten die Magnetanwendungen gleichzeitig als wachsendes zukünftiges Anwendungsfeld.

Unklar bleibt die Mengenrelevanz des Einsatzes von Terbium in wiederbeschreibbaren Discs, wobei diese Anwendung in Buchert et al. (2011) nicht als Anwendungsgebiet aufgeführt wird. Insgesamt ist die Informationslage diesbezüglich dünn. Terbium-Eisen-Kobalt-Legierungen oder Terbium-Gadolinium-Eisen-Kobalt-Legierungen werden als Beschichtung auf wiederbeschreibbare magneto-optische (MO) Discs aufgebracht (Behrendt et al. 2007; Lipinski 2007; Virtual University 2011; chemie.de 2012). MO-Discs haben allerdings in Europa nur in sehr begrenztem Umfang Verbreitung gefunden und entsprechende Laufwerke sind mittlerweile in Europa nicht mehr erhältlich (PC-WELT 2009). Für dieses Anwendungsfeld wurde daher insbesondere bezogen auf das Jahr 2020 nicht von einer Mengenrelevanz ausgegangen.

Ergebnisse

Windenergieanlagen und Automobile wurden aufgrund der Erkenntnisse für die sonstigen Metalle in der weiteren Betrachtung berücksichtigt. Für Haushaltsanwendungen wurden im Rahmen der Produktanalysen weitere Abschätzungen bzgl. der Mengenrelevanz dieser Anwendungsfelder bezogen auf 2020 durchgeführt (siehe Kapitel 5.3). Die Betrachtung von MRTs ergab sich aus ihrer Mengenrelevanz für Dysprosium (s. u.).

5.2.8.6 Dysprosium

Tabelle 29: Anwendungsfelder von Dysprosium

Anwendungen	Anteil
Computer	33%
Audiosysteme	24-26%
Windenergieanlagen	15-16%
Automobile	12-16%
Haushaltsanwendungen	5%
MRT-Geräte	5%

Quelle: Du und Graedel 2011b, 2011c (Bei den genannten Anwendungen handelt es sich ausschließlich um Permanentmagnet-Anwendungen. Dysprosium wird zu 100 % in Magneten eingesetzt (Buchert et al. 2011)).

Anwendung von Ausschlusskriterien

Computer und Computerkomponenten (private und Dual-Use-Laptops, Computer, (interne sowie externe) Festplatten, ...) und Audiosysteme wurden ausgeschlossen, da sie im UBA-Projekt RePro betrachtet wurden. Es wurde davon ausgegangen, dass hierdurch ein Großteil abgedeckt ist und die verbleibenden Produkte unterhalb des Abschneidekriteriums liegen. Bei Haushaltsanwendungen wurden nur Elektrofahrräder und Raumklimaanlagen als relevant identifiziert, sonstige Haushaltsanwendungen weisen keine Relevanz auf.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Deutliches Wachstum der Nachfrage ist im Bereich Automobile zu erwarten (Buchert et al. 2011). Insgesamt ist für Permanentmagnete von einem wachsenden Bedarf auszugehen.

Ergebnisse

Windenergieanlagen, Automobile und MRT-Geräte ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung. Für Haushaltsanwendungen wurde im Rahmen der Produktanalyse (siehe Kapitel 5.3) eine Klärung der Mengenrelevanz für das Projekt vorgenommen.

5.2.8.7 Erbium

Tabelle 30: Anwendungsfelder von Erbium

Anwendung	Anteil
Faseroptik	75%
Laseranwendungen	20%
Optisches Glas (Lichtbrechung und Färbemittel),	5%
Neutronen-Absorber in Kernreaktoren	<1%
Legierungselement gemeinsam mit Vanadium zur Reduzierung von Härte und Steigerung der Zähigkeit	<1%

Quelle: Du und Graedel 2011b; Perez und Bank 1998; Overlack AG; Parish et al. 1999; Lide op. 2000

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Bzgl. zu erwartender Nachfrageimpulse waren für Erbium keine Daten verfügbar.

Anwendung von Abschneidekriterien

Für Neutronenabsorber in Kernreaktoren sowie der Anwendung als Legierungselement liegt nur eine geringfügige Mengenrelevanz vor. Diese Anwendungen wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Ergebnisse

Faseroptische Anwendungen, Laseranwendungen und optisches Glas ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung.

5.2.8.8 Cer

Tabelle 31: Anwendungsfelder von Cer

Anwendung	Anteil
Autokatalysatoren	35-37%
Metallurgie	28-31%
Glasadditive	16%
Sonstiges (Industriekatalysatoren, Beleuchtung, Düngemittel, Stabilisator für Keramik, NiMH-Batterien)	~20%

Quelle: Du und Graedel 2011b; USGS - U.S. Geological Survey; Long 2011

Anwendung von Ausschlusskriterien

Das Anwendungsfeld Beleuchtung fällt in den Betrachtungsraum des UBA-Projektes RePro und wurde daher von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Düngemittel werden komplett dissipativ eingesetzt und daher nicht weiter betrachtet.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Bzgl. zu erwartender Nachfrageimpulse waren für Cer keine Daten verfügbar. Ein gewisser Nachfrageimpuls könnte aus dem Bereich der Hochtemperatur-Gasturbinen für Kraftwerke erwachsen.

Anwendung von Abschneidekriterien

Aufgrund des hohen Anteils der sonstigen Anwendungen war nicht klar, ob einzelne Produktgruppen aufgrund des Abschneidekriteriums (< 5 %) von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden können.

Ergebnisse

Autokatalysatoren, metallurgische Anwendungen und Glasadditive ergaben sich als Produktgruppen für die weitere Betrachtung. Bzgl. Industriekatalysatoren und Keramiken bestanden Unklarheiten hinsichtlich ihrer Mengenrelevanz. Hier erfolgte zur Klärung eine nähere Betrachtung durch Zerlegung in einzelne Produkte. NiMH-Batterien werden aufgrund ihrer Relevanz für andere Metalle ohnehin im Projekt weiter betrachtet.

5.2.8.9 Lanthan

Tabelle 32: Anwendungsfelder von Lanthan

Anwendung	Anteil
Katalysatoren (Industrie – Petroleumraffination etwa 29%, Automobilkatalysatoren 5%)	30-34%
Metallurgie	22%
NiMH Batterien	14%
Sonstige (Beleuchtung, Kondensatoren, Düngemittel, Poliermittel)	9%

Quelle: Du und Graedel 2011b; USGS - U.S. Geological Survey

Anwendung von Ausschlusskriterien:

Lanthan wird in Anwendungen zu Beleuchtungszwecken genutzt (Energiesparlampen, Leuchtstoffröhren, Hintergrundbeleuchtung von LCD-Bildschirmen in privaten Geräten oder Dual-Use-Anwendungen, vgl. Buchert et al. 2012). Diese Produkte wurden im UBA-Projekt RePro betrachtet. Kondensatoren mit Lanthanzusatz werden unter anderem in Mobiltelefonen und Smartphones eingesetzt, welche ebenfalls in „RePro“ betrachtet wurden. Düngemittel werden komplett dissipativ eingesetzt und wurden daher von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Für evtl. verbleibende Produkte (insb. Lanthan in Kondensatoren), welche nicht im UBA-Projekt RePro untersucht wurden, wird davon ausgegangen, dass diese unterhalb des Abschneidekriteriums von 5 % liegen.

Bedeutung für Zukunftstechnologien (Zeithorizont 2020)

Bzgl. zu erwartender Nachfrageimpulse waren für Lanthan keine Daten verfügbar.

Anwendung von Abschneidekriterien

Bei den sonstigen Anwendungen ist abzüglich der Anwendungen wie Beleuchtung, Kondensatoren und Düngemittel von einer nur geringen Mengenrelevanz für den Einsatz als Poliermittel (< 5 %) auszugehen. Dieses Anwendungsgebiet wurde daher von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Ergebnisse

Industrie- und Automobilkatalysatoren, metallurgische Anwendungen und NiMH-Batterien ergaben sich als Produktgruppen bzw. Produkte für die weitere Betrachtung.

5.2.9 Ergebnisse

Aufgrund der obigen Ausführungen ergaben sich die im Folgenden dargestellten Produktgruppen für die weitere Betrachtung. Polierschlämme, optische Gläser und Glasadditive stellen eher Produkte als Produktgruppen dar und wurden in einer Produktgruppe „Anwendungen der optischen Industrie“ zusammengefasst. Ebenso wurde für MRTs und Röntgengeräte vorgegangen, die in einer Produktgruppe „Medizintechnische Geräte“ zusammengefasst wurden. Wie erwähnt, bestehen bei manchen Produktgruppen Unsicherheiten bzgl. der (Mengen-) Relevanz. Dies findet bei den folgenden Schritten (Zerlegung der Produktgruppen in Produkte) Berücksichtigung. Ferner sei hier noch mal an die Einschränkungen bezüglich der Vollständigkeit und Aussagekraft über den Zeitpunkt 2020 hinaus erinnert (siehe Abschnitt 5.1.1.1).

Tabelle 33: Ergebnisse der Produktgruppenidentifizierung

Zur weiteren Betrachtung	Voraussichtlich relevante Metalle ²¹
Industriekatalysatoren	Ge, Pd, Pt, Rh, (Ce), La
Autokatalysatoren	Pd, Pt, Rh, Ce, La
Metallurgie/Legierungen (Mischmetall)	Ce, La
Batterien	Sm, Ce, La
Anwendungen der optischen Industrie	Er, Ce
Laseranwendungen	Er
Windenergie	Gd, (Tb), Dy
Automobile	Gd, (Tb), Dy
Medizintechnische Geräte	(Tb), Dy, Gd, (Y)
Brennstoffzellen	(Pt, Pd, Y)
Optische Faseranwendungen	Ge, Er
Photovoltaik	Ga, Ge, In
LEDs	Ga, In
Haushaltsanwendungen	(Tb, Dy)
Keramiken	Y, (Ce)
Absorbermaterial und Kontrollstäbe in Kernreaktoren	In, Gd
Hochtemperatursupraleiter	Y
Rechenzentren	(Pd)

5.3 Produktidentifizierung und -analyse

Entsprechend der im Abschnitt 5.1.1.3 dargestellten Methodik erfolgt im Folgenden die Analyse der einzelnen identifizierten Produkte in Bezug auf die im Bezugsjahr 2020 in Deutschland potenziell als Abfall anfallenden Mengen strategischer Metalle.

5.3.1 Industriekatalysatoren

Die Produktgruppenidentifizierung hat folgende strategische Metalle identifiziert, die im Jahr 2020 potenziell relevante Mengen in Abfallströmen aufweisen: Germanium, Lanthan, Cer, Platin, Rhodium und Palladium.

5.3.1.1 Produktidentifizierung

Die Identifizierung der innerhalb der Produktgruppe relevanten Produkte erfolgte auf dieser Basis jeweils einzeln für die Metalle der Seltenen Erden (Cer und Lanthan), die Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium) sowie für Germanium.

Seltene Erden

²¹ Metalle, für die die Produktgruppenidentifizierung eine unklare Relevanz ergeben hat, sind in Klammern dargestellt.

Für Cer ergab sich aus der Produktgruppenidentifizierung eine unklare Mengenrelevanz, für Lanthan zeigte sich bereits eine Relevanz von Katalysatoren der Petroleumraffination (fluid catalytic cracking (FCC)), die etwa 29 % des Lanthaneinsatzes ausmachen. Daten des USGS zeigen FCC-Katalysatoren als einziges katalytisches Einsatzfeld für Seltene Erdoxide²², Automobilkatalysatoren ausgenommen (Goonan 2011), was mit anderweitigen Angaben übereinstimmt (Yang 2003; U.S. Department of Energy 2010). Bei Ceroxid (CeO_2) betrug der Einsatz in FCC in 2008 1.980 Tonnen, was 4,7 % des gesamten CeO_2 -Einsatzes entspricht. Bei Lanthanoxid (La_2O_3) betrug die Menge 17.800 Tonnen in 2008 (Goonan 2011). Andere Quellen geben einen jährlichen Gesamteinsatz von Seltenen Erden für FCC-Katalysatoren von 7.550 Tonnen pro Jahr an (U.S. Department of Energy 2010). Andere Seltene Erden weisen keine Bedeutung für Industriekatalysatoren auf (Goonan 2011).

Sonstige cer- und lanthanhaltige Katalysatoren wie Platin-Cer Katalysatoren zum Dampfreformieren von Ethanol (SRE) (Chiou et al. 2012), Cer-Gold bzw. Cer-Kupfer Katalysatoren für die „water-gas-shift“-Reaktion (Ayastuy et al. 2010; Jacobs et al. 2005) und $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Katalysatoren mit Cer- bzw. Lanthanzusatz für die Wasserstoffherstellung aus Diesel (Alvarez-Galvan et al. 2008) wurden zwar untersucht. Für einen tatsächlichen relevanten Einsatz finden sich jedoch keine Anhaltspunkte.

Für Cer und Lanthan ergaben sich also FCC-Katalysatoren als das relevante Produkt innerhalb der Produktgruppe Industriekatalysatoren für die weitere Analyse.

Platingruppenmetalle

Die Produktgruppenidentifizierung hat die Anwendung von Platin, Rhodium und Palladium in Industriekatalysatoren aufgezeigt, wobei sich für Palladium noch keine eindeutig quantifizierte Mengenrelevanz gezeigt hatte, während sich dies bei Platin (20 - 28 % des Platineinsatzes) und Rhodium (5 - 6 % des Rhodiumeinsatzes) bereits aus der Produktgruppenidentifizierung ergeben hatte. Untersuchungen bzgl. der Stoffflüsse von Platingruppenmetallen in Europa belegen die Bedeutung dieses Anwendungsfeldes (vgl. Saurat und Bringezu 2008).

Eine nähere Betrachtung für Palladium zeigte auch hier eine Mengenrelevanz oberhalb des eingangs formulierten Abschneidekriteriums (5 % der Gesamtverwendung) auf. Nach Wittmer et al. (2011a) wurden 2008 weltweit rund 13,3 Tonnen Palladium in Industriekatalysatoren eingesetzt, was ca. 6 % entspricht. Für Europa lag der Anteil mit 3,3 Tonnen etwas höher bei ca. 7 %.

In einer umfangreichen Untersuchung zu den Stoffströmen der Platingruppenmetalle (PGM) (Hagelüken et al. 2005) finden sich detaillierte Informationen zum PGM-Einsatz in Industriekatalysatoren und anderen Anwendungsgebieten. Eine Übersicht über den Einsatz von Platin, Rhodium und Palladium in verschiedenen Typen von Industriekatalysatoren in Deutschland findet sich in Tabelle 34. Neben einer Abschätzung des jährlichen Materialeinsatzes an Rhodium, Platin und Palladium nach Katalysatortypen finden sich in Hagelüken et al. (2005) Prognosen zu der jährli-

²² Sonstige Anwendungen, unter denen sich ggf. andere katalytische Anwendungen befinden, machen für Ceroxid unter 7 %, für Lanthanoxid unter 4 % aus.

chen Marktentwicklung bis 2020. Anhand dieser Prognosen wurde eine Extrapolation des Materialeinsatzes im Jahr 2011 und im Jahr 2020 vorgenommen, um Aussagen zur Mengenrelevanz der verschiedenen Katalysatorarten treffen zu können. Da aus der Studie nicht eindeutig hervorgeht, auf welches Stichjahr sich die Angaben beziehen, wurde hier mit einer Spanne von 2002 bis 2004 gerechnet. Die entsprechenden Berechnungen finden sich ebenfalls in Tabelle 34. Für die meisten Katalysatoren wurde von einem etwa gleichbleibenden Einsatz ausgegangen, für andere Katalysatoren wurde eine jährliche Zunahme von etwa 5 % erwartet.

Tabelle 34: PGM Einsatz in Industriekatalysatoren

Anwendungsfeld	Bruttoeinsatz in kg/a	Gesamtinventar in D in kg	Marktentwicklung bis 2020 in %/a	Bruttoeinsatz 2011 extrapoliert	Bruttoeinsatz 2020 extrapoliert
Raffineriekatalysatoren (Pt)	830	4.150	+/-0	830	830
Raffineriekatalysatoren (Pd)	90	480	+/-0	90	90
Salpetersäureherstellung (Pt)	760	570	+/-0	760	760
Salpetersäureherstellung (Pd)	200	150	+/-0	200	200
Salpetersäureherstellung (Rh)	40	30	+/-0	40	40
Blausäureherstellung (Pt)	180	135	+/-0	180	180
Blausäureherstellung (Rh)	20	15	+/-0	20	20
Pulverkatalysatoren (Pt)	350	120	+5	492-543	764-842
Pulverkatalysatoren (Pd)	3.150	1.050	+5	4.432-4.887	6.876-7.581
Fest-/Wirbelbett-Katalysatoren (Pt)	80	320	+/-0	80	80
Fest-/Wirbelbett-Katalysatoren (Pd)	720	2.900	+/-0	720	720
Homogene Katalyse (Pt)	1.500	750	+5	2.111-2.327	3.274-3.610
Homogene Katalyse (Pd)	75	35	+5	106-116	164-180
Homogene Katalyse (Rh)	390	195	+5	549-605	851-939
Umweltkatalysatoren BHKV/KNV (Pt)	25 (10/15)	150 (60/100)	+/-0	25	25

Quelle: Hagelüken et al. 2005 und eigene Berechnungen

Anhand der Abschätzung des zukünftigen Materialeinsatzes ergaben sich Rangordnungen für Mengenrelevanz der identifizierten Katalysatorarten, die für die Reihenfolge der Durchführung der folgenden Produktanalyse von Bedeutung sind.

Für Platin weisen Katalysatoren der homogenen Katalyse die höchste Mengenrelevanz auf (siehe hierzu Tabelle 34), gefolgt von Raffineriekatalysatoren. Bzgl. des dritten Ranges ergab sich nach der o. g. Extrapolation kein eindeutiges Bild, da im Basisjahr und (extrapoliert) in 2011 der Platineinsatz in Katalysatoren zur Salpetersäureherstellung noch über dem Platineinsatz in Pulverkatalysatoren liegt, während sich in 2020 die Situation geändert haben könnte und Pulverkatalysatoren den höheren Materialeinsatz ausmachen könnten. Für die Produktanalyse wurden die Pulverkatalysatoren an die dritte Stelle gesetzt, da aufgrund der vergleichsweise kurzen Lebensdauer von Industriekatalysatoren von meist unter einem Jahr die Inverkehrbringung kurz vor dem

Stichjahr 2020 von größerer Bedeutung ist, zum anderen bei der Annahme eines gleichbleibenden Wachstums des Marktes für Pulverkatalysatoren der Unterschied in den folgenden Jahren noch weiter zunehmen würde.

Tabelle 35: Relevante Industriekatalysatorarten für Platin

Anwendungsfeld	Bruttoeinsatz in kg/a	Bruttoeinsatz 2011 extrapoliert	Bruttoeinsatz 2020 extrapoliert
Homogene Katalyse (Pt)	1.500	2.111-2.327	3.274-3.610
Raffineriekatalysatoren (Pt)	830	830	830
Pulverkatalysatoren (Pt)	350	492-543	764-842
Salpetersäureherstellung (Pt)	760	760	760
Blausäureherstellung (Pt)	180	180	180
Fest-/Wirbelbett-katalysatoren (Pt)	80	80	80
Umweltkatalysatoren BHKV/KNV (Pt)	25 (10/15)	25	25

Quelle: nach Hagelüken et al. 2005

Wie für Platin haben für Rhodium die Katalysatoren der homogenen Katalyse die höchste Mengenrelevanz (vgl. Tabelle 36). Mit deutlichem Abstand folgen die Katalysatoren der Salpetersäureherstellung sowie der Blausäureherstellung.

Tabelle 36: Relevante Industriekatalysatorarten für Rhodium

Anwendungsfeld	Bruttoeinsatz in kg/a	Bruttoeinsatz 2011 extrapoliert	Bruttoeinsatz 2020 extrapoliert
Homogene Katalyse (Rh)	390	549-605	851-939
Salpetersäureherstellung (Rh)	40	40	40
Blausäureherstellung (Rh)	20	20	20

Quelle: nach Hagelüken et al. 2005

Bei Palladium weisen Pulverkatalysatoren für alle betrachteten Jahre die höchste Mengenrelevanz auf (vgl. Tabelle 37). An zweiter Stelle folgen Fest- und Wirbelbettkatalysatoren, an dritter Stelle Katalysatoren zur Salpetersäureherstellung. Katalysatoren der homogenen Katalyse und Raffineriekatalysatoren weisen eine geringere Mengenrelevanz auf und belegen die Ränge vier und fünf.

Tabelle 37: Relevante Industriekatalysatorarten für Palladium

Anwendungsfeld	Bruttoeinsatz in kg/a	Gesamtinventar in D in kg	Marktentwicklung bis 2020 in %/a	Bruttoeinsatz 2011 extrapoliert	Bruttoeinsatz 2020 extrapoliert
Pulverkatalysatoren (Pd)	3.150	1.050	+5	4.432-4.887	6.876-7.581
Fest-/Wirbelbett-katalysatoren (Pd)	720	2.900	+/-0	720	720
Salpetersäureherstellung (Pd)	200	150	+/-0	200	200
Homogene Katalyse (Pd)	75	35	+5	106-116	164-180

Anwendungsfeld	Bruttoein- satz in kg/a	Gesamtinven- tar in D in kg	Marktent- wicklung bis 2020 in %/a	Bruttoeinsatz 2011 extra- poliert	Bruttoein- satz 2020 extrapoliert
Raffinerie-katalysatoren (Pd)	90	480	+/-0	90	90

Quelle: nach Hagelüken et al. 2005

Germanium

Die Produktgruppenidentifizierung hatte bereits Polymerisationskatalysatoren in der PET Herstellung als konkrete katalytische Anwendung von Germanium aufgezeigt. Auch USGS Daten nennen den Einsatz von Germanium in Polykondensationskatalysatoren für die Polymerisation von PET als derzeit einziges relevantes katalytisches Anwendungsfeld (Butterman und Jorgenson 2004), obgleich für die Zukunft ein Einsatz in Katalysatoren zur Herstellung von Fluorkohlenwasserstoffen (FKWs) erwartet wird, welcher derzeit sowie bezogen auf das Stichjahr 2020 noch keine Relevanz hat.

Für Germanium ergaben sich also Polymerisationskatalysatoren als das relevante Produkt für die weitere Analyse. Für den Zeitraum jenseits des Jahres 2020 müsste allerdings zumindest die FKW-Katalyse als Anwendungsfall vertieft untersucht werden. Bis 2020 sind somit die im Folgenden bilanzierten Metallmengen im Rahmen der weiter oben skizzierten Unsicherheiten eher gut abgeschätzt, zumindest kann keine grundsätzliche Tendenz (zu hoch - zu niedrig) angegeben werden. Für die Zeit nach 2020 nehmen die Germanium-Mengen in der Anwendung als Katalysator potenziell zu.

5.3.1.2 Produktanalyse

Katalysatoren sind von entscheidender Bedeutung für die Industrie, so werden bspw. über 75 % der Produktionsmenge aller Chemikalien unter Verwendung von Katalysatoren hergestellt, bzw. bei Neuentwicklungen sogar über 90 % (Hassan 2001). Schätzungsweise werden etwa 85 - 95 % aller Chemieanlagen mit einem Katalysator betrieben (Weitkamp und Gläser 2004-2006), wo Katalysatoren ein entscheidender Einflussfaktor für die Anlageneffizienz sind. Die Anwendungsfelder von Katalysatoren lassen sich einteilen in Polymerisation, Umweltschutz, Chemie inkl. Petrochemie und Raffinerietechnik (Weitkamp und Gläser 2004-2006). Im Bereich der Polymerisation sind hier die Ge-haltigen Polymerisationskatalysatoren von Bedeutung. PGM-haltige Katalysatoren finden sich in den drei Bereichen Raffinerietechnik, Chemie und Umweltschutz. Die SE-haltigen Katalysatoren zum katalytischen Cracken sind ebenfalls der Raffinerietechnik zuzuordnen.

Katalysatoren haben eine begrenzte Lebensdauer (Standzeit), nach der sie ersetzt werden, die durch die Geschwindigkeit ihrer sog. Deaktivierung bestimmt wird. Dieser Verlust der Aktivität ergibt sich laut Hassan (2001) aus der Vergiftung durch Katalysatorgifte wie H₂S, COS, As, Pb, Hg usw., dem Sintern als einer thermischen Zersetzung des Katalysators, durch Ablagerungen auf der Katalysatoroberfläche und dem Verlust über die Dampfphase. Die hier relevanten Metalle können prinzipiell auf zwei Wegen aus der Nutzung ausscheiden: entweder sie werden als verbrauchte Katalysatoren aus dem Prozess entfernt (nach Ablauf der Standzeit) oder sie verbleiben im Produkt. In geringem Umfang können Katalysatoren auch als Emissionen aus dem Prozess entweichen (Hassan 2001). Als Beispiele finden sich hierzu in Hassan (2001) das Entweichen mit Abgasen, Abwässern und festen Rückständen, das Entweichen während der Reinigung und der In-

standhaltung sowie beim Austauschen der Katalysatoren sowie das Entweichen während der Regenerierung der Katalysatoren aus der Regenerierungsstufe. Eine Relevanz solcher Katalysatorremissionen für die hier durchgeführte Analyse hat sich jedoch nicht ergeben.

Katalysatoren lassen sich einteilen in kompakte Katalysatoren, d. h. Katalysatoren, die frei von Poren sind, und poröse Feststoffkatalysatoren bzw. weiter in Vollkatalysatoren und Trägerkatalysatoren, wobei den Trägerkatalysatoren die größere wirtschaftliche Bedeutung zukommt (Weitkamp und Gläser 2004-2006; Landesanstalt für Umwelt 2012). Trägerkatalysatoren haben neben dem aktiven Katalysatormaterial ein Trägermaterial, auf das das aktive Material aufgebracht wird. Aluminiumoxid ist das am meisten eingesetzte Trägermaterial (Hassan 2003), eine Übersicht sonstiger eingesetzter Trägermaterialien findet sich bspw. in (Landesanstalt für Umwelt 2012; Hassan 2001). Vollkatalysatoren sind bspw. die in der Salpetersäureherstellung eingesetzten Pt/Rh-Netze (Hassan 2001).

Analog zur Identifizierung der relevanten Katalysatortypen (vgl. Abschnitt 5.3.1) erfolgt im Folgenden die Produktanalyse getrennt für die PGM-haltigen, die SE-haltigen und die Ge-haltigen Industriekatalysatoren.

5.3.2 PGM-haltige Katalysatoren

Bei den PGM-haltigen Katalysatoren wurde, im Prinzip seit diese eingesetzt werden, auch der Relevanz einer Rückgewinnung der enthaltenen Metalle Beachtung geschenkt, was im hohen ökonomischen Wert der Metalle begründet liegt (vgl. Hassan 2001). Die mit dem Einsatz PGM-haltiger Katalysatoren verbundenen Stoffflüsse sind vergleichsweise gut dokumentiert. Als wesentliche Datenquelle lässt sich hier die Studie „Stoffströme der Platingruppenmetalle - Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle“ nennen, welche gemeinsam von Umicore und dem Ökoinstitut gefördert vom BMBF erarbeitet wurde (Hagelüken et al. 2005). In der Studie sind detaillierte Daten zu den über Industriekatalysatoren in Verkehr gebrachten Mengen, zu deren Lebensdauern sowie zur Recyclingsituation aufgeführt. Zusätzliche Informationen lassen sich (Hagelüken 2005, 2010; Hagelüken und Meskers 2009; Hassan 2001, 2003) entnehmen. Da aus den Studien - insbesondere (Hagelüken et al. 2005) - direkt Angaben zu den in Verkehr gebrachten Metallmengen verfügbar sind, muss nicht über die in Verkehr gebrachten Produktmengen und die Metallkonzentration im Produkt vorgegangen werden. Für einen Export aus der Nutzungsphase in relevantem Maßstab gibt es keinerlei Anhaltspunkte. Im Gegensatz zeigen sich für die meisten Katalysatorarten relativ geschlossene Kreisläufe (vgl. Hassan 2001, 2003; Hagelüken et al. 2005), weshalb Exporte aus der Nutzungsphase zu vernachlässigen sind. Eine Übersicht über die relevanten Parameter, Verweildauer und in Verkehr gebrachte Metallmengen, beinhaltet die folgende Tabelle.

Tabelle 38: PGM Einsatz in Industriekatalysatoren

Anwendungsfeld	Verweildauer (a)	Inverkehrbringung (kg/a)			Bezugsjahr, Anmerkungen
Raffineriekatalysatoren	5 - 10	Pt: 830	Pd: 90		2012, Inverkehrbringung konstant
Salpetersäureherstellung	0,5 - 1	Pt: 760	Pd: 200	Rh: 40	2019/2020, Inverkehrbringung konstant
Blausäureherstellung	0,5 - 1	Pt: 180	-	Rh: 20	2019/2020, Inverkehrbringung konstant
Pulverkatalysatoren	0,1	Pt: 764-842	Pd: 6.876-7.581	-	2020, Inverkehrbringung +5%/a; Berechnung siehe 5.3.1
Fest-/Wirbelbett-Katalysatoren	3-5	Pt: 80	Pd: 720	-	2016/2016, Inverkehrbringung konstant
Homogene Katalyse	0,5	Pt: 3.274-3.610	Pd: 164-180	Rh: 851-939	2020, Inverkehrbringung +5%/a; Berechnung siehe 5.3.1
Umweltkatalysatoren BHKV/KNV	6	Pt: 25	-	-	2014, Inverkehrbringung konstant

Quelle: Hagelüken et al. 2005 und eigene Berechnungen

Anmerkung: Das Jahr, auf das sich die Inverkehrbringung bezieht, ergibt sich jeweils aus der Verweildauer der Produkte. Aufgeführt ist jeweils die Menge des Jahres, das für das Stichjahr 2020 die größte Relevanz aufweist, wobei bei einigen Katalysatoren die in Verkehr gebrachten Mengen konstant sind.

Aufgrund der Metallmengen ergäben sich für die verschiedenen Metalle unterschiedliche Reihenfolgen zur Produktanalyse:

Tabelle 39: Analysereihenfolge PGM-haltige Industriekatalysatoren

	Platin	Palladium	Rhodium
1.	Homogene Katalyse	Pulverkatalysatoren	Homogene Katalyse
2.	Raffineriekatalysatoren	Fest-/Wirbelbett-Katalysatoren	Salpetersäureherstellung
3.	Pulverkatalysatoren	Salpetersäureherstellung	Blausäureherstellung
4.	Salpetersäureherstellung	Homogene Katalyse	
5.	Blausäureherstellung	Raffineriekatalysatoren	
6.	Fest-/Wirbelbett-Katalysatoren		
7.	Umweltkatalysatoren BHKV/KNV		

Die Bedeutung der Reihenfolge zur Produktanalyse ergibt sich aus dem definierten Abbruchkriterium, welches in Abschnitt 5.1.1.3 dargestellt wurde. Da die für die Analyse relevanten Daten allerdings vollständig in Hagelüken et al. (2005) vorliegen, wird auf die Anwendung des Abbruchkriteriums verzichtet und alle genannten PGM-haltigen Katalysatorarten werden bzgl. der Metallmengen in 2020 analysiert. Gegenüber den anderen analysierten Produkten ist die Erfassung der Metallmengen daher vollständiger, aufgrund der nicht mehr ganz jungen Daten allerdings geringfügig weniger zuverlässig. Da die Dynamik in diesem Anwendungsfeld als eher langsam angesehen werden kann, sehen wir diesen Fehler als vertretbar an. Die Analyse erfolgt entsprechend der Reihenfolge in oben stehender Tabelle für Platin.

5.3.2.1 **Katalysatoren der homogenen Katalyse**

PGM-haltige Katalysatoren der homogenen Katalyse sind für Prozesse der organische sowie der anorganischen Chemie von Bedeutung (Büchel et al. 1999). Katalysatoren mit Rhodium kommen hierbei in erster Linie in der organischen Chemie zum Einsatz (wesentliche Einsatzbereiche: Hydroformulierungsreaktionen, Carbonylierung und Hydrierung) ebenso wie palladiumhaltige homogene Katalysatoren (wesentliche Einsatzbereiche: Direktoxidation von Ethylen zu Acetaldehyd, C-X-Kopplung) (Hagelüken et al. 2005). Platinhaltige Katalysatoren der homogenen Katalyse hingegen werden schwerpunktmäßig in der anorganischen Chemie eingesetzt (wesentliche Einsatzbereiche: Modifizierung von Silanen und Silikonen) (Hagelüken et al. 2005).

Wie in

Tabelle 38 dargestellt, weist die Katalysatorart eine Lebensdauer von etwa einem halben Jahr auf. Entsprechend wird auf die Anwendung der Weibullverteilung verzichtet. Die in 2020 anfallende Metallmenge entspricht in etwa der Menge der Inverkehrbringung im Jahr 2020, wobei hier zusätzlich vergleichsweise hohe dissipative Verluste in der Nutzungsphase zu berücksichtigen sind. Generell hängen diese hohen Verluste damit zusammen, dass der Katalysator aus der homogenen Phase schwer zu trennen ist, da er in der Reaktionsmischung gelöst ist (Hassan 2001). Die Verluste belaufen sich laut Hagelüken et al. (2005) auf 79 % bei Platin, 9 % bei Rhodium und 48 % bei Palladium. Die hohen Verluste bei Platin resultieren im Wesentlichen daraus, dass bei der Vernetzung von Silikonen der eingesetzte Platinkatalysator vollständig im Produkt verbleibt, eine Rückgewinnung aufgrund der geringen Konzentration im Produkt von 3 - 100 ppm nicht realisierbar ist (Hagelüken et al. 2005). Die Verluste bei Palladium ergeben sich daraus, dass der Rücklauf der verbrauchten Katalysatoren nicht immer erfolgt, da es sich um Prozesse mit kleineren Katalysatoreinsatzmengen handelt (Hagelüken et al. 2005). Diese Verluste betreffen somit die Sammlung und sind entsprechend hier nicht weiter zu berücksichtigen, sondern werden im folgenden Arbeitspaket aufgegriffen.

Für die einzelnen Metalle ergaben sich hieraus folgende zu erwartende Abfallmengen in 2020:

- Platin: 3.274 - 3.610 kg in 2020, um Verluste korrigiert: 688 - 758 kg in 2020
- Palladium: 164 - 180 kg in 2020
- Rhodium: 851 - 939 kg in 2020, um Verluste korrigiert: 774 - 854 kg in 2020

5.3.2.2 Raffineriekatalysatoren

PGM-haltige Katalysatoren kommen in Raffinerien in großtechnischen Prozessen mit großen Jahresproduktionsmengen zum Einsatz (Hagelüken et al. 2005). Die Hauptkonversions- und Veredelungsprozesse sind hier das Fluid-catalytic-cracking (FCC), das thermische Cracken, das katalytische Reforming und die Isomerisierung (Hagelüken et al. 2005; Hassan 2001). Katalytisches Reforming, Isomerisierung und Hydrocracking-Prozesse werden mit PGM-haltigen Katalysatoren betrieben (Hagelüken et al. 2005). FCC-Katalysatoren, die Seltene Erden enthalten, werden gesondert betrachtet (siehe Abschnitt 5.3.3).

Die Standzeit der Katalysatoren schwankt zwischen vier und zehn Jahren, wobei für Deutschland von im Mittel fünf Jahren auszugehen ist (Hagelüken et al. 2005). Da jedoch von einer konstanten Inverkehrbringung auszugehen ist (vgl. Hagelüken et al. 2005) kann bei der Betrachtung der PGM-haltigen Raffineriekatalysatoren auf die Anwendung der Weibullverteilung verzichtet werden, da diese bei konstanten Inverkehrbringungen keine Abweichungen zur Berechnung mit durchschnittlichen Lebensdauern aufweist. Dissipative Verluste in der Nutzungsphase liegen bei etwa 1,5 % für Platin und Palladium (Hagelüken et al. 2005).

Entsprechend ergaben sich folgende Metallmengen für das Jahr 2020:

- Platin: 830 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 818 kg in 2020
- Palladium: 90 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 88,7 kg in 2020

5.3.2.3 Pulverkatalysatoren

Pulverkatalysatoren kommen in zahlreichen Prozessen der Feinchemie (Herstellung von Vitaminen, Duft- und Farbstoffen, Antibiotika etc.) zum Einsatz (Hagelüken et al. 2005). Die PGM-Konzentration beträgt rund 5 %, unter den Trägermaterialien hat Aktivkohle einen Anteil von 98 % (Hagelüken et al. 2005).

Pulverkatalysatoren weisen eine geringe Lebensdauer von etwa 0,1 Jahr auf (vgl.

Tabelle 38). Entsprechend dem Vorgehen bei den Katalysatoren der homogenen Katalyse wird daher die als Abfall zu erwartende Metallmenge in 2020 der in Verkehr gebrachten Menge in 2020 gleichgesetzt. Dissipative Verluste in der Nutzungsphase betragen etwa 2 - 3 % des eingesetzten Materials (Hagelüken et al. 2005).

Für die einzelnen Metalle ergaben sich folgende Metallmengen:

- Platin: 764 - 842 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 741 - 825 kg in 2020
- Palladium: 6.786 - 7.581 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 6.582 - 7.429 kg in 2020

5.3.2.4 Katalysatoren zur Salpetersäureherstellung

Salpetersäure ist eine wichtige Grundchemikalie für eine Vielzahl komplexer Säuren, von Ammoniumnitratdüngemitteln und Nitratsprengstoff (Heraeus Precious Metals GmbH 2013). Zentraler Prozess der Salpetersäureherstellung ist die katalytische Oxidation von Ammoniak an Kontaktnetzen, die meist aus Platin und Rhodium im Verhältnis 95:5 bestehen (Hagelüken et al. 2005), wobei sich auch andere Verhältnisse wie 98:2, 90:10 oder auch 90:5:5 (Pt:Rh:Pd) finden (Heraeus Precious Metals GmbH 2013).

Die Katalysatoren zeigen eine Verweildauer von unter einem Jahr mit konstanter Inverkehrbringung, weshalb die zu erwartende Abfallmenge mit der jährlichen in Verkehr gebrachten Menge gleichgesetzt wurde. Zusätzlich wurden dissipative Verluste in der Nutzungsphase berücksichtigt. Diese betragen etwa 6 % für Platin und 30 % für Palladium (Hagelüken et al. 2005). Grund für die Verluste sind kontinuierliche Metallverschleppungen. Diese Verluste werden mit Hilfe von Pd-Getternetzen zu einem großen Teil wiedergewonnen (Hagelüken et al. 2005). Diese Systeme können typischerweise mehr als 80 % des verflüchtigten Platins zurückgewinnen (Heraeus Precious Metals GmbH 2013), was zu den vergleichsweise geringen Gesamtverlusten von 6% führt. Gleichzeitig verlieren die Getternetze während des Einsatzes Palladium, jedoch in deutlich geringerem Umfang als Platin aufgefangen wird (Heraeus Precious Metals GmbH 2013). Hagelüken beziffert dieses Verhältnis auf 3 kg Pd-Verlust pro 10 kg rückgewonnenes Platin (Hagelüken et al. 2005).

Hieraus ergaben sich für die einzelnen Metalle:

- Platin: 760 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 714 kg in 2020
- Palladium: 200 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 140 kg in 2020
- Rhodium: 40 kg in 2020, Verluste vernachlässigbar

5.3.2.5 Katalysatoren zur Blausäureherstellung

Blausäure wird im Andrussow-Verfahren hergestellt, die hier eingesetzten katalytischen Netze haben ein Verhältnis von Pt zu Rh von 95:5 bis 90:10, seltener kommen auch Netze mit 90:5:5 (Pt:Rh:Pd) zum Einsatz (Heraeus Precious Metals GmbH 2013).

Die Standzeit der Katalysatoren liegt unter einem Jahr bei konstanter Inverkehrbringung, weshalb in der Analyse die zu erwartende Abfallmenge der in Verkehr gebrachten Menge gleichgesetzt wurde. Zusätzlich werden dissipative Verluste berücksichtigt, welche unterhalb von 10 % liegen (Hagelüken et al. 2005), wobei hier als konservative Näherung 10 % Verluste angesetzt wurden. Im Gegensatz zur Salpetersäureherstellung findet aufgrund der vergleichsweise geringen Verluste im Prozess keine Rückgewinnung statt (Hagelüken et al. 2005).

Hieraus ergaben sich für die einzelnen Metalle:

- Platin: 180 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 162 kg in 2020

- Rhodium: 20 kg in 2020, korrigiert um Verluste: 18 kg in 2020

5.3.2.6 Fest-/Wirbelbettkatalysatoren

Fest- und Wirbelbettkatalysatoren kommen in zahlreichen Prozessen der chemischen Industrie zum Einsatz. Wichtige Einzelprozesse sind hier laut Hagelüken et al. (2005) bspw. die Herstellung von Vinylacetatmonomeren, die Herstellung von PTA (Purified Terephthalic Acid) oder die Blausäuresynthese nach dem Degussa-Verfahren.

Die Verweildauer bzw. Standzeiten betragen zwischen drei und fünf Jahren. Aufgrund der konstanten Inverkehrbringung konnte aber auch hier auf die Anwendung der Weibullverteilung verzichtet werden. Verluste im Prozess treten nicht in nennenswertem Maßstab auf.

Die Metallmengen ergaben sich wie folgt:

- Platin: 80 kg in 2020
- Palladium: 720 kg in 2020

5.3.2.7 Umweltkatalysatoren

Unter Umweltkatalysatoren fallen Katalysatoren, deren Anwendung darauf abzielt, die Auswirkungen von Prozessen auf die Umwelt zu reduzieren. Wichtige Einsatzgebiete sind bspw. Blockheizkraftwerke (BHKW) und die katalytische Nachverbrennung (KNV). Letztere spielt beispielsweise in Kaffeeröstereien, Lackieranlagen und Druckereien eine Rolle (Hagelüken et al. 2005). Auch die Autoabgaskatalysatoren fallen im Prinzip unter die Umweltkatalysatoren, werden aber im Abschnitt zu Automobilen getrennt betrachtet.

Die durchschnittliche Verweildauer von Umweltkatalysatoren beträgt etwa sechs Jahre. Da aber auch hier von einer konstanten Inverkehrbringung auszugehen ist, wurde ebenfalls keine Weibullverteilung angewandt.

Folgende Metallmenge ergab sich:

- Platin: 25 kg in 2020.

5.3.2.8 Metallmengen in 2020 aus PGM-haltigen Industriekatalysatoren

Anhand der Metallmengen für die einzelnen Katalysatorarten ließ sich für jedes Metall die insgesamt im Jahr 2020 zu erwartende Menge bestimmen. Es ergaben sich die in Tabelle 40 dargestellten Mengen.

Tabelle 40: Metallmengen in 2020 aus PGM-haltigen Katalysatoren

Element	Metallmenge in 2020 [kg]
Pt	3.228 - 3.382; \varnothing 3.305
Pd	7.695 - 8.558; \varnothing 8.127
Rh	832 - 912; \varnothing 872

5.3.3 SE-haltige Katalysatoren: FCC Katalysatoren

In Katalysatoren der Petro-Industrie zum katalytischen Cracken bzw. Fluid-catalytic-cracking (FCC) kommen Cer und Lanthan zum Einsatz, wobei Lanthan hier die größte Bedeutung zukommt (Yang 2003; U.S. Department of Energy 2010; Oakdene Hollins 2011). FCC-Katalysatoren zählen

zu den nicht-edelmetallhaltigen Katalysatoren und sind Trägerkatalysatoren. Trägermaterial ist bspw. Aluminiumoxid (Hassan 2001).

Beim FCC werden in der Benzin- und Dieselherstellung langkettige Kohlenwasserstoffe in kurzkettige umgewandelt. Seltene Erden tragen hier unter anderem dazu bei, die Effizienz der Prozesse zu erhöhen und Schadstoffemissionen zu reduzieren (U.S. Department of Energy 2011b).

Alle Hersteller von FCC-Kats verwenden Seltene Erden in ihren Produkten (Campagna 2012). Wichtigste Hersteller von FCC-Kats sind Albermarle, W.R. Grace, BASF, Sinopec und Johnson Matthey.

5.3.3.1 In Verkehr gebrachte Mengen

Schätzungen gehen von einer Menge von 7.550 t Seltener Erden pro Jahr weltweit für FCC Katalysatoren aus, wovon 3.500 - 4.000 t auf die USA entfallen (U.S. Department of Energy 2010), anderen Angaben zufolge liegt der Gesamteinsatz Seltener Erden für FCC-Kats noch etwas höher, bei rund 9.400 t pro Jahr (Oakdene Hollins 2011). Der weltweite Verbrauch von FCC-Katalysatoren wird auf rund 600.000 t pro Jahr geschätzt (Oakdene Hollins 2011). Dieselbe Angabe findet sich auch als Schätzung von G. Ragan von Albemarle in Schüler et al. (2011).

Bzgl. der in Deutschland in Verkehr gebrachten Menge wird über die Produktion aus FCC-Prozessen vorgegangen. Deutschland hat eine FCC-Kapazität von etwa 350.000 Barrels-per-day (BPD). Der Ersatz von Katalysatoren erfolgt kontinuierlich. Durchschnittlich werden etwa 0,2 Pounds (lb)²³ Katalysatoren pro Barrel FCC-Produkt „verbraucht“ und ersetzt (Campagna 2012). Dies deckt sich in etwa mit Angaben des U.S. Department of Energy, das 0,21 - 0,25 lb Katalysatoren pro Barrel Input in den FCC-Prozess angibt (U.S. Department of Energy 2010).

Hieraus ließ sich ein Verbrauch bei voller Kapazitätsauslastung von maximal 31.751,3 kg (350.000 Barrel * 0,2 lb / Barrel * 0,453kg / lb) Katalysatoren errechnen. Auf das Jahr bezogen ergäbe sich hieraus bei 100 % Kapazitätsauslastung sowie 365 Tagen ein Katalysatorverbrauch von 11.589.225 kg. Berücksichtigt man die tatsächliche Kapazitätsauslastung der Raffinerien in Deutschland, die zuletzt meist zwischen 78 % und 95 % schwankte (EID 2012), ergibt sich eine Menge von 9.271.380 kg bis 11.357.441 kg. Bezogen auf die durchschnittliche Kapazitätsauslastung der Jahre 1990 bis 2012 von 81,3 % (Mineralölwirtschaftsverband e.V. 2012) ergibt sich ein Katalysator-Verbrauch von 9.442.040 kg.

Eine Tendenz zur Steigerung oder Verringerung der Raffineriekapazitäten in Deutschland lässt sich anhand der Statistiken nicht erkennen. So lag die Kapazität zwischen 1985 und 2010 bezogen auf Gesamtdeutschland stets zwischen 100.490 kt und 119.030 kt (Rohöl). Bezogen auf das Bezugsjahr 2020 wird daher von einer gleichbleibenden Kapazität ausgegangen, was einem Katalysatoreinsatz von 9.442 t pro Jahr entspricht. Dieser Wert wurde als Referenzwert für die Berechnung verwendet. Zusätzlich werden die o. g. Werte von 9.271 bis 11.357 t als oberer und unterer Grenzwert untersucht.

²³ 1 Pound (lb) entspricht rund 0,453 kg.

5.3.3.2 Metallkonzentration im Produkt

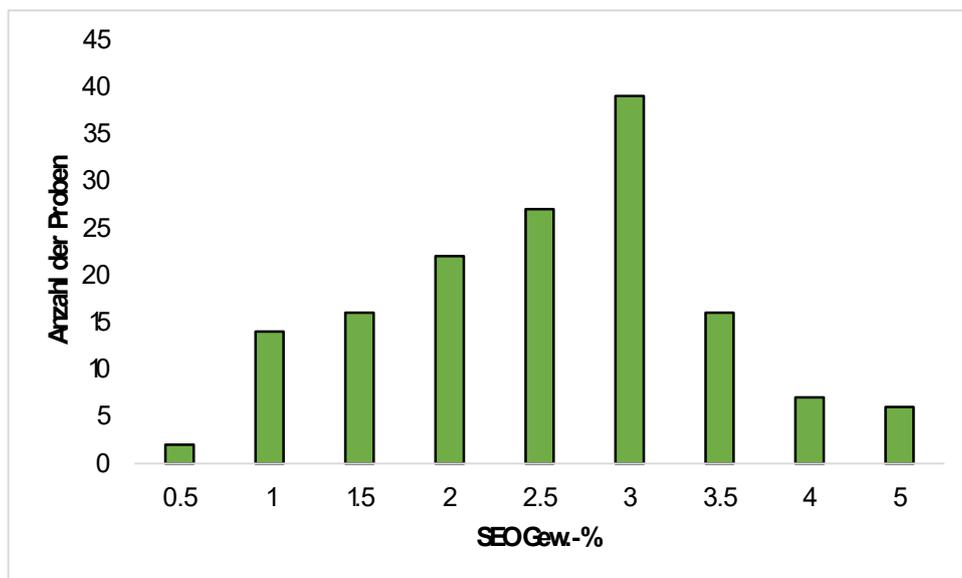
In FCC-Katalysatoren wird primär Lanthan eingesetzt, von geringerer Bedeutung ist Cer (U.S. Department of Energy 2011b). Die Angaben bzgl. des Gehalts an Seltenen Erden bzw. Seltenerdoxid (SEO) in FCC-Katalysatoren decken sich weitestgehend und sind in folgender Übersicht dargestellt:

Tabelle 41: SE-Anteile in FCC-Katalysatoren

SE-Anteil (Gew.-%)	Anmerkung	Quelle
1,5 - 5; ∞ 3,5	SEO, bezogen auf SE ~2,8	(Goonan 2011)
2	SE	(Oakdene Hollins 2011)
2	SE	(Schüler et al. 2011)
1,2 in 1994, 2,9 in 2010	SEO, bezogen auf SE ~2,3	(U.S. Department of Energy 2011b)
3	durchschnittlicher Gehalt auf Basis einer Untersuchung von 155 FCC-Kats	(Ismall 2011)
5	SE; maximal Wert; in erster Linie Lanthan	(Hassan 2003)
0,5 - 6, ∞ 3		(Young et al. 1993)
max. 4,5; ∞ 2 - 2,5		(Campagna 2012)

Zusätzlich wird in Oakdene Hollins (2011) mit Bezug auf Angaben der Lynas Corporation angegeben, dass jährlich rund 9.400 t Seltenerdoxide in Katalysatoren verwendet werden, wovon 90 % Ceroxid ist, was schätzungsweise einer Menge von 200 g Cer pro Katalysator entspricht (Oakdene Hollins 2011). Ein durchschnittlicher Gehalt auf Basis einer Untersuchung von 155 FCC-Kats von 3 % wird auch in Ismall (2011) angegeben. Die Ergebnisse der entsprechenden Untersuchung finden sich in Abbildung 14: SEO in FCC-Kat Proben

Abbildung 14: SEO in FCC-Kat Proben



Quelle: basierend auf Ismall 2011

Es zeigt sich, dass die Angaben in den verschiedenen Quellen sowie Herstellerankünfte nur geringfügig variieren. Teilweise beziehen sich die Angaben zwar auf SE, teilweise auf SEO; die Abweichungen, die sich hieraus ergeben, sind aufgrund des relativ geringen atomaren Gewichts von Sauerstoff im Vergleich zu den Seltenen Erden, jedoch gering (rund 10 % bei La_2O_3 , rund 19 % bei CeO_2). Für die Berechnung wurden basierend auf den erhobenen Daten die Berechnungen für 2 %, 2,5 %, 3 % sowie 3,5 % durchgeführt.

Ergänzend sei angemerkt, dass, da bei FCC-Kats keine besonderen Anforderungen an die Reinheit der SE bestehen, teilweise bis zu 20 % andere SE wie Cer, Neodym, Praseodym und Samarium beigemischt werden (Auer 2012).

5.3.3.3 Exporte aus der Nutzungsphase

Für Exporte aus der Nutzungsphase konnten bei FCC-Katalysatoren keinerlei Anzeichen gefunden werden, und erscheinen aufgrund der vergleichsweise kurzen Standzeit auch unwahrscheinlich.

5.3.3.4 Verweildauer

Wie bereits im Abschnitt 5.3.2 dargelegt werden eingesetzte FCC-Katalysatoren kontinuierlich erneuert. Die Nutzungs- bzw. Verweildauern liegen dabei deutlich unter einem Jahr (laut Expertenauskunft ungefähr 60 Tage (Mielicke 2012)).

5.3.3.5 Potenziell als Abfall anfallende Menge

Aufgrund der vergleichsweise kurzen Nutzungs- bzw. Verweildauer von deutlich unter einem Jahr erwies sich die Anwendung einer Weibullverteilung für FCC-Katalysatoren nicht als zielführend. Stattdessen wurde hier auf Grundlage der ermittelten eingesetzten Katalysatormengen und Metallkonzentrationen die Menge an Metallen bestimmt, die im gesamten Jahr 2020 als Abfall zu erwarten ist.

Wie beschrieben, wurden die Berechnung für verschiedene Metallkonzentrationen sowie bei der in Verkehr gebrachten Menge für einen Referenzwert (9.442 t) und einen oberen und unteren Grenzwert durchgeführt. Der hieraus resultierende Verbrauch Seltener Erden in 2020 ist in Tabelle 42 dargestellt.

Tabelle 42: SE-Mengen aus FCC-Katalysatoren in Abhängigkeit vom Katalysatorverbrauch in 2020 (Angaben in t)

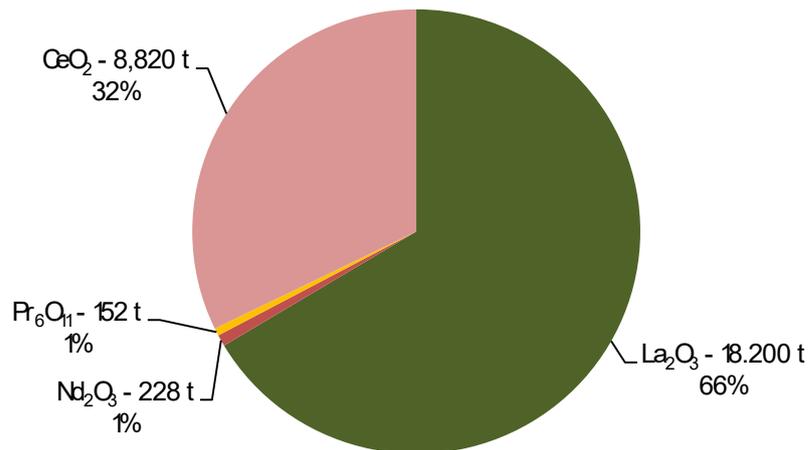
Metallkonzentration [Gew.-%]	Katalysatorverbrauch 9.442 t	Katalysatorverbrauch 9.271 t	Katalysatorverbrauch 11.357 t
2,0	188,8	185,4	227,1
2,5	236,1	231,8	283,9
3,0	283,3	278,1	340,7
3,5	330,5	324,5	397,5

Für den Referenzwert für den Katalysatorverbrauch von 9.442 t in 2020 ergaben sich zwischen 189 und 331 t Seltene Erden, die potenziell als Abfall anfallen. Für die obere und untere Grenze erweiterte sich diese Bandbreite auf 185 bis 389 t. Wie eingangs erwähnt, ist davon auszugehen, dass dies in erster Linie Lanthan und Cer sind, wobei Lanthan die größere Bedeutung zukommt. Laut einer Herstellerankunft kommen auch andere SE in geringen Mengen zum Einsatz (Auer 2012).

Abbildung 15 stellt die Verteilung von Seltenen Erdmetallen im Bereich der Katalysatoren dar. Legt man diese Verteilung zu Grunde ergeben sich für den Referenzwert folgende Metallmengen:

- Lanthan: 125 bis 218 t, im Mittel 171,5 t,
- Cer: 60 bis 106 t, im Mittel 83 t,
- Neodym: 1,5 bis 2,6 t, im Mittel 2,1 t,
- Praseodym: 1,1 bis 2 t, im Mittel 1,6 t.

Abbildung 15: Verteilung des SEO-Verbrauchs für Katalysatoren in 2008



Quelle: basierend auf Goonan 2011

5.3.4 Ge-haltige Katalysatoren: Polymerisationskatalysatoren

In Polymerisationskatalysatoren in der PET-Herstellung kommt Germanium in Form von GeO_2 zum Einsatz. Das auf diese Weise hergestellte PET wird in erster Linie für PET Getränkeflaschen verwendet, für die höhere Qualitätsansprüche (Glanz, Scheinkraft) bestehen, als für sonstige PET Verpackungen (Oakdene Hollins 2011). Neben GeO_2 werden hier alternativ Antimon und Titan als Katalysatormaterial eingesetzt. Letztere werden zwar in den meisten Märkten (mit Ausnahme Japans) bevorzugt eingesetzt (Oakdene Hollins 2011), eine genaue Quantifizierung der Anteile der verschiedenen Katalysatortechnologien, die zur Herstellung von Flaschen-PET verwendet werden, konnte aufgrund schlechter Datenverfügbarkeit jedoch nicht vorgenommen werden, wobei sich dennoch sagen lässt, dass Antimontrioxid die größte Bedeutung zukommt (Shotyk und Krachler 2007). Bezogen auf die gesamte PET-Herstellung haben Antimontrioxidkatalysatoren rund 90 % Marktanteil (Thiele 2004). Demnach erfolgt rund 10 % der PET-Herstellung durch den Einsatz von Germanium- und Titan-Katalysatoren.

Der Einsatz von GeO_2 zur PET-Herstellung betrug weltweit rund 17.200 kg in 2010 und 23.500 kg in 2009 (Guberman 2008 - 2011), was 12.000 bzw. 16.300 kg Germanium entspricht. Tabelle 43 zeigt den weltweiten Einsatz von GeO_2 in Katalysatoren von 2007 bis 2010. Der Gesamtverbrauch von Polymerisationskatalysatoren (inklusive anderer Katalysatorarten) wird in Hassan (2001) für Deutschland auf etwa 3.000 t/a beziffert.

Tabelle 43: GeO₂ Einsatz in Katalysatoren

Jahr	GeO ₂ -Einsatz [kg]
2007	~30.000
2008	30.000
2009	23.500
2010	17.200

Quelle: Guberman 2008 - 2011

Der sinkende Trend des Germaniumeinsatzes zur PET-Herstellung lässt sich zum einen durch eine Steigerung des Recyclings von PET-Produkten erklären (Guberman 2008 - 2011), wodurch eine geringere Neuproduktion notwendig wird. Zum anderen ist zukünftig ein weiteres Absinken des Verbrauchs durch den vermehrten Einsatz der genannten Substitute (Antimon, Titan) möglich.

Laut einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hassan 2003), einer Studie von Oakdene Hollins (Oakdene Hollins 2011) sowie den Abfallsteckbriefen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz in Baden-Württemberg (Landesanstalt für Umwelt 2012) verbleiben Polymerisationskatalysatoren wie GeO₂ bei der PET-Herstellung im Produkt. Während frühere Katalysatorsysteme eine vergleichsweise geringe Aktivität aufwiesen und anschließend durch teure Verfahren vom Produkt abgetrennt wurden, weisen neuere Katalysatoren eine größere Aktivität auf und werden generell im Produkt belassen (Hassan 2001). Daher ist es bzgl. der in 2020 potenziell als Abfall anfallenden Menge an Germanium nicht zielführend, die Ge-haltigen Polymerisationskatalysatoren zu analysieren. Für die weitere Analyse wurden daher in erster Linie die Endprodukte, das heißt PET-Getränkeflaschen, in denen das Germanium aus den Katalysatoren verbleibt, betrachtet. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass Germanium aus PET-Flaschen derzeit nicht rückgewonnen werden kann (Oakdene Hollins 2011) bzw. die Rückgewinnung aufgrund des hohen Dissipationsgrades derzeit nicht praktikabel ist. Nach der Entsorgung der PET-Flaschen dissipiert das Germanium weiter in die folgenden Anwendungen wie Fleece-Material oder Teppiche. Die Bestimmung der in 2020 zu erwartenden Metallmenge von Germanium in PET-Flaschen stellt also in erster Linie dar, welche Verluste durch die dissipative Nutzung in den Katalysatoren zu erwarten sind und ist weniger als eine Quantifizierung eines potenziell rückgewinnbaren Abfallstroms zu verstehen.

5.3.4.1 In Verkehr gebrachte Mengen

Ausführungen bzgl. der weltweit eingesetzten Menge an Polymerisationskatalysatoren sowie an GeO₂, welches für Polymerisationskatalysatoren eingesetzt wird, finden sich bereits im vorherigen Abschnitt. In diesem Abschnitt wird die in Verkehr gebrachte Menge der Endprodukte, der PET-Flaschen, in denen das GeO₂ der Polymerisationskatalysatoren verbleibt, beleuchtet. Hierzu werden der Getränkeverbrauch und die Verteilung auf verschiedene Verpackungsarten herangezogen. In Tabelle 44 ist der Getränkeverbrauch pfandpflichtiger Getränke in Deutschland dargestellt. Die entsprechenden Verbräuche finden sich in Heinisch (2011). Zusätzlich sind nicht-pfandpflichtige Getränkeverpackungen zu berücksichtigen. Für letztere wurden Daten zu den in Verkehr gebrachten Getränkemengen der Jahre 2004 bis 2011 vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden in PET Flaschen in Verkehr gebrachten Mengen bewegen sich in der Summe zwischen 1.000 und 1.800 Mio. Litern pro Jahr. Für die pfandpflichtigen Getränke muss hingegen zunächst die über (Ein- und Mehrweg) PET-Flaschen in Verkehr gebrachte Menge

über die gesamte Getränkemenge und die Anteile der einzelnen Verpackungsarten zu bestimmen, wie im Folgenden dargestellt.

Tabelle 44: Getränkeverbrauch pfandpflichtiger Getränke in Deutschland nach Getränkegruppen, in Mio. Liter

Getränkeart	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Durchschnitt	max. Schwankung
Bier inkl. Biermischgetränke	7.429,4	7.354,0	7.510,4	7.547,0	7.425,6	7.343,5	7.434,98	2,8%
Mineralwasser	12.247,8	12.369,7	12.995,6	13.253,0	13.131,6	13.204,5	12.867,0	8,2%
Erfrischungsgetränke	10.557,3	10.740,6	11.131,7	11.301,1	11.432,2	11.288,3	11.075,2	8,3%
Alk. Mischgetränke	54,4	13,3	6,8	5,9	6,0	6,3	15,45	922%
Summe	30.288,9	30.477,6	31.644,4	32.107,0	31.995,5	31.842,6	31.392,6	6%

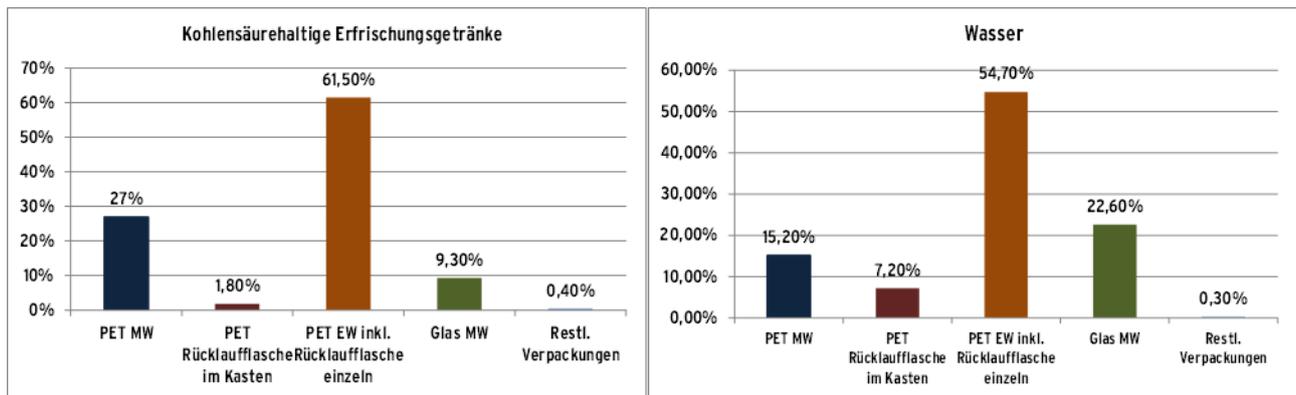
Quelle: Heinisch 2011

In der Summe stellt sich der Verbrauch pfandpflichtiger Getränke weitestgehend stabil dar. In den dominierenden Getränkegruppen Bier inklusive Biermischgetränke, Mineralwasser und Erfrischungsgetränke ist der Absatz weitestgehend stabil und schwankte zwischen 2004 bis 2009 um 2,8 % bei Bier (und Biermischgetränke), 8,2 % bei Mineralwässern und 8,3 % bei Erfrischungsgetränken. Einzig in der mengenmäßig wenig relevanten Gruppe der alkoholhaltigen Mischgetränke ist - vermutlich als Folge der 3. Novelle der VerpackV - ein deutlicher Rückgang von 2004 bis 2006 festzustellen, wobei sich der Verbrauch bei etwa 6 Mio. Liter zu stabilisieren scheint (Heinisch 2011).

Bezogen auf die Jahre bis 2020 wurde auf dieser Basis davon ausgegangen, dass der jährliche Verbrauch von Bier (und Biermischgetränke), Mineralwässern und Erfrischungsgetränken in etwa dem Durchschnitt der Jahre 2004 bis 2009 entspricht, also ein Verbrauch von 7.435 Mio. Liter für Bier (und Biermischgetränke), 12.867 Mio. Liter für Mineralwässer und 11.075 Mio. Liter für Erfrischungsgetränke angenommen wurde. Für alkoholhaltige Mischgetränke wurde ein Verbrauch von 6 Mio. Litern angenommen. Zusätzlich zu diesen Werten wurde jeweils eine Abweichung von diesem Wert von $\pm 10\%$ untersucht, welche historische und potenzielle zukünftige Schwankungen abdecken sollte.

Bei den Getränkeverpackungen sind im Wesentlichen Ein- und Mehrwegkunststoff- bzw. -PET und -glasflaschen sowie Getränkekartons und Getränkedosen von Bedeutung. Abbildung 16 zeigt die Verpackungsstruktur für Wasser und Erfrischungsgetränke in 2007. Demnach wurden 90,3 % der Erfrischungsgetränke und 77,1 % der Wässer in PET-Flaschen vertrieben.

Abbildung 16: Verpackungsstruktur für kohlenensäurehaltige Erfrischungsgetränke und Wasser 2007



Quellen: nach Kauertz et al. 2008

In Tabelle 45 sind die Anteile der verschiedenen Verpackungsarten bezogen auf den gesamten Getränkeverbrauch dargestellt, das heißt inklusive Bier, Biermischgetränke sowie alkoholhaltiger Mischgetränke.

Tabelle 45: Anteile der wichtigsten Verpackungen am Getränkeverbrauch 2004 - 2009

Verpackung	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Mehrweg-Glasflaschen	48,4%	43,6%	39,0%	35,8%	34,5%	34,2%
Mehrweg-Kunststoffflaschen	17,8%	17,7%	16,6%	15,4%	14,9%	15,0%
Getränkekartons	4,6%	4,0%	3,9%	3,1%	2,8%	2,4%
Einweg-Kunststoffflaschen	25,5%	31,6%	37,6%	42,3%	45,2%	46,3%
Einweg-Glasflaschen	0,9%	0,7%	0,7%	0,6%	0,4%	0,4%
Getränkedosen	2,4%	1,9%	1,7%	2,2%	1,5%	1,3%
Andere Verpackungen	0,4%	0,5%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%

Quelle: Heinisch 2011

Bei der Betrachtung der Anteile der verschiedenen Arten von Kunststoffflaschen für die verschiedenen Getränkegruppen ergibt sich ein genaueres Bild (siehe Tabelle 46). Demnach sind Kunststoffflaschen bei alkoholhaltigen Mischgetränken ohne Bedeutung. Bei Bier und Biermischgetränken sind lediglich Einweg-Kunststoffflaschen in geringem Umfang (4,1 % in 2004, 6,8 % in 2009) zu finden (Heinisch 2011). Bis 2008 findet sich hier ein leichtes Wachstum auf 7,6 %, bevor der Anteil in 2009 wieder leicht abfällt. Bezogen auf 2020 wird davon ausgegangen, dass sich der Anteil bei etwa 7 % stabilisiert, zusätzlich werden 6 und 8 % untersucht.

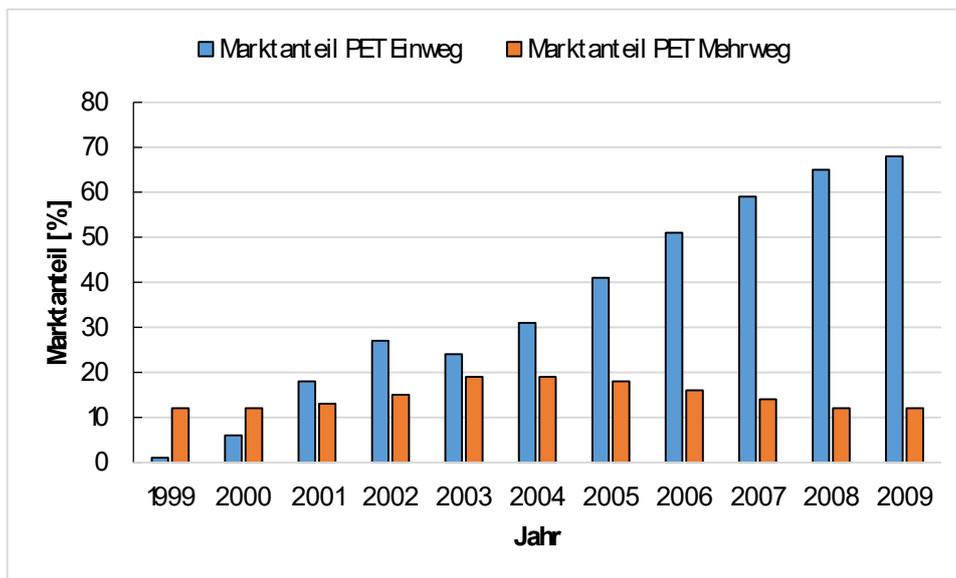
Bei Mineralwässern bewegt sich der Anteil von MW-PET-Flaschen (Mehrweg) zwischen 21,1 % und 18,4 %. Bei den EW-PET-Flaschen (Einweg) zeigt sich ein Wachstumstrend von etwa 31,5 % in 2004 auf 56,1 % in 2009 (Heinisch 2011). Bei Erfrischungsgetränken zeigt sich ein Rückgang der MW-PET-Flaschen von 27,5 % in 2004 auf 20,5 % in 2009, während der Anteil von EW-PET-Flaschen im selben Zeitraum von 33,7 % auf 60,5 % gestiegen ist (Heinisch 2011).

Tabelle 46: Anteile EW- und MW-Kunststoffflaschen nach Getränkearten 2004 - 2009

Getränkart	Jahr	MW-PET-Flasche	EW-PET-Flasche
Bier (und Mischgetränke)	2004		4,1%
	2005		4,6%
	2006		6,3%
	2007		6,5%
	2008		7,6%
	2009		6,8%
Mineralwasser	2004	20,3%	31,5%
	2005	21,1%	38,5%
	2006	19,3%	46,9%
	2007	18,4%	52,6%
	2008	18,7%	54,5%
	2009	18,6%	56,1%
Erfrischungsgetränke	2004	27,5%	33,7%
	2005	26,0%	42,2%
	2006	24,5%	47,9%
	2007	22,1%	54,3%
	2008	20,2%	59,1%
	2009	20,5%	60,5%

Quelle: Heinisch 2011

Abbildung. 17: PET-Anteile an Getränkeverpackungen in Deutschland



Quelle: nach GfK in Welle (2010)

Dieser Trend zu Einwegflaschen aus Kunststoff ist seit Jahren ungebrochen, eine Fortsetzung scheint wahrscheinlich (vgl. Umweltbundesamt 2011; Abbildung. 17). Entsprechend wurde in der Berechnung für Mineralwässer und Erfrischungsgetränke eine Fortsetzung des Trends zu EW-PET-

Flaschen auf 70 % Anteil am Verpackungsmarkt in 2020 untersucht. Daneben wurden gleichbleibende EW-PET Anteile sowie auf 50 % zurückgehende Anteile in 2020 untersucht. Für Mineralwasser wurden zudem für MW-PET Anteile von 15 und 20 % sowie für Erfrischungsgetränke von 15 und 25 % untersucht. Eine Übersicht der angenommenen Quoten ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 47: Anteile EW- und MW-PET-Flaschen nach Getränkearten in 2020

Getränkeart	Jahr	MW-PET-Flasche	EW-PET-Flasche
Bier (und Mischgetränke)	2010-2020		6/7/8%
Mineralwasser	2009	18,6%	56,1%
	2020	15% / 20%	50% / 56,1% / 70%
Erfrischungsgetränke	2009	20,5%	60,5%
	2020	15% / 25%	50% / 60,5% / 70%

5.3.4.2 Metallkonzentration im Produkt

Der Germaniumanteil in GeO_2 Katalysatoren lässt sich auf rund 69 % beziffern. Dies deckt sich mit Herstellerangaben (Freerks 2012). Wie bereits beschrieben, verbleiben Polymerisationskatalysatoren wie GeO_2 im Produkt (Hassan 2003; Oakdene Hollins 2011; Landesanstalt für Umwelt 2012). Bzgl. der GeO_2 -Konzentration im PET, die hieraus resultiert, finden sich unterschiedliche Angaben. Während in (Oakdene Hollins 2011) eine Konzentration zwischen 10 und 70 mg/kg, was 1:100.000 bis 7:100.000 bzw. durchschnittlich 1:25.000 entspricht, genannt wird, wird in (Hassan 2003) ein Verhältnis von 1:10.000 genannt. Aufgrund der höheren Aktualität werden hier jedoch die Angaben aus Oakdene Hollins (2011) herangezogen.

Für EW- und MW-Flaschengewichte finden sich verschiedene Angaben in der Literatur aus denen sich ein spezifisches Flaschengewicht berechnen lässt, welches die Menge an PET pro Liter Getränkeflasche angibt. Dieses spezifische Gewicht liegt zwischen 23,7 und 30,5 g/l bei Einwegflaschen und 57,3 bis 70,7 g/L bei Mehrwegflaschen. Anhand dieser Werte wurde die GeO_2 -Konzentration pro 1l-Flasche ermittelt. Die Ergebnisse der Berechnungen finden sich in Tabelle 48. Es ergeben sich GeO_2 -Konzentrationen von 0,88 mg/1l-Flasche bis 1,22 mg/1l-Flasche für Einwegflaschen und 2,48 mg/1l-Flasche bis 2,828 mg/1l-Flasche für Mehrwegflaschen.

Tabelle 48: Gewichtsangaben für PET-Flaschen

Flaschenart	EW/MW	Gewicht [g]	spez. Gewicht [g/L]	GeO_2 -Konzentration [mg/1l-Flasche]
1,5l PET	EW	33,7 – 36,5 ∅ 35,5	22,5-24,3 ∅ 23,7	0,225-1,701 ∅ 0,948
1l PET-SK	EW	30,5	30,5	1,22
1,5l PET (Erfrischungsgetränke)	EW	37,7	25,1	1,004
1,5l PET (Wasser)	EW	33	22	0,88
1l PET	MW	62	62	2,48
1,5l PET (Wasser)	MW	86	57,3	2,292
1,5l PET (Erfrischungsgetränke)	MW	106	70,7	2,828

Quelle: Kauertz et al. 2008; Kauertz et al. 2011; Oakdene Hollins 2011 sowie eigene Berechnungen

5.3.4.3 Exporte aus der Nutzungsphase

Exporte von PET-Flaschen aus der Nutzungsphase sind zu vernachlässigen, da die Flaschen aufgrund des Pfandsystems vom Verbraucher zurück an den Handel gehen, bevor sie der Entsorgung oder Wiederverwendung zugeführt werden. Bezogen auf die PET-Abfälle, welche allerdings für die Berechnung irrelevant sind, lässt sich jedoch eine steigende Exportmenge feststellen (bvse 2010).

5.3.4.4 Verweildauer

Die Betrachtung der Verweildauer ist in erster Linie für Mehrwegflaschen relevant. Einwegflaschen sind für wenige Wochen in Umlauf und fallen dann als Abfall an. Mehrwegflaschen hingegen werden erneut befüllt, sodass sich entsprechend längere Verweildauern ergeben. Als Umlaufzahl für PET-Mehrwegflaschen wird ein Wert von 15 angegeben (Kauertz et al. 2008). Aktuelle Zahlen bzgl. der Dauer eines Umlaufs einer Mehrwegflasche für Deutschland waren nicht verfügbar. Für Österreich werden in einer Studie (Frühwirth et al. 2000) die in Tabelle 49 dargestellten Werte unterteilt nach Getränkegruppen angegeben.

Tabelle 49: Umlaufzeit und Verweildauer Mehrweg-PET-Flaschen

Parameter	Wasser PET	Erfrischungsgetränke
Umlaufzeit des Gebindes [Wochen]	2,9	5,0
Umlaufzahl	15	15
Verweildauer [Wochen]	43,5	75

Quelle: Frühwirth et al. 2000 und eigene Berechnungen

5.3.4.5 Potenziell als Abfall anfallende Menge

Die Berechnung der Metallmengen, die in 2020 als Abfall anfallen, erfolgte zunächst für die pfandpflichtigen Getränke, anschließend für die nicht-pfandpflichtigen Getränke. Bei der Berechnung der Germaniummengen aus pfandpflichtigen Getränkeverpackungen unterschied sich das Vorgehen für Einweg- und Mehrwegflaschen geringfügig. Aufgrund der relativ geringen Umlaufzeit konnte für Einwegflaschen die in Verkehr gebrachte Menge im Jahr 2020 mit der als Abfall anfallenden Menge gleichgesetzt werden. Bei Mehrwegflaschen war zu beachten, dass die Verweildauer zum einen durch die Zahl der Umlaufzyklen deutlich höher ist (43,5 Wochen für Wasser und 75 Wochen für Erfrischungsgetränke). Zum anderen entspricht eine Ein-Liter-Flasche durch die mehreren Umlaufzyklen dem Transport von 15 Litern Getränk. Daher ist die Abfallmenge bei Mehrwegflaschen bezogen auf die Anzahl der Flaschen um den Faktor 15 geringer als die Menge an Einwegflaschen für den Transport einer entsprechenden Getränkemenge. Dies wurde in der Berechnung zu berücksichtigen. Da von konstanten in Verkehr gebrachten Getränkemengen ausgegangen wurde, war allerdings auch hier keine Betrachtung von Zeitreihen mit Weibullverteilung der Lebensdauern notwendig.

Da, wie eingangs beschrieben, neben GeO_2 auch SbO_3 und Titan als Katalysatormaterial in der Herstellung eingesetzt werden, wurden die berechneten Mengen um den Anteil der GeO_2 -Katalysatoren in der Herstellung korrigiert. Genaue Daten hierzu liegen nicht vor und in Anlehnung an Thiele (2004) wird eine Quote von 10 % angenommen. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass der Anteil von GeO_2 bzw. SbO_3 Katalysatoren in der PET-Flaschenherstellung dem Anteil bezogen auf die gesamte PET-Herstellung (neben Flaschen bspw. Folien und Fasern) entspricht.

Die relevanten Parameter und Berechnungsergebnisse für Einweg- und Mehrwegflaschen sind in den folgenden Tabellen dargestellt. Die Germaniummenge beträgt 69 % der GeO₂-Menge (siehe Abschnitt Metallkonzentration im Produkt).

Tabelle 50: Germaniummengen in 2020 aus pfandpflichtigen PET-Einwegflaschen

Produkt	Inverkehr- bringung [Mio. Liter]	EW - Quote	Metallkon- zentration [mg/l]	GeO ₂ -Menge in 2020 bei 100% Anteil [kg]	Ge-Menge in 2020 bei 100% Anteil [kg]	Ge-Menge in 2020 korrigiert für 10% Anteil [kg]
Bier	7.435 (6.692 / 8.179)	6%	0,948 / 1,004 / 1,22	423 / 448 / 544 (380 / 598)24	292 / 309 / 375 (262 / 413)	29,2 / 30,9 / 37,5 (26,2 / 41,3)
		7%		493 / 523 / 635 (444 / 699)	340 / 361 / 438 (306 / 482)	34,0 / 36,1 / 43,8 (30,6 / 48,2)
		8%		564 / 597 / 726 (508 / 799)	389 / 412 / 501 (351 / 551)	38,9 / 41,2 / 50,1 (35,1 / 55,1)
Wasser	12.867 (11.580 / 14.154)	50%	0,948 / 1,004 / 1,22	6.099 / 6.459 / 7.849 (5.489 / 8.634)	4.208 / 4.457 / 5.419 (3.787 / 5.957)	420,8 / 445,7 / 541,9 (378,7 / 595,7)
		56,1 %		6.843 / 7.247 / 8.806 (6.159 / 9.687)	4.822 / 5.000 / 6.076 (4.250 / 6.684)	482,2 / 500,0 / 607,6 (425,0 / 668,4)
		70%		8.539 / 9.043 / 10.988 (7.685 / 12.089)	5.892 / 6.240 / 7.582 (5.303 / 8.341)	589,2 / 624,0 / 758,2 (530,3 / 834,1)
Erfri- schungs- getränke	11.075 (9.968 / 12.183)	50%	0,948 / 1,004 / 1,22	5.250 / 5.560 / 6.756 (4.725 / 7.432)	3.623 / 3.836 / 4.662 (3.260 / 5.128)	362,3 / 383,6 / 466,2 (326,0 / 512,8)
		60,2 %		6.320 / 6.694 / 8.134 (5.688 / 8.947)	4.361 / 4.619 / 5.612 (3.925 / 6.173)	436,1 / 461,9 / 561,2 (392,5 / 617,3)
		70%		7.349 / 7.784 / 9.458 (6.614 / 10.404)	5.071 / 5.371 / 6.526 (4.564 / 7.179)	507,1 / 537,1 / 652,6 (456,4 / 717,9)

²⁴ Die berechneten Werte in Klammern geben das jeweilige Minimum/Maximum wieder, das sich durch eine Änderung der in Verkehr gebrachten Getränkemenge um ± 10 % ergibt.

Tabelle 51: Germaniummengen in 2020 aus pfandpflichtigen PET-Mehrwegflaschen

Produkt	Inverkehr- bringung [Mio. Liter]	MW - Quote	Metallkon- zentration [mg/l]	GeO ₂ -Menge in 2020 bei 100% Anteil [kg]	Ge-Menge in 2020 bei 100% Anteil [kg]	Ge-Menge in 2020 korrigiert für 10% Anteil [kg]
Wässer	12.867 (11.580 / 14.154)	15%	2,292 / 2,48 / 2,828	295 / 319 / 364 (265 / 400)	203 / 220 / 251 (183 / 276)	20,3 / 22,0 / 25,1 (18,3 / 27,6)
		20%		393 / 425 / 485 (354 / 534)	271 / 294 / 335 (244 / 368)	27,1 / 29,4 / 33,5 (24,4 / 36,8)
Erfri- schungs- getränke	11.075 (9.968 / 12.183)	15%	2,292 / 2,48 / 2,828	254 / 275 / 313 (228 / 345)	175 / 190 / 216 (158 / 238)	17,5 / 19,0 / 21,6 (15,8 / 23,8)
		25%		423 / 458 / 522 (381 / 574)	292 / 316 / 360 (263 / 396)	29,2 / 31,6 / 36,0 (26,3 / 39,6)

Es ergab sich eine Menge an Germanium aus pfandpflichtigen Einweg-PET-Flaschen von 812,3 bis 1.460,9 kg (730,9 bis 1.607,1 kg) bzw. im Mittel von 1.136,6 kg. Aus pfandpflichtigen Mehrweg-PET-Flaschen ergab sich eine Menge von 37,9 bis 69,5 kg (34,1 bis 76,4 kg) bzw. im Mittel von 53,7 kg. In der Summe ergab sich also eine Germaniummenge aus pfandpflichtigen PET-Flaschen von 850,2 kg bis 1.530,4 kg (im Mittel 1.190,3 kg) bzw. bei um 10 % variierender Getränkeabsatzmenge von 765,0 bis 1.683,5 kg.

Für die Bestimmung der Germaniummenge aus nicht-pfandpflichtigen PET-Getränkeverpackungen wurde eine mittlere Inverkehrbringung von 1.450 Mio. Litern sowie eine Ober- und Untergrenze von 1.100 und 1.800 Mio. Litern untersucht, der Germaniumgehalt wurde analog zu den pfandpflichtigen Einweg-Getränkeverpackungen angenommen. Die Berechnungsergebnisse finden sich in Tabelle 52.

Tabelle 52: Germaniummenge in 2020 aus nicht-pfandpflichtigen PET-Getränkeverpackungen

Getränkemenge [Mio. Liter]	Metallkonzentration [mg/l]	GeO ₂ -Menge in 2020 bei 100% Anteil [kg]	Ge-Menge in 2020 bei 100% Anteil [kg]	Ge-Menge in 2020 korrigiert für 10% Anteil [kg]
1.450	0,948 / 1,004 / 1,22	1.375 / 1.456 / 1.769	948 / 1.005 / 1.221	94,8 / 100,5 / 122,1
1.100	0,948 / 1,004 / 1,22	1.043 / 1.104 / 1.342	720 / 762 / 926	72,0 / 76,2 / 92,6
1.800	0,948 / 1,004 / 1,22	1.706 / 1.807 / 2.196	1.177 / 1.247 / 1.515	117,7 / 124,7 / 151,5

Aus nicht-pfandpflichtigen Getränkeverpackungen ergab sich somit eine Menge von 94,8 bis 122,1 kg Germanium bzw. bei Betrachtung des unteren und oberen untersuchten Grenzwertes von 72,0 bis 151,5 kg.

Die gesamte Germaniummenge aus PET-Getränkeverpackungen beträgt somit 945 bis 1.652,5 kg bzw. bei Berücksichtigung der gesamten Spannbreite der Ergebnisse 837 bis 1.835 kg.

5.3.5 Automobile

Die Produktgruppe Automobile umfasst die Bereiche „Autokatalysator“ mit den als mengenrelevant identifizierten Elementen Palladium, Platin, Rhodium, Cer und Lanthan sowie die sonstigen Anwendungsgebiete mit einer identifizierten Mengenrelevanz für Gadolinium, Dysprosium sowie mit Einschränkung für Terbium.

5.3.5.1 Produktidentifizierung

Zur Produktidentifizierung im Bereich der (Alt-)Fahrzeuge wurde eine Klassifizierung erarbeitet, die einerseits die zu erwartenden Varianzen an Metallgehalten in verschiedenen Produkten berücksichtigt, für die andererseits aber auch eine ausreichende Datenbasis (vor allem für die Berücksichtigung der Exporte) zur Verfügung steht. Die zu unterscheidenden Produkte finden sich in Tabelle 53. Dabei wird im Folgenden zwischen konventionellen Antriebstechnologien für PKW und Nutzfahrzeuge, die zurzeit den Automobilsektor dominieren, und neuartigen Antriebstechnologien wie Hybrid-Modellen, batteriegetriebenen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Brennstoffzellen unterschieden.

Tabelle 53: Produkte im Bereich Altautos

Produkt	ggf. Untergruppe
PKW mit Verbrennungsmotor	bis 1.400 ccm
	1.400 bis 2.000 ccm
	über 2.000 ccm
Nutzfahrzeuge	-
Hybrid PKW	-
Elektromobil (batteriegetrieben)	-
PKW mit Brennstoffzelle	-

5.3.5.2 Produktanalyse

Dem analytischen Rahmen für die Untersuchung von Produktgruppen im Projekt folgend, wurden für den Bereich Automobile die in Deutschland in Verkehr gebrachte Mengen abgeschätzt und die Metallkonzentrationen der als mengenrelevant identifizierten ReStra-Zielmetalle bestimmt. Um abschließend das produktspezifische Abfallaufkommen bestimmen zu können, wurden Annahmen zur Verweildauer, damit verbunden dem Untersuchungszeitraum sowie zum Export von Automobilen während der Nutzungsphase getroffen.

Insgesamt erwies sich dabei der Bereich Automobile als Produktgruppe mit einer vergleichsweise hohen Qualität der vorliegenden Daten in Bezug auf die in Verkehr gebrachten Mengen an Fahrzeugen. Gleichzeitig erschwerte die Produktvielfalt mit kurzen Innovationszyklen für einzelne Autotypen und jeweils unterschiedlichen Ausstattungen die Bestimmung konkreter Metallströme. Besondere Herausforderungen ergaben sich auch durch den hohen Anteil an Gebrauchtfahrzeugen, die nach ihrer Außerbetriebsetzung im inner- und außereuropäischen Ausland eine zweite Nutzungsphase erfahren.

In Verkehr gebrachte Menge

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes wurde in einem anderen Projekt für das Umweltbundesamt der Verbleib von in Deutschland außer Betrieb gesetzten Automobilen untersucht²⁵. Die Ergebnisse standen zum Zeitpunkt des Berichtsabschlusses nicht zur Veröffentlichung zur Verfügung.

Bestimmung des Untersuchungszeitraums

Bei der Betrachtung der in Verkehr gebrachten Mengen war zunächst zu bestimmen, bis zu welchem Punkt in der Vergangenheit zurück die neu in Verkehr gebrachten Mengen betrachtet werden sollen²⁶. Zur Bestimmung der mittleren Verweildauer für PKW und Nutzfahrzeuge kann in Deutschland auf Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) zum Durchschnittsalter der außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge zurückgegriffen werden. Dafür werden einerseits die Daten der jeweiligen Erstzulassung von Fahrzeugen erfasst, die im zentralen Fahrzeugregister (ZFZR) des KBA gespeichert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dies den Zeitpunkt berücksichtigt, bei dem Fahrzeuge zum ersten Mal im öffentlichen Straßenverkehr in Betrieb gesetzt werden. Diese können vorher auch bereits auf einem privaten Firmengelände genutzt worden sein: Diese Fälle sind allerdings sehr selten, sodass sie nur einen geringen Einfluss auf die altersbezogenen Auswertungen haben (KBA 2011).

Seit einer Änderung der Fahrzeugzulassungsverordnung (FZV) wird bei der Außerbetriebsetzung von Fahrzeugen nicht mehr danach differenziert, ob diese vorübergehend oder endgültig außer Betrieb gesetzt werden und es erfolgt auch keine differenzierte Erklärung des Letzthalters über den Verbleib des Fahrzeuges mehr. Die rechtlichen Grundlagen sehen lediglich die Erhebung vor, ob ein Fahrzeug zur Verwertung übergeben wurde oder nicht (§ 14 und § 15 FZV).

Tabelle 54 stellt die letzten vom KBA veröffentlichten Angaben zum Durchschnittsalter von außer Betrieb gesetzten Fahrzeugen dar. Die rot markierten Zahlen für das Jahr 2007 liegen für die meisten Produkte deutlich unter den Werten von 2006, zudem wirkt sich der Effekt auch unterschiedlich auf die einzelnen Fahrzeugklassen aus (-2,4 Jahren bei PKW, -0,4 Jahre für Kraftomnibusse).

Tabelle 54: Durchschnittsalter der gelöschten bzw. ab 2007 außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge

Fahrzeugklasse	Durchschnittsalter 2007	Durchschnittsalter 2006	Durchschnittsalter 2002	Durchschnittsalter 1997
Personenkraftwagen	9,6	12,0	11,9	11,5
Krafträder	10,9	14,0	12,8	12,0
Kraftomnibusse	12,4	12,8	14,0	13,3
Lastkraftwagen	9,8	10,8	10,7	10,7

²⁵ UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3714 33 315 0: Entwicklung von Lösungsvorschlägen, einschließlich rechtlicher Instrumente, zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen Kurztitel: Verbleib von Altfahrzeugen.

²⁶ Einige Fahrzeuge erreichen aus Liebhabermotiven eine außergewöhnliche lange Nutzungsdauer. Diese „Oldtimer-Problematik“ wird jedoch im Kontext dieses Projektes als nicht mengenrelevant eingeschätzt.

Fahrzeugklasse	Durchschnittsalter 2007	Durchschnittsalter 2006	Durchschnittsalter 2002	Durchschnittsalter 1997
Zugmaschinen	18,8	20,9	21,4	21,7
Sonstige Kfz	15,1	16,1	16,0	15,2
Kraftfahrzeuganhänger	16,2	18,3	17,5	14,8

Quelle: KBA 2011

Entsprechend den Angaben in KBA (2011) kann davon ausgegangen werden, dass sich das Durchschnittsalter von Fahrzeugen bei der Außerbetriebsetzung in Deutschland stetig erhöht (KBA 2011). Für die Untersuchungen des Abfallaufkommens wurde angenommen, dass sich dieser auf technologischen und sozio-ökonomischen Faktoren basierende, in den letzten Jahren relativ stabile Trend bis 2020 fortsetzt. Diese Annahme wird auch durch die Daten zum Durchschnittsalter der Fahrzeugflotte in Deutschland gestützt (KBA 2015f). Entsprechend den Angaben des KBA (2011) ist in den Jahren 1997 bis 2006 das Durchschnittsalter eines außer Betrieb gesetzten PKW von 11,5 auf 12 Jahre angestiegen.

Damit ergibt sich eine durchschnittliche Wachstumsrate für das Durchschnittsalter von

$$\left(\frac{12}{11,5} \right)^{\frac{1}{9}-1} = 0,0047 = 0,47\%$$

Die voraussichtliche Durchschnittsnutzungsdauer eines PKW 2020 ergibt sich dann aus $12^{1,0047^{14}} = 12,82$ (Jahre)

und liegt somit bei etwa 13 Jahren.

Die entsprechende Rate für die Nutzfahrzeuge (Kraftomnibusse, LKW und Zugmaschinen) ergibt sich aus der Multiplikation der Gewichtungen entsprechend der jeweiligen Bestände im Jahr 1997 und 2006 berechnet mit dem jeweiligen Durchschnittsalter (siehe Tabelle 55).

Tabelle 55: Berechnung der Nutzungsdauerentwicklung für Nutzfahrzeuge (Jahre)

Faktor	Jahr	Kraftomnibusse	LKW	Zugmaschinen	Nutzfahrzeuge gesamt
Menge	1995	7.325	143.398	53.887	204.610
	2003	5.278	241.970	65.551	312.799
	2006	6.388	232.203	64.572	303.163
Gewichtung	1995	0,035799814	0,700835736	0,263364449	
	2003	0,016873455	0,773563854	0,20956269	
	2006	0,021071173	0,765934497	0,21299433	
Nutzungsdauer	1997	13,3	10,7	21,7	
	2002	14	10,7	21,5	
	2006	12,8	10,8	20,9	
	1997	0,47613753	7,498942378	5,715008553	13,69008846

Faktor	Jahr	Kraftomnibusse	LKW	Zugmaschinen	Nutzfahrzeuge gesamt
Gewicht x Nutzungsdauer	2002	0,236228377	8,277133239	4,505597844	13,01895946
	2006	0,269711014	8,272092571	4,451581492	12,99338508

Demnach liegt das Wachstum bei -0,58 % pro Jahr. Damit beträgt die voraussichtliche Nutzungsdauer eines Nutzfahrzeugs 2020 etwa 12 Jahre in Deutschland. Die Prognose für die Nutzungsdauer in 2020 liegt bei 11,97943052 Jahre.

Für die Berechnung der Verteilungsfunktion der Weibullverteilung wurden Daten für die 1,5-fache Verweildauer gesammelt.

PKW: $1,5 \cdot 13 \text{ Jahre} = 19,5 \Rightarrow$ etwa 20 Jahre

LKW: 18 Jahre

Neuzulassungen von Automobilen in Deutschland

Die Anzahl der in Deutschland in Verkehr gebrachten Fahrzeuge wurde über die Zulassungsstatistik des KBA erfasst. Eine Betrachtung über den Weg „hergestellte + importierte - exportierte Autos“ war daher nicht notwendig und die Qualität der Bestandsangaben kann als hoch eingeschätzt werden.

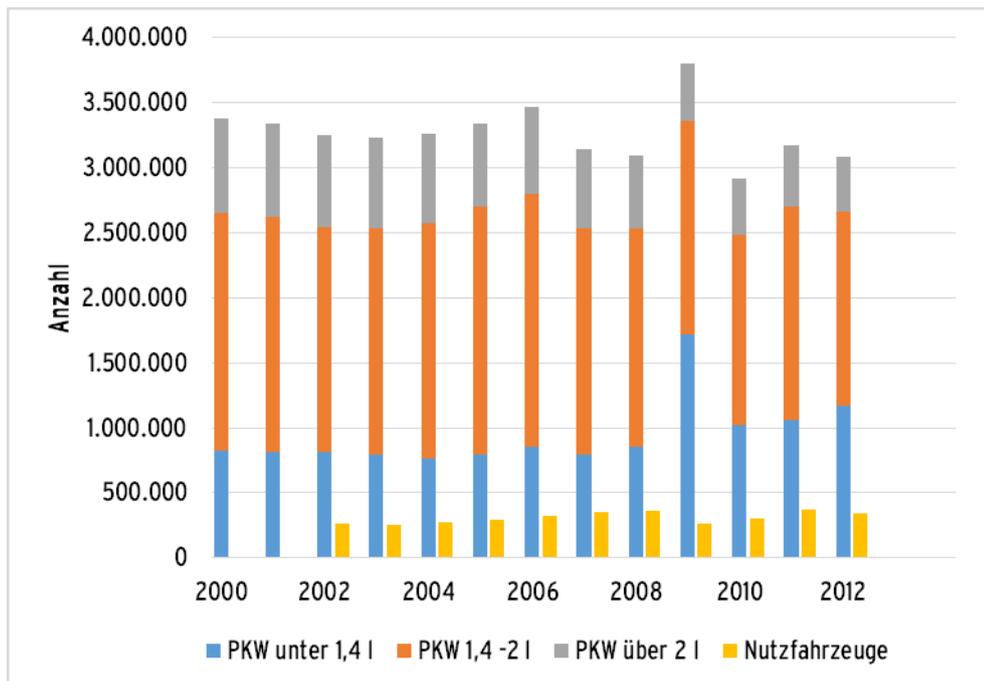
Insgesamt wurden laut KBA im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2012 relativ stabil 3 bis 3,3 Mio. M1-Fahrzeuge in Deutschland neu zugelassen; hinzu kommen etwa 0,3 bis 0,5 Mio. Nutzfahrzeuge. Im Jahr 2009 wurde die Wirkung der Abwrackprämie deutlich: Die Zahl der Neuzulassungen stieg auf 3,8 Mio. Fahrzeuge an. Im Folgejahr fiel diese allerdings auf 2,9 Mio. Fahrzeuge. Die nachfolgende Tabelle sowie Abbildung. 18 zeigen die Daten für die in ReStra festgelegte Unterteilung der Produktgruppe Automobil für die Jahre 2000 bis 2012.

Tabelle 56: Neuzulassungen von PKW und Nutzfahrzeugen 2000-2012

PKW	Unter 1,4l	1,4 -2 l	Über 2 l	Gesamt	Nutzfahrzeuge
2000	824.161	1.825.239	728.943	3.378.343	
2001	815.226	1.805.451	721.041	3.341.718	
2002	819.002	1.725.306	708.590	3.252.898	262.925
2003	795.810	1.734.892	706.236	3.236.938	257.428
2004	765.201	1.811.362	690.263	3.266.826	276.824
2005	795.531	1.901.498	645.093	3.342.122	289.070
2006	851.346	1.948.236	668.379	3.467.961	324.858
2007	797.057	1.735.257	615.849	3.148.163	354.521
2008	855.253	1.675.662	559.125	3.090.040	357.681
2009	1.713.997	1.645.301	447.562	3.806.860	266.254
2010	1.024.961	1.460.487	430.233	2.915.681	306.476
2011	1.057.411	1.643.228	470.661	3.171.300	368.163
2012	1.166.424	1.491.169	424.911	3.082.504	343.349

Quelle: KBA 2012

Abbildung. 18: In Verkehr gebrachte Mengen an PKW und Nutzfahrzeugen 2000-2012

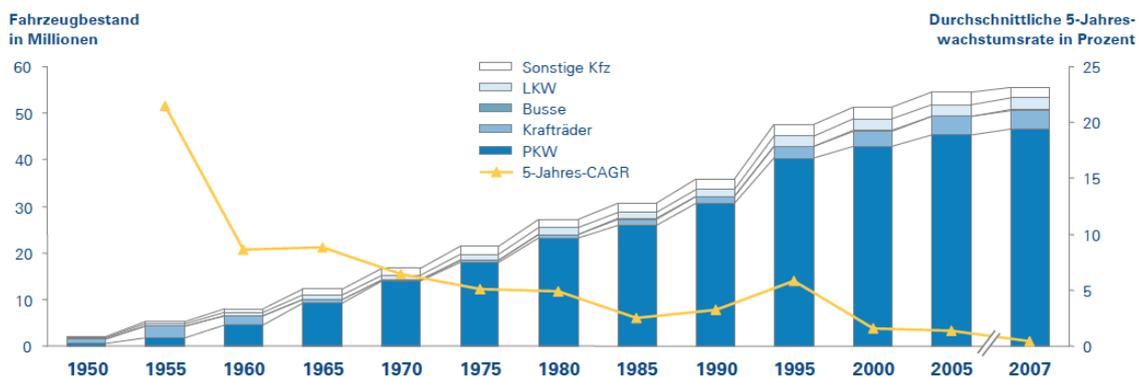


Quelle: KBA 2012

Für die Bestimmung des Abfallaufkommens 2020 mussten über diese Daten hinaus Annahmen zur Entwicklung der Zulassungszahlen bis 2020 getroffen werden. Angesichts der berechneten mittleren Verweildauer für Fahrzeuge wird allerdings nur ein geringer Anteil der nach 2012 zugelassenen Fahrzeuge im Jahr 2020 als Altfahrzeug in Deutschland anfallen, sodass sich eventuelle Abschätzungsfehler nicht signifikant auf die Menge der ReStra-Zielelemente auswirken.

Damit stellt sich die grundlegende Frage nach der zukünftigen Entwicklung von Mobilitätsstrukturen und dem Stellenwert des Autos in der Gesellschaft. Eine Studie von Arthur D. Little zur „Zukunft der Mobilität 2020 - Die Automobilindustrie im Umbruch?“ beschreibt die massiven Veränderungsprozesse, die in diesem Sektor zu erwarten sind: „Die grundlegende Veränderung der Kundennachfrage hat ihren Ursprung in den bis zum unmittelbaren Ausbruch der Krise stetig steigenden Ölpreisen und in der CO₂-Diskussion- beides hinreichend bekannte und global wirkende Entwicklungen, die allerdings bis dahin in der Aufmerksamkeit der Automobilindustrie eher ein Schattendasein geführt haben. Diese Faktoren haben das Kundenverhalten innerhalb eines „automobilhistorischen Wimpernschlags“ unumkehrbar verändert und führten insgesamt zu einer deutlichen Marktabschwächung sowie erheblichen Segmentverschiebungen von großen, luxuriösen hin zu kleineren, verbrauchseffizienten Fahrzeugen.“ (Winterhoff et al. 2009) Wie jedoch Abbildung. 19 verdeutlicht, wächst der Fahrzeugbestand in Deutschland weiterhin an, auch wenn sich das Wachstum deutlich verlangsamt.

Abbildung. 19: Bestand von Kraftfahrzeugen in Deutschland nach Fahrzeugklassen



Quelle: Winterhoff et al. 2009

Im Folgenden wird auf die Prognosen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zur Mobilitätsentwicklung in Deutschland zurückgegriffen, wonach der PKW-Bestand in Deutschland in den Jahren bis 2025 um 0,6 % jährlich steigen wird. Dieses Wachstum wurde auch den Zulassungszahlen zugrunde gelegt. Bei gleichzeitigem Bevölkerungsrückgang steigt die Auto-dichte, sodass bis 2020 jedes Jahr etwa 6 Autos pro 1000 Einwohner mehr zugelassen werden (vgl. BMVBS 2007).

Eine Studie kommt auf der Basis ökonometrischer Trendfortschreibungen zu dem Ergebnis, dass auch für den Bereich der Nutzfahrzeuge mit einem weiteren Anwachsen der Zulassungszahlen zu rechnen sein wird, auch wenn hier deutliche Verschiebungen innerhalb der Größenklassen zu erwarten sind, vgl. Tabelle 57.

Tabelle 57: Trendfortschreibung von LKW und SZM (Sattelzugmaschinen) nach Größenklassen

Jahr	< 3,5 t	3,5 - 7,5 t	7,5 - 12 t	≥ 12 t incl. GLZ	SZM
2005	170.926	21.838	8.288	21.881	32.460
2010	181.507	20.753	8.427	21.201	38.275
2020	187.338	16.969	11.127	19.235	48.903
2030	191.423	14.318	113.827	17.856	58.128

Quelle: Ökoinstitut e.V. und DLR 2009

Auf dieser Basis ergaben sich die Schätzungen zur Entwicklung der Zulassungszahlen für PKW und Nutzfahrzeuge, wie sie in Tabelle 58 dargestellt sind. Dabei wurde näherungsweise eine konstante Verteilung der Größenklassen angenommen.

Tabelle 58: Schätzung zur Entwicklung von Neuzulassungszahlen bis zum Jahr 2020 differenziert nach Hubraumklassen

Zulassungsjahr	PKW unter 1,4l	PKW 1,4 - 2 l	PKW über 2 l	Nutzfahrzeuge
2013	1.236.409	1.580.639	450.406	345.409
2014	1.310.594	1.675.477	477.430	347.481
2015	1.389.230	1.776.006	506.076	349.556
2016	1.472.584	1.882.566	536.441	351.663
2017	1.560.939	1.995.520	568.627	353.773

Zulassungsjahr	PKW unter 1,4l	PKW 1,4 -2 l	PKW über 2 l	Nutzfahrzeuge
2018	1.654.595	2.115.251	602.745	355.896
2019	1.753.871	2.242.166	638.910	358.031
2020	1.859.103	2.376.696	677.245	360.179

Neuzulassungszahlen alternative Antriebstechnologien

Elektrofahrzeuge machten zum Zeitpunkt der Untersuchung nur einen sehr geringen Teil der Neuzulassungen aus. 2012 wurden 24.394 PKW mit E-Antrieb bzw. als Hybrid neu zugelassen, davon 2.956 Elektrofahrzeuge. Am 01.01.2013 wurden insgesamt 72.109 Elektro-/Hybridfahrzeuge im Bestand gezählt (KBA 2013, KBA 2013a).

Erfahrungen zu den Nutzungsdauern von Elektroautos liegen nicht vor. Die Lebensdauer der Batterien soll bei entsprechender Nutzung in der Größenordnung von 100.000 km liegen können²⁷ (Sauer 2011). Da Elektroautos derzeit vorwiegend im Kurzstreckenbereich eingesetzt werden, kann bei einer Fahrtstrecke von 30 km pro Nutzungstag von einer Lebensdauer von ca. 10 Jahren ausgegangen werden.

Aufgrund der geringen Mengenrelevanz bis zum Bezugsjahr 2020 wird im Folgenden keine quantifizierende Betrachtung dieses Mengenstroms vorgenommen.

Bei den anderen Antriebsarten dominiert der Hybridantrieb mit 21.439 Neuzulassungen im Jahr 2012 (KBA 2013). Die folgende Tabelle veranschaulicht die Zulassungszahlen mit Blick auf die unterschiedlichen Kraftstoffe und Energiequellen.

²⁷ LiFePO₄ Zellen werden z. B. mit 3.000 Zyklen bei einer Kapazitätsleistung von 80 % des Ursprungswerts angegeben. Beispielrechnung: Reichweite von 100 km pro Ladezyklus → Laufleistung von rund 250.000 km.

Tabelle 59: Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2005 bis 2012 nach ausgewählten Kraftstoffarten

Jahr	Benzin	Diesel	Flüssiggas (einschließlich bivalent)	Erdgas (einschließlich bivalent)	Elektro	Hybrid	Zum Vergleich: Insgesamt
2005	1.903.190	1.425.576	1.380	8.053	47	3.589	3.342.122
2006	1.910.823	1.535.881	4.220	11.555	19	5.278	3.467.961
2007	1.622.276	1.501.566	5.419	11.208	8	7.591	3.148.163
2008	1.695.972	1.361.457	14.175	11.896	36	6.464	3.090.040
2009	2.608.767	1.168.633	11.083	10.062	162	8.374	3.807.175
2010	1.669.927	1.221.938	8.154	4.982	541	10.661	2.916.260
2011	1.651.637	1.495.966	4.873	6.283	2.154	12.622	3.173.634
2012	1.555.241	1.486.119	11.465	5.215	2.956	21.438	3.082.504

Quelle: KBA 2013

Ein Zuwachstrend ist vor allem bei den Hybrid-Fahrzeugen erkennbar. Das zukünftige Gesamtvolumen ist dabei schwer abzuschätzen, vor allem die Entwicklung des globalen Markts in Japan und den USA hat viele Analysten überrascht: „Aufgrund der stark wachsenden Modellpalette prognostiziert B&D Forecast für das Jahr 2025 einen Hybridanteil bei Neuzulassungen von 74 % in Japan, 73 % in den USA und 44 Prozent in Europa“ (Winterhoff et al. 2009). Allerdings muss auch die Entwicklung innerhalb der EU differenziert betrachtet werden. So erwartet der B&D Forecast für Großbritannien einen Hybridanteil von ca. 70 %, weil „dort der Diesel keine starke Lobby besitzt und steuerlich nicht subventioniert wird“ (vgl. ebd.). Demgegenüber liegen die Prognosen für den deutschen Markt deutlich niedriger als der EU-Durchschnitt.

Metallkonzentration / Verwendung strategischer Metalle

Im zweiten Schritt wurden die spezifischen Metallkonzentrationen der betrachteten strategischen Metalle für die einzelnen Produkte innerhalb der Produktgruppe Automobil bestimmt, um so die anfallende Menge im Abfallstrom Altfahrzeug für das Jahr 2020 bestimmen zu können.

Autokatalysatoren

Die Produktgruppenidentifizierung hat eine Mengenrelevanz von Autokatalysatoren für Palladium, Platin und Rhodium sowie Cer und Lanthan aufgezeigt.

Heute ist der geregelte Drei-Wege-Katalysator Stand der Technik bei Fahrzeugen mit Otto-Motor²⁸. Diesel- und Mager-Mix-Motoren haben in Deutschland in den letzten Jahren erhebliche Marktanteile bei den Neuzulassungen gewonnen. Sie nutzen den Kraftstoff effizienter aus und erzielen somit einen reduzierten CO₂-Ausstoß. Gleichzeitig entstehen vermehrt Stickoxide, die sich durch Drei-Wege-Katalysatorsysteme nicht mehr bewältigen lassen. Daher kommen in Ma-

²⁸ Seine Funktionsweise beruht auf der simultanen Oxidation von HC und CO und der Reduktion von NO_x an einer katalytisch aktiven Edelmetallkomponente (Platin/Rhodium oder Palladium/Rhodium). In der Regel werden Konvertierungsraten von über 90 % erzielt.

ger-Mix-Motoren NO_x-Speicherkatalysatoren zum Einsatz und Dieselmotoren werden mit SCR-Katalysatoren (Selective Catalytic Reduction) ausgestattet, um CO, HC und Rußpartikel zu reduzieren. Zusätzlich kommt ein gesonderter Partikelfilter (DPF) zum Einsatz.²⁹

Speziell bei Autokatalysatoren ergab sich eine zusätzliche Unsicherheit bei der Anzahl in Verkehr gebrachter Mengen durch den Austausch im Rahmen von Reparaturen oder im Rahmen von Abgasuntersuchungen. Im Folgenden wird angenommen, dass die hierbei demontierten Geräte nahezu vollständig einer Verwertung zugeführt werden und damit keine zusätzlichen Verluste entstehen.

Die Edelmetallpartikel aus Platingruppenmetallen (PGM) werden als Katalysatorbeschichtungen (dem sogenannten Washcoat) auf einem zumeist keramischen, wabenförmigen Träger aufgebracht und abschließend vom Canner mit einer metallischen Hülle versehen. In Abhängigkeit von der konkreten Abgasnachbehandlungsapplikation und vom Preis wird der PGM-Einsatz modifiziert, wobei die Edelmetallbeladung in den 90er-Jahren im Bereich von 1 - 10 g/L lag (vgl. Hagelüken 2001), inzwischen aber auch Werte bis zu 15 g erreicht (vgl. van Gelder und Kameraat 2008). Der klassische europäische Drei-Wege-Katalysator wird mit einem Pt/Rh-Verhältnis von 5:1 beladen. Während in Otto-Motoren zu großen Teilen Palladium eingesetzt wird, kommt bei Diesel-Fahrzeugen bisher hauptsächlich das wesentlich teurere Platin zum Einsatz, das auch bei den niedrigeren Betriebstemperaturen effektiv wirkt (vgl. Brenscheidt 2001). Hagelüken, Buchert und Ryan (Hagelüken et al. 2006) haben für PKW empirische Untersuchungen angestellt, welche Platinmengen sich abhängig von Motortyp und -leistung in gebrauchten Katalysatoren befinden. Entscheidend ist dabei die Altersstruktur der Fahrzeuge, da durch die unterschiedlichen gesetzlichen Bestimmungen bei Erstzulassung des Fahrzeugs (EURO-Norm 1-4) erhebliche Unterschiede beim PGM-Gehalt im Katalysator festzustellen sind. Für die Berechnung der Metallkonzentrationen im Altauto-Abfallstrom für das Jahr 2020 wird im Folgenden angenommen, dass es sich dabei ausschließlich um Katalysatoren handelt, die mindestens der EURO-Norm 4 entsprechen. Für Katalysatoren im Bereich Nutzfahrzeuge ergibt sich eine fast noch größere Spannweite, Thermo Scientific (2012) geben einen durchschnittlichen Wert von 12-15 g PGM pro Katalysator an.

²⁹ Angaben nach Mining Weekly, 30.04.2009 und Mladenov 2009

Tabelle 60: PGM-Gehalte nach Motortyp und -leistung in g/Stück nach Hubraum des PKW in Liter

Katalysator	Motortyp	0 - 1,4 l	1,4 - 2 l	>2 l	0 - 2 -
Gkat	Benzin	1,14	1,71	2,52	
	Diesel			4,28	1,43
Euro1	Benzin	1,14	2,04		
	Diesel			4,28	1,43
Euro2	Benzin	1,62	2,66		
	Diesel			4,28	1,43
Euro3	Benzin	2,85	3,52		
	Diesel			8,55	4,09
Euro4	Benzin	1,81	3,99		
	Diesel			8,55	4,75

Quelle: Hagelüken et al. 2005

In Deutschland werden die Abgasreinigungssysteme immer umfangreicher und technisch anspruchsvoller, was zur Folge hat, dass die PGM-Gehalte pro Abgassystem weiter ansteigen, die Beladungen variieren. Insgesamt nimmt die Vielfalt an Katalysatoren zu³⁰. Aus technischer Sicht ist festzustellen, dass sich zwar der PGM-Gehalt bei Katalysatoren gleicher Größe seit den 80er Jahren um fast die Hälfte abgenommen hat, da immer effizientere Technologien eingesetzt wurden (Venter 2009), diese Effizienzgewinne aber durch folgende Faktoren wieder absorbiert wurden:

1. Durch die Steigerung der Motorleistungen (PS und Hubraum)
2. Durch den höheren Anteil an Dieselfahrzeugen, deren Katalysatoren deutlich mehr PGM beinhalten. Nach Prognosen von EWI/ Prognos (2005) wird der Dieselantrieb spätestens 2025 den höchsten Marktanteil besitzen.
3. Durch den erweiterten Emissionsschutz (EU-Abgasnormen 5 und 6).

Auch gibt es aufgrund des hohen Preisniveaus immer wieder Bestrebungen, PGM durch andere Katalysatormetalle zu ersetzen oder die Filtereigenschaften durch den Einsatz der Nanotechnologie zu verbessern. Diese Innovationen haben aber bisher nicht dazu geführt, dass im großen Maßstab Technologien zum Einsatz gekommen sind, die ohne den Einsatz von Edelmetallen auskommt (vgl. Buchert et al. 2009). Allerdings ist zu beachten, dass langfristig mit zunehmender

³⁰Von der Oberklasse bis zum Kleinstwagen sind mehr als 500 unterschiedliche Kat-Typen im Einsatz. Bauform, Volumen und Edelmetallgehalt sind je nach Hersteller, regionalem Einsatz, Motorversion und Baujahr verschieden (vgl. Hagelüken 2005). Durch diese Vielfalt wird eine exakte Bestimmung der PGM-Gehalte immer schwieriger, weil Pt, Pd und Rh in unterschiedlicher Weise eingesetzt werden.

Elektromobilität eine Fahrzeugtechnologie an Marktanteil gewinnen kann, die keinen Katalysator mehr benötigt.

Die Verwendung von Cer in Autokatalysatoren ermöglicht maximale Effektivität der Reinigungsleistung bei unterschiedlichen Temperaturen und Luft-/Treibstoffgemischen. Cerdioxid speichert den Sauerstoff kurzfristig, gibt ihn rasch wieder ab und unterstützt damit die schnelle Umwandlung der Abgase (Bleiwas 2013). Daten für den spezifischen Cer-Gehalt pro Katalysator für verschiedene Hubraumklassen oder Motortypen liegen bislang nicht vor. Auf der Basis von Literaturrecherchen und Experteninterviews kommt Bleiwas (2013) in einer Studie für die USGS zu der in Tabelle 61 dargestellten Übersicht.

Tabelle 61: Cer-Gehalte pro Autokatalysator nach Fahrzeugklassen

Kategorie	Anzahl (Millionen)	Menge Cer je Katalysator (g)
PKW und leichte Nutzfahrzeuge	230,4	80
Heavy-duty vehicles	11,62	100
Motorräder	8,212	23
Gesamt	250,2	

Quelle: Bleiwas 2013

Noch schlechter ist die Datenlage für die Verwendung von Lanthan in Autokatalysatoren, das die Temperaturstabilität im Katalyseprozess verbessert. Es wurde daher auf der Basis von Daten zur Verwendung der verschiedenen Seltenerdoxide ein Mengenverhältnis von Cer zu Lanthan bestimmt, das als konstant für die verschiedenen Fahrzeugklassen angenommen wurde. Wie in Tabelle 62 dargestellt, wurden 2008 6.840 t Cer-Oxid und 380 t Lanthan-Oxid in Autokatalysatoren eingesetzt.

Tabelle 62: Geschätzter weltweiter Einsatz von Seltenen Erden nach Endnutzungsbereichen 2008

Anwendung	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Dy ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	SmO	Tb ₆ O ₇	Eu ₂ O ₃	An-dere
Mengen in t											
Autokatalysatoren	6.840	380	228		152						
Keramiken	840	1.190	840	3.710	420						
Katalytisches Cra-cken	1.980	17.800									
Glasadditive	7.920	2.880	360	240	120						480
Metallurgie ohne Batterien	5.980	2.990	1.900		633						
Neodymmagnete			18.200		6.140	1.310	525		53		
Batterielegierungen	4.040	6.050	1.210		399			399	-		
Leuchtstoffe	990	765		6.230			162		414	441	
Glaspolitur	10.700	5.170			574						
Andere	2.930	1.430	1.130	1.430	300		75	150			75
Gesamt	42.200	38.700	23.900	11.600	8.740	1.310	762	549	467	441	555
Anteil in %											
Autokatalysatoren	90.0	5.0	3		2						
Keramiken	12	17	12	53	6						

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Anwendung	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Dy ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	SmO	Tb ₆ O ₇	Eu ₂ O ₃	An-dere
Katalytisches Cra-cken	10	90									
Glasadditive	66	24	3	2	1						4

Quelle: Goonan 2011

Auf der Basis der dargestellten Quellen und Abschätzungen ergab sich damit die folgende Quantifizierung von Metallkonzentrationen pro Automobil in Katalysatoren.

Tabelle 63: Konzentrationen strategischer Metalle in Autokatalysatoren

Element	PKW bis 1400 ccm	PKW 1400-2000 ccm	PKW über 2000 ccm	Nutzfahrzeuge
Pt*	0,8 g	1,2 g	1,8 g	10,8 g
Pd	1,4 g	2,2 g	3,4 g	
Rh	0,6 g	0,8 g	1,5 g	2,7 g
Ce-Oxid	80 g	80 g	80 g	100 g
La-Oxid**	5 g	5 g	5 g	6

Die Mengenangaben für Platin, Palladium und Rhodium ergeben sich unter der Annahme eines konstanten Pd/Pt zu Rh Verhältnisses von 4:1 und einem Pd zu Pt Verhältnis von 2:1. Für die Nutzfahrzeuge wird davon ausgegangen, dass die hier verwendeten Diesel-Kats nahezu ausschließlich mit Platin verwendet werden.

**Für die Berechnung der Menge Lanthan-Oxid pro Autokatalysator wird angenommen, dass dieses in einem konstanten Mengenverhältnis zu Cer-Oxid eingesetzt wird.

Seltenerd-Magneten

Die im Projekt durchgeführte Produktgruppenidentifizierung hat für den Bereich Automobile eine Mengenrelevanz für Gadolinium, Dysprosium sowie mit Einschränkung Terbium aufgezeigt. Aufgrund der Abschneidekriterien (siehe Methodenbeschreibung in Kapitel 5.1) wurde Neodym nicht als Fokusmetall ausgewählt. Zur Verdeutlichung von Mengenströmen wurde Neodym jedoch teilweise mit in die Betrachtung einbezogen, da hierfür teilweise eine bessere Datenlage verfügbar war und es oftmals in bekannten Massenverhältnissen zu anderen Seltenerdmetallrohstoffen eingesetzt wird.

Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht, dass diese Metalle im konventionellen Automobilbereich in relevanten Mengen überwiegend in Seltenerdmetallen verwendet werden. Hinzu kommen geringfügige Mengen in Leuchtstoffen, die z. B. in LCD-Anzeigenelementen verwendet werden. Mit dem Bereich der Permanent-Magnete wird das dynamischste Marktsegment im Bereich der Seltenen Erden betrachtet, denn die Nachfrage entwickelt sich nicht für alle Seltenen Erden in gleichem Maße. Während sich in den 90er Jahren die gesamte Produktion von Seltenen Erden um den Faktor 2,45 gesteigert hat, entwickelten sich die Wachstumsraten von Neodym und Dysprosium für Magnetanwendungen mit dem Faktor 9 - 10. (Rieger 2009)

Tabelle 64: Verteilung der Nachfrage nach Seltenen Erden nach Marktsektoren im Jahr 2008 (Angaben in Tonnen)

Verbindung	Katalysatoren	Keramiken	Glasindustrie	Metallurgie ohne Batterien	Seltenerd-magnete	Batterielegierungen	Leuchtstoffe	Andere	Gesamt
Ceroxid	8.820	840	18.620	5.980		4.040	990	2.930	42.200
Dysprosi-umoxid					1.310				1.310
Europi-umoxid							441		441
Gadolini-umoxid					525		162	75	762
Lan- thanoxid	18.180	1.190	8.050	2.990		6.050	765	1.430	38.700
Neody-umoxid	228	840	360	1.900	18.200	1.210		1.130	23.900
Praseody-umoxid	152	420	694	633	6.140	399		300	8.740
Samari-umoxid						399		150	549
Terbi-umoxid					53		414		467
Yttriumoxid		3.710	240				6.230	1.430	11.600
Andere Oxide			480					75	555
Gesamt	27.400	7.000	28.400	11.500	26.300	12.100	9.000	7.500	129.000

Quellen: Blade 2010, zitiert in Goonan 2011

Permanentmagnete enthalten zu etwa 30 % Seltene Erden wie Neodym, Praseodym und Dysprosi-um. Das hoch magnetische Neodym erhöht die Energiedichte eines Standard-Eisenmagneten. Eine höhere Hitzebeständigkeit über 80 C hinaus wird durch die Beimischung von Terbium, Praseodym oder Dysprosi-um erzielt. Das Energieprodukt von NdFeB-Magneten ist um 40 % höher als das von SmCo-Magneten, was ihre Anwendung durch die dadurch möglichen Gewichts- und Platz-einsparungen gerade im Automobilbereich interessant macht. Die Remanenz und Koerzitivfeld-stärke sind im Vergleich ebenfalls höher, was neue technische Ansätze im Bereich der Miniaturi-sierung und einen reduzierten Materialeinsatz bei gleicher Systemleistung ermöglicht (vgl. Rieger 2009, S.50).

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 65 betrachtet die Einsatzgebiete von NdFeB- und von SmCo-Magneten. Bezogen auf die Gesamtmasse dominieren NdFeB-Magnete in dieser Gegenüberstellung.

Tabelle 65: Verwendung von Seltenen-Erd-Permanentmagneten in der Fahrzeugindustrie

Einsatzgebiet	NdFeB-Magnete	SmCo-Magnete
Permanentmagnet Starter/Generator	X	
Sensoren für die Position der Drosselklappe von Einspritzsystemen, Nockenwelle, Kurbelwelle, Tankanzeige, elektrische Kraftstoffpumpe, elektrische Pegel, Airbag	X	X
Sensoren für Motor-, Getriebe-, Raddrehzahl, ABS-Systeme, Beschleunigungs-ESP	X	X (vorwiegend)
Motoren im Bereich Karosserie sog. „Drive by Wire“ (Antriebskraft für Schloss, Fensterheber, Sitzverstellung, Tür, Scheibenwischer, Klimaanlage, Radioantenne)	X	
Motoren im Bereich Fahrwerk und Sicherheit (Antriebskraft für Lenkung, Bremse, Traktionskontrolle/ABS)	X	

Quelle: angepasst nach Rieger 2009

Abbildung. 20 zeigt die typische Verwendungen und ihre Lokalisierung im Fahrzeug. Angesichts der Vielzahl und Heterogenität unterschiedlicher Anwendungen ist allerdings auch die Qualität der Datenlage als eher schlecht einzuordnen. Tabelle 66 zeigt eine Übersicht von Studien zur stofflichen Zusammensetzung von PKW, nach Angaben der Autoren wird in keiner die spezielle Verwendung von Dysprosium oder die Verteilung auf einzelne Elektromotoren thematisiert. Beispielsweise gibt Mercedes-Benz in einem Life Cycle Assessment (LCA) nach VDA-Richtlinie 231 - 106 für die neue A-Klasse an, dass pauschal insgesamt 1 kg Selten Erden- bzw. Edelmetallkonzentrate verwendet werden (Daimler AG 2012). Ein Grund für die schlechte Datenlage liegt auch darin begründet, dass viele der eingesetzten Elektromotoren zum Bereich der Sonderausstattung gehören, z. B. die elektrische Sitzverstellung für Fahrer und Beifahrer, wo alleine bis zu 18 Einzelmotoren eingesetzt werden können.

Abbildung. 20: Permanentmagnete in Automobilen



Quelle: Ökopol

Tabelle 66: Datengrundlage zur Ermittlung der Materialzusammensetzung der Basis-PKW

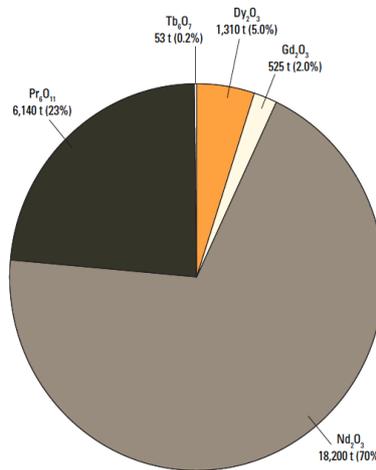
Quelle	Autor / Titel	Beschreibung
Stau 2006	Stauber, R. (2006): Werkstoffe im Automobilbau - Anforderungen und Trends	Materialzusammensetzung der BMW 3er und 7er Serie
Daim 2005	Daimler AG (2005): Environmental Certificate Mercedes-Benz S-Class	Materialzusammensetzung der Mercedes-Benz S-Klasse
Daim 2007	Daimler AG (2007): Environmental Certificate Mercedes-Benz C-Class	Materialzusammensetzung der Mercedes-Benz C-class
Daim 2008	Daimler AG (2008): Umwelt-Zertifikat Mercedes Benz A-Klasse	Materialzusammensetzung der Mercedes-Benz A-class
Opel 2002	Opel AG (2002): Nachhaltigkeitsbericht; Teil 3: Öko-Effizienz & Klimaschutz	Materialzusammensetzung des Opel Corsa
VW 2008	Volkswagen AG (2008): Der Golf: Umweltprädikat – Hintergrundbericht	Materialzusammensetzung des VW Golf
VW 2008a	Volkswagen AG (2008): Der Passat: Umweltprädikat – Hintergrundbericht	Materialzusammensetzung des VW Passat
VW 2006	Volkswagen AG (2006): Verwertungsanalysen von Neufahrzeugen	Materialzusammensetzung des VW Golf (A1 to A5)
Stodol 1995	Stodolsky, F. et al. (1995): Life-cycle energy savings potential from aluminum-intensive vehicles; Argonne National Laboratory – Transportation Technology R&D Center	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen US Pkw (1994)
Cheah 2007	Cheah, L. et al. (2007): Factor of two: Halving the fuel consumption of new U.S. automobiles by 2035; Massachusetts Institute of Technology – Laboratory for Energy and Environment	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen US Pkw (2006)
Weiss 2000	Weiss, M.A. et al. (2000): On the road in 2020 – a life-cycle analysis of new automobile technologies; Massachusetts Institute of Technology – Energy Laboratory	Materialzusammensetzung eines US Pkw (1996)
IFEU 2006	Patyk, A. (2006): Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Straßenfahrzeugen – Anhang	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen Otto/Diesel PKW (2005)
IPTS 2007	Institute for Prospective Technological Studies: Environmental Improvement of Cars (IMPRO-car) – Reference Report	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen europ. Pkw (2007)
INFRA 2002	INFRA (2002): Transport and Environment Database System (TRENDS) - Report 5: Waste from Road Transport	Materialzusammensetzung eines Euro 5 Otto/Diesel-Pkw
Umicore 2008	Müller, F. (Umicore AG): PGM-Beladung nach Motorisierung und Fahrzeugschadstoffklassen. Hanau 2008 (personal communication)	PGM-Beladung eines Euro 5 Otto/Diesel-Pkw
Schade 2008	Schade, W. (2008): Impact on resource use and emissions of transport by using renewable energy and hydrogen as transport fuel. In: Hartard, S. et al. (Hrsg.): Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte	PGM-Beladung eines Euro 5 Otto/Diesel-Pkw

Quelle: Ökoinstitut e.V. und DLR 2009

Im Folgenden wird daher eine Top-Down-Abschätzung vorgenommen und diese anschließend auf ihre Plausibilität überprüft. Nach Angaben von Oakdene Hollins (2011) wurden im Jahr 2008 ca. 10.400 t Seltene Erden für Permanentmagnete verwendet. Davon entfielen ca. 20 % bzw. 2.080 t auf den Automobilbereich. Nach Angaben des Internationalen Automobilherstellerverbandes OICA betrug die weltweite Automobilproduktion (PKW und Nutzfahrzeuge im Jahr 2008)

70,520,493 Stück (OICA o.J.). Die durchschnittliche Menge an Seltenen Erden in Permanentmagneten pro Fahrzeug betrug damit 29,5 g. Abbildung. 21 zeigt die Verteilung von Seltenen Erden angegeben als Oxide in NdFeB-Magneten, wie sie beispielsweise in elektrischen Fensterhebern verwendet werden. Danach betrug der Anteil von Dysprosium-Oxid 5 %, von Gadolinium-Oxid 2 % und von Terbium-Oxid 0,2 %.

Abbildung. 21: Verteilung von Seltenen Erde Oxiden in Neodym-Eisen-Bor-Magneten in 2008



Quelle: Goonan 2011

Für die Anzahl von Elektromotoren pro Fahrzeug und damit den spezifischen Anteil der untersuchten strategischen Metalle wurde angenommen, dass aufgrund der höherwertigen Ausstattung in den größeren Marktsegmenten eine Steigerung von jeweils 20 % vorhanden ist. Hintergrund war die Überlegung, dass Oberklassefahrzeuge wahrscheinlich eine größere Bedeutung als Quelle strategischer Metalle im Vergleich zu Kleinfahrzeugen haben da Oberklassefahrzeuge mehr elektronische Bauteile und elektrische Motoren enthalten und neue Entwicklungen im Bereich der Elektronik zunächst stärker in Oberklassefahrzeugen eingebaut werden. Die Diffusion neuer Technologien in Kleinfahrzeuge erfolgt zeitverzögert wodurch diese Fahrzeugklasse geringere Relevanz in der Betrachtung des Recyclingpotenzials im Jahr 2020 erhält. Hierbei ist jedoch zu vermuten, dass für einzelne Fahrzeuge die Unterschiede zwischen verschiedenen Herstellern bedeutsamer sind als zwischen den Größenklassen. Insgesamt ist die Datenlage als unbefriedigend zu bezeichnen. Tabelle 67 zeigt die resultierenden Konzentrationen für Dysprosiumoxid, Gadoliniumoxid und Terbiumoxid in Automobilen.

Tabelle 67: Konzentrationen für Dysprosiumoxid, Gadoliniumoxid und Terbiumoxid in Automobilen, differenziert nach Fahrzeugklasse

Elemente	PKW bis 1400ccm	PKW 1400-2000 ccm	PKW über 2000 ccm	Nutzfahrzeuge
Seltene Erden	23,6 g	29,5 g	35,4 g	35,4 g
Dysprosium-Oxid	1,18 g	1,475 g	1,77 g	1,77 g
Gadolinium-Oxid	0,472 g	0,59 g	0,708 g	0,708 g
Terbium-Oxid	0,0472 g	0,059 g	0,0708 g	0,0708 g

Weitere Anwendungsbereiche

Neben den betrachteten Anwendungsbereichen werden ReStra-Zielmetalle in verschiedenen weiteren Funktionen im Automobilbereich eingesetzt, jedoch im Vergleich zur Gesamteinsatzmenge der jeweiligen Metalle in nicht mengenrelevanten Größenordnungen.

Exporte aus der Nutzungsphase

Im dritten Schritt zur Bestimmung der im Jahr 2020 im Abfallstrom Altauto anfallenden Mengen strategischer Metalle wurden die Exporte aus der Nutzungsphase heraus betrachtet. Automobile sind mobile Güter, die zu einem sehr hohen Anteil nach ihrer Außerbetriebsetzung in Deutschland nicht hier als Abfall anfallen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Exporte aus einer globalen Perspektive nicht mit Verlusten gleichzusetzen sind, da je nach Ziel der Exporte durchaus Infrastrukturen für die Demontage und das Recycling vorhanden sind. Die folgenden Berechnungen beziehen sich entsprechend der Methodik in ReStra auf die in Deutschland anfallenden Abfallmengen.

Die Gesamt-Anzahl der Fahrzeuge, die die Nutzungsphase in Deutschland verlassen, kann über die Außerbetriebsetzungen beschrieben werden. Dabei bestehen seit 2007 wie beschrieben erhebliche Datenunsicherheiten durch vorübergehende Außerbetriebsetzungen, deren weiterer Verbleib zudem in einigen Fällen unklar bleibt (keine endgültige Außerbetriebsetzung oder Wiederzulassung durch den Besitzer). Eine erste Schätzung erfolgte über die Angaben zum jeweiligen Fahrzeugbestand. Die folgende Tabelle listet die Bestandsveränderungen für M1-Fahrzeuge in Deutschland auf.

Tabelle 68: Bestandsveränderung von M1-Fahrzeugen in Deutschland (Datengrundlage KBA 2013a)

Jahr	Bestand	Differenz zum Vorjahr (Stück)
2000	42.839.906	
2003	44.657.303	605.799
2004	45.022.926	365.623
2005	45.375.526	352.600
2006	46.090.303	714.777
2007	46.569.657	479.354
2008	41.183.594	Ab 1. Januar 2008 nur noch angemeldete Fahrzeuge ohne vorübergehende Stilllegungen/Außerbetriebsetzungen
2009	41.321.171	137.577
2010	41.737.627	416.456
2011	42.301.563	563.936
2012	42.927.647	626.084
2013	43.431.124	503.477

Aufgrund der Berichtspflichten im Rahmen der Altautorichtlinie berichtet Deutschland der EU-Kommission auch über die Anzahl der in Deutschland entsorgten **Altautos** (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 69: Altautoanzahl in Deutschland in Millionen

Jahr	Anzahl (Mio.)
2004	0,54
2005	0,47

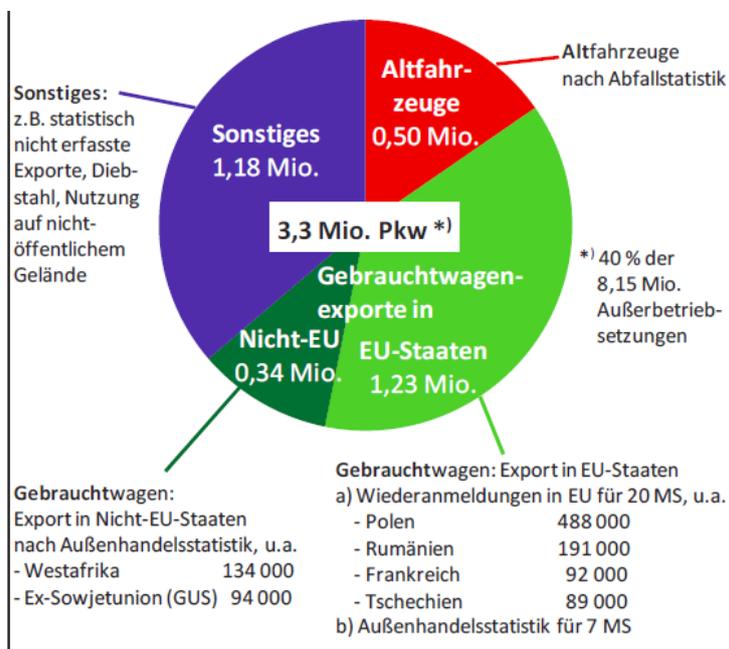
Jahr	Anzahl (Mio.)
2006	0,50
2007	0,46
2008	0,42
2009	1,78
2010	0,5
2011	0,47
2012	0,48
2013	0,5

Quelle: Kohlmeyer 2015

Der Effekt der Abwrackprämie wird auch im Verhältnis Neuzulassung/Altfahrzeuge deutlich. Während z. B. in 2007 das Verhältnis zwischen Neuzulassungen und Altfahrzeugen 0,15 war, stieg es im Jahr 2009 auf 0,47 an. Im Jahr 2010 war das Verhältnis wahrscheinlich auch noch durch die geringeren Zulassungszahlen im Nachlauf der Abwrackprämie geprägt (0,17 durch die unterdurchschnittliche Zahl der Neuzulassungen).

Abbildung. 22 verdeutlicht, dass nur ein relativ geringer Anteil der außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge einer Verwertung in Deutschland zugeführt wurde. Der weitaus größte Anteil wurde nach der Außerbetriebsetzung in Deutschland in anderen EU-Staaten wieder angemeldet. Ein relativ geringer Anteil wurde entsprechend dieser Statistik direkt in Nicht-EU-Staaten exportiert. Bei ca. einem Drittel der als endgültig außer Betrieb gesetzt angenommenen PKW konnte der Verbleib nicht eindeutig bestimmt werden.

Abbildung. 22: Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge im Jahr 2013



Quelle: Kohlmeyer 2015

Angesichts der intensivierten Bemühungen, den illegalen Verbleib zu unterbinden, wurde für das Jahr 2020 angenommen, dass diese statistisch ungeklärten Fälle in Deutschland als Abfall anfal-

len und nur die legalen Ausfuhren vom potenziellen Abfallaufkommen abzuziehen sind. Die Qualität der dabei zur Abschätzung zur Verfügung stehenden Daten unterscheidet sich jedoch erheblich. Eine Klärung des Verbleibs von außer Betrieb gesetzten Fahrzeugen erfolgt im Rahmen des UBA-Forschungsvorhabens „Entwicklung von Lösungsvorschlägen, einschließlich rechtlicher Instrumente, zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen“ (FKZ 3714 33 315 0). Die Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt des Abschlusses von ReStra noch nicht vor.

Exporte in Nicht-EU-Staaten

Die Exporte von Gebrauchtfahrzeugen in Nicht-EU-Staaten werden statistisch in der Außenhandelsstatistik der EU, COMEXT, erfasst. Da die Meldeschwellen für den Extra-EU-Handel im Betrachtungszeitraum relativ gering waren (1.000 Euro bzw. 1.000 kg, vgl. SRU 2008), ist eine relativ hohe statistische Erfassungsrate anzunehmen. Unter den Kennziffern CN8 87032190³¹, CN8 87032290, CN8 87032390 und CN8 87032490 sind in der EU Außenhandelsstatistik COMEXT gebrauchte PKW mit Otto-Benzin-Motor bzw. 8703 31 90, 8703 32 90 und 8703 33 90 für Dieselfahrzeuge unterschiedlicher Motorklassen verzeichnet, z. B. für die niedrigste Motorgröße unter einem Liter Hubraum³². Für den Bereich der unterschiedlichen Nutzfahrzeuge ergeben sich insgesamt 17 verschiedene Fahrzeugklassen, unterteilt in Schleppfahrzeuge, Busse und Lastkraftwagen. Die vollständige Auflistung der Warennummern und ihrer Abgrenzungen findet sich in Tabelle 70.

Tabelle 70: Klassifizierungen von Gebrauchtfahrzeugen in der EU-Handelsstatistik

Warennummer	Fahrzeug	Motorisierung	Hubraum
CN8 87032190	PKW	Ottomotor	bis 1000 cm ³
CN8 87032290			1000 - 1500 cm ³
CN8 87032390	PKW, Wohnmobile		1500 - 3000 cm ³
CN8 87032490			> 3000 cm ³
CN8 87033190	PKW	Dieselmotor	bis 1500 cm ³
CN8 87033290	PKW, Wohnmobile		1500 - 2500 cm ³
CN8 87033390			> 2500 cm ³
CN8 87012090	Nutzfahrzeug (Sattelzugmaschine)		
CN8 87019050	Nutzfahrzeug (Ackerschlepper)		
CN8 87021019	Nutzfahrzeug (Bus)	Dieselmotor	>2500 cm ³
CN8 87021099	Nutzfahrzeug (Bus)	Dieselmotor	-2500 cm ³

³¹Die offizielle Beschreibung der Handelsklasse lautet: „Motor cars and other motor vehicles principally designed for the transport of persons, incl. station wagons and racing cars, with spark-ignition internal combustion reciprocating piston engine of a cylinder capacity <= 1.000 cm³ used (excl. vehicles for the transport of persons on snow and other specially designed vehicles of subheading 8703.10)“

³² Die Klassifizierung entspricht damit nicht vollständig der in ReStra gewählten Produktdifferenzierung, die sich ergebenden Fehlzuordnungen zu den verschiedenen Größenklassen bei PKW, können aber für das Gesamtergebnis als vernachlässigbar angesehen werden.

Warennummer	Fahrzeug	Motorisierung	Hubraum
CN8 87029019	Nutzfahrzeug (Bus)	Ottomotor	<2800 cm ³
CN8 87029039	Nutzfahrzeug (Bus)	Ottomotor	-2800 cm ³
CN8 87042139	Nutzfahrzeug (LKW - 5 t)	Ottomotor	> 2500 cm ³
CN8 87042199	Nutzfahrzeug (LKW - 5 t)	Ottomotor	-2500 cm ³
CN8 87042299	Nutzfahrzeug (LKW 5 - 20 t)	Dieselmotor	
CN8 87042399	Nutzfahrzeug (LKW >20 t)	Dieselmotor	
CN8 87043139	Nutzfahrzeug (LKW - 5 t)	Dieselmotor	> 2800 cm ³
CN8 87043199	Nutzfahrzeug (LKW - 5 t)	Dieselmotor	- 2800 cm ³
CN8 87043299	Nutzfahrzeug (LKW <5 t)	Ottomotor	

Insgesamt sind die Extra-EU-Exporte von PKW und Nutzfahrzeugen in der Vergangenheit relativ stabil gewesen (vgl. nachfolgende Tabelle). Die Gesamtzahl war auch in deutlich geringerem Ausmaß als die innereuropäischen Exporte von der Umweltprämie betroffen gewesen.

Tabelle 71: Extra-EU-Exporte von M1-Fahrzeugen aus Deutschland, in Mio. Fahrzeugen

Jahr	Anzahl (Mio.)
2007	0,26
2008	0,24
2009	0,22
2010	0,28

Im Vergleich zu PKW zeigen die Auswertungen der Außenhandelsstatistik, dass bei Nutzfahrzeugen ein deutlich größerer Anteil direkt in Nicht-EU-Staaten exportiert wurde.

Gemäß der Untersuchungssystematik in ReStra wurden Importe über die Anmeldestatistiken im Rahmen der in Verkehr gebrachten Mengen erfasst.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die gesamten Exporte von Fahrzeugen aus der Nutzungsphase in Länder außerhalb der EU. Für die Entwicklung der Exporte bis zum Jahr 2020 wird dabei angenommen, dass die Anteile der verschiedenen Größenklassen am Export konstant bleiben³³.

³³ Dazu ist auf Mittelwerte der Jahre vor der Umweltprämie zurückgegriffen worden, um diese Sondereffekte zu bereinigen.

Tabelle 72: Extra-EU-Exporte von PKW

Jahr	Größeneinheit	PKW < 1,4 l	PKW 1,4 - < 2 l	PKW >2 l	gesamt
2005	Stück	8.266	213.984	1.9742	241.992
	Anteil	3%	88%	8%	8%
2006	Stück	21.322	214.080	26.637	262.030
	Anteil	8%	82%	10%	8%
2020	Stück	15.065	213.419	22.597	251.081
	Anteil	6%	85%	9%	8%

Quelle: COMEXT, eigene Berechnungen

Tabelle 73: Extra-EU-Exporte von Nutzfahrzeugen

Jahr	Stück	Anteil
2005	72.725	24%
2006	87.293	29%
2020	86.119	27% (Mittelwert)

Quelle: COMEXT, eigene Berechnungen

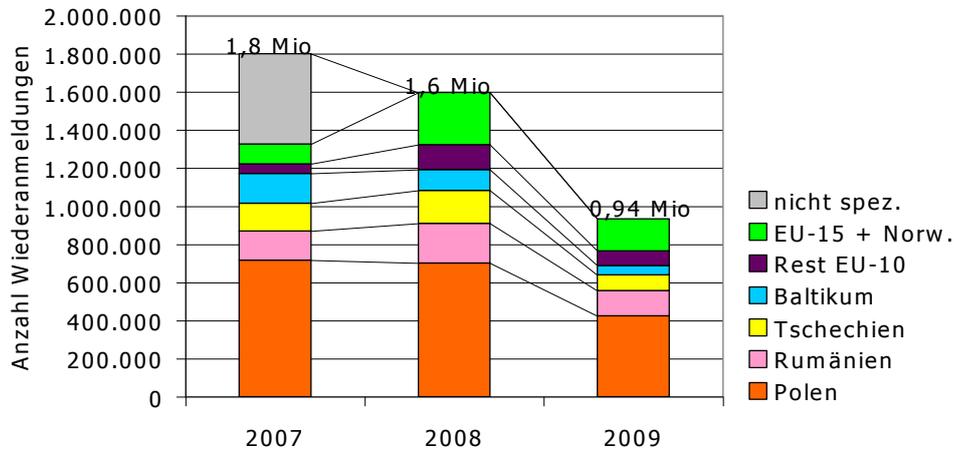
Exporte in EU-Staaten

Wie dargestellt wurden etwa 40 % der als endgültig außer Betrieb gesetzt angesehenen Fahrzeuge als Gebrauchtwagen in andere EU-Staaten ausgeführt. Zur Erfassung dieser Exporte zwischen den EU-Staaten ist die EU-Außenhandelsstatistik COMTEXT kaum geeignet, da aufgrund der hohen Meldeschwellen keine vollständige Erfassung der Exporte erfolgt. Vielfach sind im Gebrauchtwagenhandel Kleinunternehmen tätig, welche diesen Schwellenwert nicht erreichen.

Zentrale Quelle ist hier das Zentralregister „REGINA - Registration and Information Agreement“ des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), das auf Grundlage der EU-Richtlinie 1999/37/EG eingerichtet wurde. Eigentliches Ziel der Datenbank ist jedoch nicht das Monitoring von Stoffströmen, sondern vor allem die Bekämpfung internationaler Kriminalität im Bereich Autodiebstahl. Daher erfolgt hier auch keine Differenzierung nach Fahrzeugklassen o. ä.

Abbildung. 23 verdeutlicht, dass die Inner-EU-Exporte von Gebrauchtwagen zu ca. 80 % in die neuen Mitgliedsländer gingen, wobei Polen eine Sonderstellung einnahm. Bei den Zahlen zu 2009 und den Folgejahren war zu berücksichtigen, dass hier Sondereffekte durch die Umweltpremie aufgetreten sind, die einen deutlichen Rückgang von Exporten vor allem bei älteren Fahrzeugen bewirkt hat. Berücksichtigt man auch die Zahlen für 2005 und 2006, so ergibt sich ein relativ konstanter Anteil der innereuropäischen Exporte an den in Deutschland endgültig abgemeldeten Fahrzeugen von ca. 40 - 50 %.

Abbildung. 23: Wiederanmeldungen von Gebrauchtwagen aus Deutschland



Quelle: KBA Jahresbericht 2007 und Auskunft KBA 2009 und 2010

Da die REGINA-Datenbank jedoch nur absolute Fahrzeugzahlen und keine Spezifizierung nach Größenklassen oder Altersstruktur aufweist, war auch die Struktur des in Deutschland anfallenden Abfallstroms in Bezug auf die Zusammensetzung der Altfahrzeuge nicht eindeutig zu bestimmen. Die vom Statistischen Bundesamt erhobene Abfallstatistik erfasst den Input von anerkannten Demontagebetrieben als Gesamtmenge, woraus sich keine klaren Rückschlüsse auf die Anteile der verschiedenen Fahrzeugtypen ziehen lassen.

Dabei scheint eindeutig, dass weder die Altersverteilung der außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge noch die Größenklassenverteilung der Altersverteilung von Altfahrzeugen entspricht. Vielmehr wird in Gesprächen mit Demontagebetrieben betont, dass es einen Filtereffekt durch den Export gibt, durch den junge, große und teure Fahrzeuge überproportional exportiert werden und nicht für die Entsorgung in Deutschland zur Verfügung stehen.

Die Verteilung der in Deutschland verbleibenden Größenklassen ist jedoch relevant. Näherungsweise soll daher für die Intra-EU-Exporte davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung der Deutschland auf diesem Weg verlassenden Fahrzeuge der Zusammensetzung der Extra-EU-Exporte entspricht, für die die COMEXT-Datenbank zwar keine Altersangaben, aber Angaben zu den Hubraumklassen und den Anteilen von Nutzfahrzeugen macht. Die Annahme scheint vor dem Hintergrund gerechtfertigt, dass ohnehin ein Großteil dieser innereuropäisch exportierten Fahrzeuge nach einer Zweitnutzung in der EU noch einer Drittnutzung außerhalb der EU zugeführt werden (vgl. Hagelüken 2007). Für die Entwicklung bis 2020 wurde außerdem analog zu den Extra-EU-Exporten angenommen, dass der Anteil exportierter Fahrzeuge und der Zusammensetzung nach Größenklassen konstant bleibt³⁴.

³⁴ Angesichts der hohen Exportraten sind damit natürlich relevante Auswirkungen auf die Gesamtmenge der im Abfallstrom anfallenden strategischen Metalle verbunden, es liegen jedoch keine anderweitigen abgesicherten Abschätzungen über die Entwicklung der Exportmengen bis 2020 vor.

Tabelle 74: Innereuropäische Exporte von PKW aus der Nutzungsphase

Jahr	Größeneinheit	< 1,4 l	1,4 - < 2 l	> 2 l	gesamt
2005	Stück				1.084.936
	Anteil	6%	85%	9%	40%
2006	Stück				1.224.763
	Anteil	6%	85%	9%	40%
2020	Stück	75.324	1.067.093	112.986	1.255.404

Quelle: KBA, eigene Berechnungen

Tabelle 75: Innereuropäische Exporte von Nutzfahrzeugen aus der Nutzungsphase

Nutzfahrzeuge	Stück	Anteil
2005	56.173	19%
2006	59.221	20%
2020	63.792	

Quelle: KBA, eigene Berechnungen

Ergebnisse

Die Berechnung der in 2020 anfallenden Mengen von ReStra-Zielmetallen aus Altfahrzeugen erfolgte auf Basis der dargestellten Methodik und Daten. Bzgl. des Weibull-Formparameter wird für PKW in NIES (2010) ein Wert von $k = 4$ angegeben. Dies deckt sich auch mit einer Angabe aus Møller Andersen et al. (2008), wo speziell für Deutschland ein Wert von $k = 4,01$ angegeben wird. Für Nutzfahrzeuge finden sich Werte zwischen 2,2 und 3 (NIES 2010). Entsprechend erfolgte die Berechnung für PKW unter Annahme eines Formparameters von $k = 4$ und einer durchschnittlichen Verweildauer von 13 Jahren. Für Nutzfahrzeuge erfolgte die Berechnung für Formparameterwerte von $k = 2,2$ und $k = 3$, um die Breite der Literaturwerte abzudecken. Als durchschnittliche Verweildauer wurde hier entsprechend der obigen Ausführungen 12 Jahre angenommen.

PKW

Für PKW ergaben sich anhand der Zeitreihe zur Inverkehrbringung die in Tabelle 76 und Tabelle 77 dargestellten potenziell zu erwartenden Mengen in 2020. Diese Mengen wurden im nächsten Schritt durch die Exporte aus der Nutzungsphase korrigiert. Hierzu wurden die zu erwartenden Exporte in 2020 von der ermittelten Fahrzeuganzahl subtrahiert. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 78 dargestellt.

Tabelle 76: Anzahl Fahrzeuge (PKW) und korrespondierende Mengen von ReStra-Zielmetallen aus Katalysatoren am Ende der theoretischen Nutzungsphase in 2020

Fahrzeuggruppe	Anzahl	Pt	Pd	Rh	Ce-Ox	La-Ox
<1,4l	928.225	743	1.300	557	74.258	4.641
1,4- bis 2l	1.688.353	2.026	3.714	1.351	135.068	8.442
>2l	578.977	1.042	1.969	1.563	46.318	3.474
SUMME	3.195.554	3.811	6.982	3.471	255.644	16.557

Tabelle 77: Anzahl Fahrzeuge (PKW) und korrespondierende Mengen von ReStra-Zielmetallen aus anderen Anwendungen als Katalysatoren am Ende der theoretischen Nutzungsphase in 2020

Fahrzeuggruppe	Anzahl	SE	Dy-Ox	Gd-Ox	Tb-Ox
<1,4l	928.225	21.906	1.095	438	44
1,4- bis 2l	1.688.353	49.806	2.490	996	100
>2l	578.977	20.496	1.025	410	41
SUMME	3.195.554	92.208	4.610	1.844	184

Tabelle 78: Exporte - Korrigierte zu erwartende Fahrzeugmenge (PKW) in 2020 (eig. Berechnung)

Fahrzeuggruppe	Anzahl	Intra-EU	Extra-EU	Gesamt	Ergebnis
<1,4l	928.225	75.324	15.065	90.389	837.836
1,4- bis 2l	1.688.353	1.067.093	213.419	1.280.512	407.841
>2l	578.977	112.986	22.597	135.583	443.394
SUMME	3.195.554	1.255.403	251.081	1.506.484	1.689.070

Anhand der korrigierten Fahrzeugmengen in 2020 und der ermittelten Metallkonzentrationen wurden die zu erwartenden Metallmengen in 2020 bestimmt (Tabelle 79).

Tabelle 79: ReStra-Zielemetalle aus Katalysatoren [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (PKW)

Fahrzeuggruppe	Pt	Pd	Rh	Ce-Ox	Ce	La-Ox	La
<1,4l	670	1.173	503	67.027	57.228	4.189	3.572
1,4- bis 2l	489	897	326	32.627	27.857	2.039	1.739
>2l	798	1.508	1.197	35.471	30.286	2.660	2.268
SUMME	1.958	3.578	2.026	135.126	115.370	8.889	7.579

Tabelle 80: ReStra-Zielemetalle aus sonstigen Anwendungen [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (PKW)

Fahrzeuggruppe	SE	Dy-Ox	Dy	Gd-Ox	Gd	Tb-Ox	Tb
<1,4l	19.773	989	861	395	343	40	34
1,4- bis 2l	12.031	602	524	241	209	24	21
>2l	15.696	785	684	314	272	31	27
SUMME	47.500	2.375	2.069	950	824	95	83

Nutzfahrzeuge

Entsprechend der obigen Ausführungen wurden für Nutzfahrzeuge die Berechnungen für k-Werte von 2,2 und 3 durchgeführt. Anhand der Zeitreihe zur Inverkehrbringung ergaben sich die in Tabelle 81 dargestellten Mengen.

Tabelle 81: ReStra-Ziелеmetalle aus Katalysatoren [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (Nutzfahrzeuge)

k-Wert	Anzahl Fahrzeuge in 2020	Pt	Pd	Rh	Ce-Ox	Ce	La-Ox	La
2,2	272.878	2.947	-	737	27.288	23.298	1.637	1.396
3	289.811	3.130	-	782	28.981	24.744	1.739	1.483

Tabelle 82: ReStra-Ziелеmetalle aus sonstigen Anwendungen [kg] - Mengen in 2020 aus Altfahrzeugen (Nutzfahrzeuge)

k-Wert	Anzahl Fahrzeuge in 2020	SE	Dy-Ox	Dy	Gd-Ox	Gd	Tb-Ox	Tb
2,2	272.878	9.660	483	421	193	168	19	17
3	289.811	10.259	513	447	205	178	21	18

Aus der Korrektur um die Exporte aus der Nutzungsphase ergaben sich die in Tabelle 83 dargestellten Mengen. Die korrespondierenden Metallmengen sind in Tabelle 84 dargestellt.

Tabelle 83: Korrigierte zu erwartende Fahrzeugmenge (Nutzfahrzeuge) in 2020

k-Wert	Anzahl Fahrzeuge in 2020	Intra-EU-Exporte	Extra-EU-Exporte	Gesamt-Exporte	Ergebnis
2,2	272.878	63.792	86.119	149.911	122.967
3	289.811	63.792	86.119	149.911	139.900

Tabelle 84: ReStra-Ziелеmetalle aus Katalysatoren [kg] - Mengen von ReStra-Zielmetallen in 2020 aus Nutzfahrzeugen

k-Wert	Pt	Pd	Rh	Ce-Ox	Ce	La-Ox	La
2,2	1.328	-	332	12.297	10.499	738	629
3	1.511	-	378	13.990	11.945	839	716

Tabelle 85: ReStra-Ziелеmetalle sonstigen Komponenten [kg] - Mengen von ReStra-Zielmetallen in 2020 aus Nutzfahrzeugen

k-Wert	SE	Dy-Ox	Dy	Gd-Ox	Gd	Tb-Ox	Tb
2,2	4.353	218	190	87	76	9	8
3	4.952	248	216	99	86	10	9

In einer Studie des Umweltbundesamtes wurden über eine Umfrage bei Demontageunternehmen für LKW und Busse die Altfahrzeugzahlen für diese Produktsegmente erhoben. Danach werden ca. 400 N2 und N3-Fahrzeuge und ca. 10 Busse pro Jahr in Deutschland von Altautoentsorgungsbetrieben behandelt (Kohlmeyer 2013a). Diese Angaben wurden als Szenario in die Betrachtung mit aufgenommen. Die folgende Tabelle stellt entsprechend die Metallmengen in 2020 dar. Dabei wurde davon ausgegangen, dass es in den kommenden Jahren keine wesentlichen Veränderungen der Mengen geben wird, da die zugrunde liegenden ökonomischen Treiber für den Export der Fahrzeuge weiterhin bestehen und angenommen wurde, dass es keine Trendumkehr durch einen veränderten Rechtsrahmen geben wird. Die im Alternativszenario zu erwartende Menge von ReStra-Zielmetallen wurde also für 410 Nutzfahrzeuge berechnet, wobei eine Anwendung der Weibullfunktion zu Berechnung nicht notwendig ist.

Die sich für das Alternativszenario mit den geringen Lkw-Altfahrzeugzahlen zur Entsorgung ergebenden Metallmengen (siehe Tabelle 86) fielen erwartungsgemäß ausgesprochen niedrig aus, insbesondere im Vergleich zu den im Basisszenario ermittelten Mengen.

Tabelle 86: ReStra-Zielmetalle aus Katalysatoren - Metallmengen in 2020 aus Nutzfahrzeugen (Szenario: geringe LKW-Altfahrzeugzahlen) (Angaben in kg)

Parameter	Pt	Pd	Rh	Ce-Ox	Ce	La-Ox	La
Menge in 2020	4,4	0	1,1	41	35	2,5	2,1

Tabelle 87: ReStra-Zielmetalle aus sonstigen Komponenten - Metallmengen in 2020 aus Nutzfahrzeugen (Szenario: geringe LKW-Altfahrzeugzahlen) (Angaben in kg)

Parameter	SE	Dy-Ox	Dy	Gd-Ox	Gd	Tb-Ox	Tb
Menge in 2020	14,5	0,73	0,62	0,29	0,25	0,03	0,03

5.3.6 Metallurgie/ Legierungen

Die Produktgruppenidentifizierung zeigte eine Mengenrelevanz des Anwendungsfeldes Metallurgie für Cer und Lanthan auf.

5.3.6.1 Produktidentifizierung

Lanthan und Cer werden in Mischmetall genutzt. Diese werden wiederum in Gießereien (Herstellung von Eisen und Stahl) eingesetzt, insbesondere bei der Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit. Zur Identifikation der zugehörigen Endprodukte erfolgte eine Befragung von 36 Institutionen (Hersteller/Lieferanten, Metallverbände, Gießereien). Eine Identifikation mengenrelevanter Endprodukte, die für eine Quantifizierung für die Zielsetzung des ReStra-Projektes geeignet war, war jedoch nicht möglich. Eine Übersicht der angefragten Institutionen findet sich in folgender Tabelle.

Tabelle 88: Bezüglich der Verwendung von Mischmetall befragte Institutionen

Akteure	Institution
Hersteller/Lieferanten	Treibacher Industrie AG GfM FESIL Gesellschaft für Metallurgie & Legierungshandel mbH TRADIUM GmbH Overlack AG Dr. Ihme GmbH H.C. Starck GmbH
Metallverbände	GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik WV Stahl im Stahl-Zentrum Bundesverband der deutschen Gießerei-Industrie Wirtschaftsvereinigung Metalle
Einsetzende Betriebe - Gießereien	ACTech GmbH

Akteure	Institution
Einsetzende Betriebe – Gießereien - Einsatz von Gusseisen mit Kugelgraphit – GJS:	Gontermann-Peipers GmbH Meuselwitz Guss Eisengießerei GmbH HegerGuss GmbH BARTZ-WERKE GmbH CLAAS GUSS GmbH HULVERSHORN Eisengießerei GmbH & Co. KG Halbergguss Saarbrücken
Einsetzende Betriebe – Gießereien mit Aluguss	FEINGUSS BLANK GmbH MAGMA Gießereitechnologie GmbH Martinrea Honsel Germany GmbH Mahle International GmbH ZOLLERN GmbH & Co. KG BMW Werk Landshut Keller Lufttechnik GmbH + Co. KG Formguß Dresden GmbH G. A. Röders GmbH & Co. KG
Einsetzende Betriebe – Gießereien mit Magnesiumguss	Metallguß Steinrücken GmbH & Co. KG
Einsetzende Betriebe – Gießereien mit Kupferguss	SCHMELZMETALL DEUTSCHLAND GmbH Giessereigesellschaft mbh Böhmfeld & Co.

5.3.6.2 Produktanalyse

Für Mischmetall erfolgte daher keine Analyse anhand der Parameter Produktmenge, Metallkonzentration und Verweildauer, sondern es erfolgte auf Grundlage der Produktionsmenge von Teilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit eine grobe Abschätzung der jährlich in Deutschland Verkehr gebrachten Mengen von Cer und Lanthan.

Im Jahr 2011 betrug die Produktionsmenge von Teilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit 1,523 Mio. t (Statistisches Bundesamt 2012). Es handelt sich hierbei um die Menge an „Guten Stücken“. Nach Knothe (2012) beträgt die tatsächliche Produktionsmenge ca. das Doppelte entsprechend ca. 3 Mio. t. Der Anteil an Cer-Mischmetall liegt lt. Knothe (2012) bei ca. 50 g pro Tonne Gusseisen. Andere Hersteller geben andere Anteile an. So beträgt laut Rückert (2012) das Verhältnis von Cer-Mischmetall zu Gusseisen 1:15.000. Dies entspricht einem Anteil von ca. 66 g Cer-Mischmetall pro Tonne Gusseisen.

Unter der Annahme, dass die gesamte Produktionsmenge an Gusseisen mit Kugelgraphit mit oben genannten Anteilen an Cer-Mischmetall produziert wird, ergibt sich nach Knothe (2012) eine durchschnittliche jährliche Einsatzmenge in Deutschland von 152 t Cer-Mischmetall in diesem Produktionssektor bzw. nach Rückert (2012) von 203 t.

Auch für die Herstellung von Gusseisen mit Vermiculargraphit wird Cer-Mischmetall eingesetzt. Deren Produktionsmengen gibt Knothe (2013) mit ca. 0,5 Mio. t/a („Gute Stücke“) an. Die Zugabe von Cer-Mischmetall liegt nach Knothe (2013) in vergleichbarer Größenordnung wie bei Gusseisen mit Kugelgraphit. Somit sind ca. 50 t Cer-Mischmetall im Jahr für die Produktion erforderlich.

Entsprechend der durchschnittlichen Zusammensetzung von Cer-Mischmetall nach Hirschberg (1999) mit ca. 53 % Cer und 23 % Lanthan beträgt somit der reine Cer-Anteil bei ca. 200 t Cer-

Mischmetall 106 Mg Cer und 46 t Lanthan. Weiter Bestandteile des Mischmetalls sind beispielsweise Neodym und Praseodym in geringeren Anteilen.

Die zukünftige Entwicklung der Einsatzmengen von Cer-Mischmetall wurde bei Vertretern der Gießereiindustrie sowie der Forschung angefragt. Die diesbezüglich gewonnenen Aussagen variierten deutlich. Rückert (2013) informiert, dass, wenn kein Alternativmaterial gefunden wird, der Verbrauch steigen wird. Knothe (2013) gibt hingegen an, dass die Produktionsmenge von Gusseisen mit Kugelgraphit bzw. Vermiculargraphit in vergleichbarer Größenordnung bis 2020 bleiben wird. Es bestehe jedoch die Möglichkeit, den Einsatz von Cer-Mischmetall von derzeit 50 g/t auf 30 g/t zu reduzieren. Dies entspräche einem Rückgang von ca. 200 t auf 120 Mg Cer-Mischmetall. Informationen aus der Forschung zu zukünftigen Cer-Mischmetall-Einsatzmengen konnten nicht gewonnen werden.

Allgemein findet ein Großteil von Gusseisen mit Kugelgraphit bzw. Vermiculargraphit, welche unter Einsatz vom Cer-Mischmetall hergestellt werden, Einsatz in der Fahrzeugindustrie. In der PKW-Industrie wird allgemein mit einem Rückgang der benannten Gusseisen gerechnet. Dies ist darin begründet, dass aufgrund von gewünschten Gewichtseinsparungen vermehrt zum Einsatz von Aluminium und Magnesium übergegangen wird. In der Nutzfahrzeugherstellung wird hingegen mit einem steigenden Einsatz von Gusseisen mit Kugelgraphit vor allem im Bereich des Fahrwerks (z. B. Federböcke, Lenker) im Antriebsstrang und für Fahrzeugaufbauten gerechnet. Auch Gusseisen mit Vermiculargraphit findet vermehrt in der Nutzfahrzeugindustrie Anwendung. Hier zum Beispiel für Motorblöcke (Knothe 2013).

Zusammenfassend wurde auf der Basis der genannten Faktoren die jährlich maximale über Gusseisen mit Kugelgraphit sowie Gusseisen mit Vermiculargraphit in Verkehr gebrachte Menge an Cer-Mischmetall auf rund 200 - 250 t pro Jahr beziffert, was rund 106 t - 133 t Cer und 46 t - 58 t Lanthan entspricht. Die weltweite Einsatzmenge von Cer und Lanthan wird in (Du und Graedel 2011b) auf 27,9 kt bzw. 21,9 kt beziffert, wovon bei Cer 28 - 31 %, also 7,8 - 8,6 kt, und bei Lanthan 22 %, also 4,8 kt, im Bereich der Metallurgie eingesetzt werden. Entsprechend würde sich der Anteil Deutschlands am Weltverbrauch für metallurgische Zwecke auf 1,2 - 1,7 % für Cer und 0,9 - 1,2 % für Lanthan belaufen, was als realistische Größenordnung angesehen werden kann. Die ermittelte Bedarfsmenge kann im Rahmen einer groben Abschätzung gleichzeitig als maximale zu erwartende Abfallmenge im Jahr 2020 angesehen werden.

5.3.7 Batterien

Die Produktgruppenidentifizierung hat für Batterien eine Mengenrelevanz für Cer, Samarium und Lanthan aufgezeigt.

5.3.7.1 Produktidentifizierung

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden außer den Starterbatterien auf Bleibasis alle anderen im Handel befindlichen Batterien einbezogen. Erfasst werden jeweils Primär-Batterien auf Basis ZnC, AlMn, Zn-Luft, Li-primär, AgO sowie Sekundär-Batterien auf Basis AlMn, Li-Ion, NiMH, Pb, NiCd. Hinsichtlich der Seltenen Erden haben aber nur die Nickel-Metallhydrid-Batterien eine entsprechende Relevanz. Ni-Metallhydrid-Batterien werden bspw. als Gerätebatterien und in Hybridautomobilen einiger Hersteller (Honda, Toyota) eingesetzt. Für andere Batterietypen besteht keine Mengenrelevanz der untersuchten Metalle.

Für die weitere Analyse ergeben sich also Ni-Metallhydrid-Batterien als zu untersuchendes Produkt.

5.3.7.2 Produktanalyse

Am 1. Dezember 2009 ist das Batteriegesetz (BattG, BattG 2009) nach den Vorgaben der europäischen Richtlinie 2006/66 EG (Batterierichtlinie) in Kraft getreten. Das Gesetz regelt die abfallrechtliche Produktverantwortung für Batterien und Akkumulatoren. In Deutschland existieren zurzeit neben dem System für Bleibatterien seit 1998 GRS Batterien (Gemeinsames Rücknahmesystem für Batterien), sowie weitere genehmigte herstellereigene Rücknahmesysteme von Bosch (angeschlossen an GRS), seit 1991 ReBAT früher als Vfw zur Reverse Logistics Group (RLG) und ab 2012 zur Reclay Holding Group CCR gehörend, seit 2002 European Recycling Platform (ERP) und seit 2008 Öcorecell von IFA-Ingenieurgesellschaft für Abfallwirtschaft und Umweltlogistik GmbH.

Die in Hybridautomobilen eingesetzten Batterien werden von den Herstellerfirmen zurückgenommen und in deren Verantwortung verwertet (z. B. Toyota von allen europäischen Ländern für NiMH-Batterien bei der Firma SNAM - Frankreich).

Das angenommene Abfallpotenzial wird aus der Prognose für die separat durch die Rücknahmesysteme erfassten Batterien bewertet. Die Entsorgung über den Hausmüll wurde nicht betrachtet, da eine separate Abtrennung von Batterien aus dem Hausmüll zwar theoretisch technisch mit hohem Aufwand möglich wäre, in der Realität jedoch nicht praktikabel ist.

In Verkehr gebrachte Mengen und Verweildauer

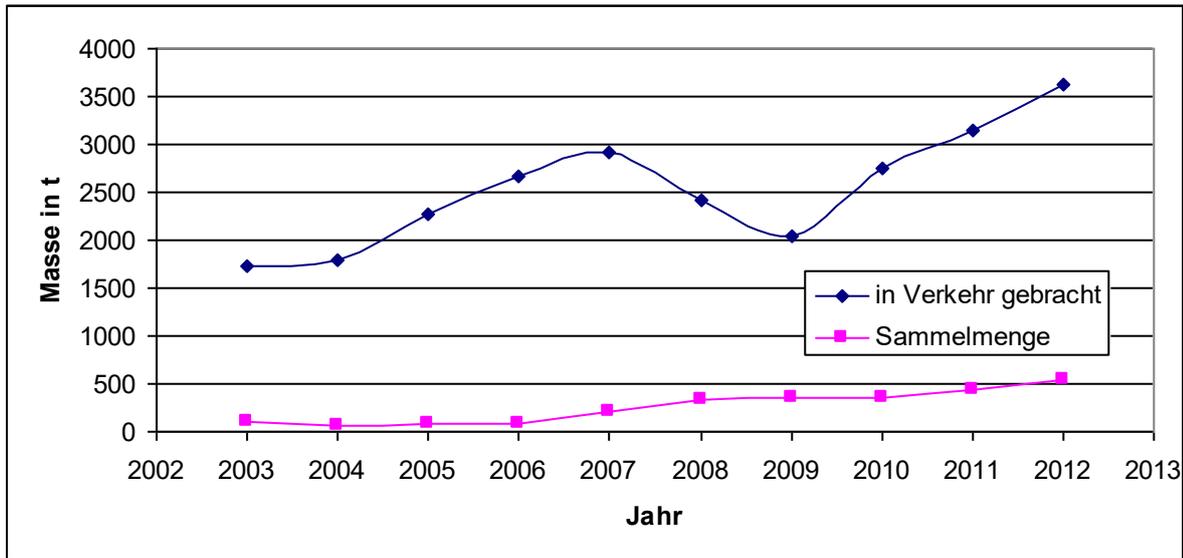
Mit der Veröffentlichung der gesetzlich vorgeschriebenen Erfolgskontrollen der Batterierücknahmesysteme ist in Deutschland für die NiMH-Batterien eine relativ genaue Analyse der aktuellen Situation möglich. Abbildung. 20 zeigt für die Jahre ab 2003 bis 2012 die Masse der in Verkehr gebrachten NiMH-Batterien und der zurückgenommenen Batterien für alle Rücknahmesysteme.

Bei den Rücknahmesystemen dominiert GRS. Zum Beispiel wurden 2009 für alle Systeme 2.041 t (GRS 1.828 t; ERP 2013; ReBAT 2013; IFA 2013) in Verkehr gebracht und 350 t (GRS 334 t) zurückgenommen und 2011 für alle Systeme 3.137 t (GRS 2.643 t) in Verkehr gebracht und 433 t (GRS 398 t) zurückgenommen. Die so genannte Sammelquote (Verhältnis von in Verkehr gebrachten und zurückgenommenen Batterien pro Jahr) ist bei NiMH-Batterien mit <20 % gegenüber der Sammelquote bezogen auf das Gesamt-Batterieaufkommen von >40 % noch sehr niedrig. Die Ursachen für diese Diskrepanz bestehen darin, dass die Nutzungsdauer der Batterien beim Verbraucher je nach Anwendung zwischen 2 und 7 Jahren beträgt. Durch den sogenannten Hoarding-Effekt ist allerdings bei Sekundärbatterien mit dem Rücklauf erst nach 4 - 10 Jahren zu rechnen (Weyhe et al. 2002; Heegn und Weyhe 2003). Für die Analyse wird hier mit einem mittleren Wert von 7 Jahren als Verweildauer gerechnet.

Für die Folgejahre bis 2020 kann aufgrund der in Abbildung. 24 dargestellten Entwicklung davon ausgegangen werden, dass sich die Menge in Verkehr gebrachter Batterien zwischen 2.500 und 4.000 t/a (2013 Masse von 3.616 t/a) bewegt. Es ist davon auszugehen, dass es zu keinen wesentlichen Steigerungen kommt, da für viele neue Anwendungen einschließlich Elektromobilen Li-Ionen-Akkumulatoren eingesetzt werden. Die zu erwartende gesammelte Masse an NiMH-Batterien wird sich allerdings gegenüber dem aktuellen Stand erhöhen, so dass mit Massen in der Größenordnung von 1.000 t/a gerechnet werden kann.

Die angeführte Prognose beruht auf der Annahme, dass zunehmend NiMH-Batterien und NiCd-Batterien durch Li-Ionen-Batterien ersetzt werden. Das am 1. Dezember 2009 in Kraft getretene Batteriegesetz (BattG) verbietet das Inverkehrbringen cadmiumhaltiger Batterien mit Ausnahme von solchen für Not- oder Alarmsysteme, Notbeleuchtung, medizinische Ausrüstung und schnurlose Elektrowerkzeuge.

Abbildung. 24: Masse der in Verkehr gebrachten NiMH-Batterien und der zurückgenommenen Batterien für die Jahre 2003 bis 2012



Quelle: GRS 2014

Metallkonzentrationen im Produkt

Die Massenanteile der Komponenten liegen für NiMH-Batterien bei 60 - 65 % SE-Ni-Co-Elektrodenkomponenten, 10 - 15 % Harz, Kunststoff, Papier, 15 - 25 % Stahl-Gehäuse und Elektrodenfolie, 10 - 15 % Elektrolyt. An Wertstoffen ist bei NiMH-Batterien neben 22 - 25 % Fe mit 36 - 42 % Nickel, 3 - 4 % Kobalt und 8 - 10 % Seltenen Erden zu rechnen (Rombach 2008).

Die Anteile der einzelnen seltenen Erden unterscheiden sich von Anwendung zu Anwendung und lassen sich daher nicht genau beziffern. Die vorkommenden Metalllegierungen sind vom Typ AB_5 mit z. B. A = Lanthan und B = Nickel, wobei Lanthan oftmals durch ein so genanntes Mischmetall aus 50-55 % Cer, 18-28 % Lanthan, 12-8 % Neodym, 4-6 % Praseodym oder 50 % Lanthan, 30 % Cer und 14 % Neodym sowie geringen Mengen weiterer Metalle ersetzt ist. In der Produktanalyse wird der Anteil Seltener Erden als Ganzes analysiert, der sich aber wiederum aus den genannten Seltenen Erden zusammensetzt.

Exporte aus der Nutzungsphase

Über den Export von NiMH-Batterien als Teil von anderen Produkten (z. B. Elektrogeräte) aus der Nutzungsphase sind Daten verfügbar. Eine statistische Erhebung der Exporte gebrauchter Elektro- und Elektronikgeräte in Abgrenzung von Neugeräten wird nicht durchgeführt. Zum Export von gebrauchten Hybridfahrzeugen liegen keine Informationen vor. Im Jahr 2014 wurden ca. 16.000 PKW, 22 Omnibusse und 144 LKW mit Hybridantrieb außer Betrieb gesetzt (KBA 2015e). In anerkannten Demontagebetrieben wurden im Untersuchungszeitraum kaum Hybridfahrzeuge entsorgt (eine statistische Ausweisung solcher Fahrzeuge bei diesen Demontagebetrieben erfolgt nicht).

Ergebnisse

Für die Berechnung der potenziell als Abfall anfallenden Mengen wurde wie oben beschrieben im Referenzszenario eine mittlere Lebensdauer von 7 Jahren angenommen. Für die Jahre ab 2012 wurde mit einer in Verkehr gebrachten Menge von 2.500 - 3.500 t NiMH-Batterien pro Jahr gerechnet. In Nomura (2005) und NIES (2010) finden sich abweichende durchschnittliche Lebensdauern von Batterien von 11,2 und 10,9 Jahren, wobei hier nicht klar hervorgeht, auf welche(n) Batterietyp(en) sich diese beziehen. Für den Formparameter finden sich in der Literatur Werte von 1,62 (Nomura 2005) und 2,2 (NIES 2010), wobei letzterer Wert aufgrund der größeren Aktualität dem Referenzszenario zugezählt wurde. Die Berechnung wurde für beide Werte durchgeführt. Zusätzlich wurde die Berechnung für eine durchschnittliche Verweildauer von 11 Jahren durchgeführt, um den möglichen Einfluss dieser Größe auf das Ergebnis sichtbar zu machen.

Die angegebenen Ergebnisspannen ergaben sich aus der Spanne des SE-Gehalts (8 - 10 %) sowie der Spanne für die Inverkehrbringung in den Jahren 2012 bis 2020. Im Mittel ergab sich eine in 2020 zu erwartende Menge von Seltenen Erden im Referenzszenario von 247 t. Insgesamt ergab sich für eine durchschnittliche Verweildauer von 7 Jahren eine Spanne von 187 - 303 t SE. Bei Annahme einer durchschnittlich elfjährigen Verweildauer reduzierten sich die Werte etwas. Die Spanne der zu erwartenden Metallmenge betrug hier 157 - 234 t. Die Ergebnisse sind in der Übersicht in Tabelle 89 dargestellt.

Tabelle 89: Metallmengen in 2020 aus NiMH-Batterien (Angaben in t)

Verweildauer	k=1 , 62	k=2 , 2
7 Jahre	187 - 299, ø 243	191 - 303, ø 247
11 Jahre	157 - 235, ø 196	162 - 234, ø 198

5.3.8 Anwendungen der optischen Industrie

Die Produktgruppenidentifizierung hat für Glasadditive bzw. optisches Glas und Polierschlämme eine Mengenrelevanz für Cer und Erbium aufgezeigt.

5.3.8.1 Produktidentifizierung

Ein wesentliches Einsatzgebiet von Cer ist als Poliermittel in der optischen Industrie. Dieses Anwendungsgebiet wird als Endprodukt analysiert. Erbium wird als Additiv in verschiedenen Arten von optischen Gläsern sowie sogenannten Spezialgläsern eingesetzt. Im Projektkontext wurden Objektive und Fernrohre als mögliche Endprodukte geprüft.

Für die weitere Analyse ergaben sich also Poliermittel sowie optische Gläser und Spezialgläser als zu analysierende Produkte.

5.3.8.2 Produktanalyse

Im Hinblick auf die Produktgruppe *Anwendungen der optischen Industrie* ist neben den Eingang bereits genannten Metallen Cer und Erbium auch die die Betrachtung von Lanthan-Anteilen von Interesse. Die strategischen Metalle finden sich teilweise als gering dotierte Bestandteile in optischen Gläsern wieder. Die Hauptmenge strategischer Metalle (Cer und Lanthan) wird allerdings in den Poliermitteln als reines CeO₂ eingesetzt (Hartmann, SCHOTT AG, 2013).

Daneben finden Cer und Erbium, als Glasadditiv, auch in der Farbgebung bzw. Entfärbung optischer Spezialgläser Anwendung. Grundsätzlich verschlechtern sie allerdings eher die Funktion

optischer Gläser (Hartmann, SCHOTT AG, 2013). Beide Elemente sind in optischen Gläsern daher kaum vorhanden sondern werden nur für spezielle Anforderungen im Hinblick auf ganz bestimmte Anwendungen genutzt (Spezialgläser). Dabei handelt es sich um Strahlenschutz- und Lasergläser (Hartmann, SCHOTT AG, 2013). Strahlenschutzgläser enthalten bis zu 2 % Ceroxid, Lasergläser ca. 0,5 % Erbiumoxid.

Linsen, die in optischen Komponenten/Systemen - z. B. Objektive, Fernrohre und Mikroskope - genutzt werden, enthalten nur in Ausnahmefällen die betrachteten strategischen Metalle, wie z. B. besondere astronomische Teleskope. Auch die Betrachtung der Werkstoffe für die ursprünglich zur Analyse vorgesehenen optischen Systeme, wie Fernrohre und Mikroskope, ergab keinen Hinweis auf Cer, Erbium oder Lanthan (Haferkorn, 2003). Diese Produkte wurden daher im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet.

Stattdessen wurden, neben den Polierschlämmen, die oben genannten Spezialgläser (Strahlenschutz- und Lasergläser) genauer betrachtet. Aufgrund der schwierigen Datenlage wurde keine gesonderte Unterteilung in Strahlenschutz- und Lasergläser vorgenommen.

Poliermittel

In Verkehr gebrachte Mengen

Statistische Daten zu den in Verkehr gebrachten Mengen der entsprechenden Poliermittel sind nicht verfügbar. Eine Ermittlung aus Informationen der Endanwender ist nach Aussage der Anwender kaum realistisch. Daher wurde die Betrachtung auf den Abfallstrom aus der Anwendung von Poliermitteln in der Herstellung von Glas und Glaserzeugnissen fokussiert. Die relevanten Abfallschlüsselnummern (ASN) sind hier 10 11 13* Glaspolier- und Glasschleifschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten sowie 10 11 14 Glaspolier- und Glasschleifschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 11 13 fallen. Die Abfallstatistik führt 0,9 t der ASN 10 11 13* und 3 t der ASN 10 11 14 aus inländischen Quellen auf (Destatis 2013). Verbände weisen dagegen deutlich höher Mengen aus (siehe folgende Abschnitte). Eine mögliche Erklärung für die Differenz kann darin liegen, dass die Abfallerzeuger auch andere Abfallschlüsselnummern verwenden. Schlussfolgernd wurden aufgrund der wahrscheinlich höheren Datensicherheit die Informationen der Fachverbände genutzt.

Die Polierschlammengen liegen jährlich im 2 bis 3-stelligen Tonnenbereich wie eine Umfrage (nicht repräsentativ) des Fachverbands für Photonik und Präzisionstechnik aus dem Jahre 2010 (Ladwig 2013a) ergibt. In der Umfrage wird unterschieden zwischen „stichfesten“ und „flüssigen“ Polierschlämmen.

Tabelle 90: Polierschlammengen der Optischen Industrie in Deutschland in den Jahren 2008, 2009

Herkunft	2008	2009
Stichfeste Schlämme	97,95 t	54,85 t
Flüssige Schlämme	141 t	208,922 t

Quelle: Ladwig (2013a)

In den weiteren Jahren des Untersuchungszeitraums kann von ähnlichen Mengen mit einer leicht steigenden Tendenz ausgegangen werden (Ladwig 2013a). Die Mengen schwanken jedes Jahr je nach Produktionstätigkeit einiger Marktführer (z. B. Zeiss). Ausgehend von einer angenommenen

Wachstumsrate von 5 % jährlich (Basis 2009) ergaben sich somit die in der Tabelle 91 dargestellten Mengen für die Jahre 2018 - 2020:

Tabelle 91: Prognostizierte Polierschlammengen (fest und flüssig) für die Jahre 2018 - 2020

Herkunft	2018	2019	2020
Stichfeste Schlämme	85 t	89 t	94 t
Flüssige Schlämme	324 t	340 t	357 t

Quelle: basierend auf Ladwig (2013a)

Der TS-Gehalt wurde in der Umfrage nicht dokumentiert.

Metallkonzentrationen im Produkt

Hinsichtlich der Zusammensetzung der Polierschlämme wurden auf Basis einer Umfrage³⁵ durch Spectaris (Ladwig 2013a) aus dem Jahre 2010 (nicht repräsentativ) die in der Tabelle 92 dargestellten Gehalte zugrunde gelegt.

Tabelle 92: Gehalt von Cer und Lanthan in Polierschlämmen (Bezug: TS, Angaben als Oxide)

Herkunft	Ceroxid	Lanthanoxid
Stichfeste Schlämme	0,05%	X
Flüssige Schlämme	24 - 35%	0,4 - 1,8%

Quelle: Ladwig (2013a)

Der TS-Gehalt wurde durch die Umfrageteilnehmer berücksichtigt, aber nicht dokumentiert.

Exporte aus der Nutzungsphase

Polierschlämme werden bei Herstellungsprozessen im Bereich der Optik verbraucht. Sie sind Hilfsstoffe in der Produktion. Exporte aus der Nutzungsphase liegen daher nicht vor.

Verweildauer

Polierschlämme sind Hilfsstoffe bei der Produktion im Bereich der optischen Industrie und gehen unmittelbar nach Gebrauch in Abfallströme über. Die Verweildauern liegen entsprechend unter einem Jahr.

Potenziell als Abfall anfallende Menge

Da die hier untersuchten Poliermittel als Hilfs- und Betriebsmittel in der Produktion anderer (optischer) Produkte verwendet werden und eine entsprechend kurze Verweildauer aufweisen, war

³⁵An der Erhebung beteiligte Unternehmen: Carl Zeiss AG, Fraunhofer IPT, Fraunhofer IOF, JENOPTIK Optical Systems, Jos. Schneider, LEICA Microsystems, Qioptiq, Docter Optics.

eine Untersuchung der Abfallmengen mit der Weibullverteilung nicht zielführend. Unter Berücksichtigung der Konzentrationen von Lanthan- und Ceroxid in Polierschlämmen ergeben sich die Mengen an Lanthan und Cer. Aus stichfesten und flüssigen Polierschlämmen ist eine mittlere Menge von etwa 90 t Cer und 3,35 t Lanthan zu erwarten.

Tabelle 93: Menge an Cer und Lanthan aus Polierschlämmen in 2020 (Angaben in t)

Herkunft	Ceroxid	Cer	Lanthanoxid	Lanthan
Menge aus stichfesten Schlämmen	0,047	0,04	-	-
Menge aus flüssigen Schlämmen	86 - 125	70 - 101,8	1,429 - 6,432	1,22 - 5,48
Gesamt	86 - 125	70,04 - 101,8	1,429 - 6,432	1,22 - 5,48

Spezialgläser

Die Herstellung von Spezialgläsern wie Strahlenschutzgläser und Lasergläsern erfolgt in wenigen Konzernen. Die SCHOTT AG ist dabei der größte Hersteller dieser Spezialgläser. Ein weiterer bedeutender Hersteller ist Corning in Frankreich (Hartmann 2013).

In Verkehr gebrachte Mengen

Spezifische Zahlen zu der Absatzmenge der genannten Spezialgläser liegen nicht vor. Eine Herstellereinschätzung (Hartmann 2013) über den Bestand im Bereich der Strahlenschutzgläser, die sich hauptsächlich auf das wichtigste Einsatzgebiet Kernkraftwerke bezieht, basiert auf der Anzahl der Kernkraftwerke in Deutschland und der Annahme von je 5 Strahlenschutzfenstern. Angesichts des geplanten Atomausstieges (AtG, 2012) wurde dies als relevante Basis für Recyclingpotenzial-Abschätzungen betrachtet.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung waren in Deutschland noch 9 Kernkraftwerke in Betrieb, weitere 8 Kernkraftwerke befanden sich im Nichtleistungsbetrieb (DATF, 2012). Ausgehend von insgesamt 17 Kernkraftwerken ergaben sich die in Tabelle 94 dargestellten Mengen im Bestand.

Tabelle 94: Strahlenschutzgläser: Schätzung des Bestands an gebundenem Cer

Kraftwerke (Stk.)	Strahlenschutzgläser (Stk.) / Glas (t)	Insg. gebundenes Cer (kg)
17	85	850

Quelle: basierend auf DATF 2012; Hartmann 2013

Im Bereich der Lasergläser wurde auf der Grundlage von Experteneinschätzungen von in Produkt-Abfällen enthaltene Menge an Erbium von weniger als 10 kg im Jahr ausgegangen (Hartmann 2013).

Metallkonzentrationen im Produkt

Erbium findet sich in einem Laserglas der SCHOTT AG, mit einem Anteil von 0,5 % Er_2O_3 . Cer wird in einigen Strahlenschutzglasarten der SCHOTT AG mit Konzentrationen zwischen 1 - 2 % Ce_2O_3 .

Tabelle 95: Mögliche Konzentrationen von Erbium-Oxid und Cer-Oxid in Spezialgläsern

Produkt	Erbiumoxid	Ceroxid
Strahlenschutzgläser		1 - 2%
Lasergläser	0,5 %	

Quelle: basierend auf SCHOTT AG, 2013

In sonstigen Gläsern, die im Rahmen der Produktidentifizierung als mögliche zu untersuchende Produkte diskutiert wurden, werden laut Herstellerangaben (SCHOTT AG, 2013) keine der hier relevanten Metalle verwendet. Einzige Ausnahme sind hier spezielle Okulare, die im Bereich der Astronomie eingesetzt werden, jedoch als sehr seltene und exotische Anwendung ohne weitere Relevanz zu bewerten sind.

Exporte aus der Nutzungsphase

Literaturauswertung und Expertenbefragung ergaben sich keinerlei Hinweise auf eine Relevanz von Exporten aus der Nutzungsphase.

Verweildauer

Die mögliche Lebensdauer von optischen Gläsern ist sehr hoch (bis zu mehrere hundert Jahre). Im Bereich der Industrieanwendungen (z. B. Laser) sind optische Systeme meist 30 Jahre und länger in Gebrauch und bleiben auch nach Betrieb noch lange funktionstüchtig (Hartmann 2013). Spezielle produktbezogene Rücknahmesysteme bestehen nicht.

Potenziell als Abfall anfallende Menge

Bzgl. der Spezialgläser/Strahlenschutzgläser erfolgte eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Abfallmengen anhand der Bestandschätzung. Geht man also von insgesamt 17 Kernkraftwerken aus, ergeben sich auf Basis der Lebensdauer von Strahlenschutzgläsern etwa 28 kg Cer pro Jahr aus Strahlenschutzgläsern. Vor dem Hintergrund des Atomausstieges wäre bis zum Jahre 2022 mit einem Gesamtpotenzial von 850 kg gebundenem Cer zu rechnen. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Rückbauzeit von 10 Jahren und einer 5-jährigen Genehmigungsphase der Stilllegung wären diese Mengen allerdings erst bis etwa 2037 verfügbar. Die Betrachtung bisher laufender Rückbauvorhaben wie des Kernkraftwerks Greifswald/Lubmin oder des Kernkraftwerks Rheinsberg deuten aber auf deutlich längere Rückbauzeiten hin.

Im Bereich der Lasergläser ist aufgrund der Datenlage ebenfalls keine Analyse der Menge in 2020 über die üblichen ReStra-Parameter möglich. Hier wurde stattdessen die Experteneinschätzung der Schott AG herangezogen, nach der die jährliche Abfallmenge auf <10 kg Cer beziffert wurde.

5.3.9 Laseranwendungen

Die Produktgruppe Laseranwendungen wurde aufgrund ihrer Relevanz für Erbium identifiziert.

5.3.9.1 Produktidentifizierung

Für die weitere Analyse wurden zwei wesentliche Laser-Typen identifiziert: Erbium- und Neodym-dotierte Yttrium-Aluminium-Granat Laser. Er:YAG Laser (-Kristalle) kommen fast ausschließlich im medizinischen Bereich (Dermatologie insb. Haar- und Tatoentfernung sowie Dentologie) zur Anwendung, während Nd:YAG Laser (-Kristalle) im Bereich der industriellen Materialbearbeitung zum Einsatz kommen.

5.3.9.2 Produktanalyse

ReStra-Zielmetalle werden in den Laserkristallen genutzt. Dabei wird das aktive Medium des Lasers (Kristall/Laserstab) mit den jeweiligen Metallen dotiert. Yttrium, Neodym und Erbium zählen zu den wichtigsten Lasermaterialien (Angerer et al. 2009). Dabei wird zwischen zwei übergeordneten Anwendungsgebieten unterschieden, die durch jeweils eines der strategischen Metalle dominiert werden: Laser im Bereich der industriellen Fertigung und Laser im Bereich der Medizintechnik.

Nd:YAG Laser in der industriellen Fertigung

Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG) ist das dominierende Material bei Festkörper-Lasern (Angerer et al. 2009). Die spezifischen Anwendungsgebiete sind hier sehr weitreichend: Sie werden vermehrt zur Kennzeichnung und Gravur sowie zur Materialbearbeitung in der industriellen Fertigung eingesetzt, insbesondere in der Karosserie- und Kraftfahrzeugherstellung und zunehmend auch im Schiffsbau (Angerer et al. 2009). Der Laser Components GmbH (2012) zufolge sind Nd:YAG Laserkristalle in allen Typen von Festkörper-Lasern zu finden.

In Verkehr gebrachte Mengen

In Deutschland werden Laserkristalle von zwei Unternehmen gezüchtet (Ackermann, 2013). Spezifische Daten zu den in Verkehr gebrachten Mengen sind nicht verfügbar.

Metallkonzentrationen im Produkt

Je nach Abmessungen der Laserstäbe variiert auch die Metallkonzentration, dabei gibt es hinsichtlich der Abmessungen erhebliche Variationen (Angerer et al. 2009). Laut Angerer et al. (2009) ersetzt Neodym (bei Nd:YAG) „*typischerweise 0,8 bis 1,1 Atom-%*“ des Yttriums im Kristallgitter. Es kann davon ausgegangen werden, dass 1 % des Yttriums durch Neodym ersetzt wird (Ackermann 2013). Das heißt, dass sich aus der ursprünglichen chemischen Zusammensetzung eines YAG-Kristalls ($Y_3Al_5O_{12}$) ein entsprechendes neues Verhältnis ergibt: $Y_{2,97}Nd_{0,03}Al_5O_{12}$.

Bei einer gewöhnlichen Produktionsgröße eines Laser-Kristalls von 6 kg und 150 daraus gewonnenen Laserstäben ergeben sich, unter Berücksichtigung der (aktuellen) chemischen Zusammensetzung, folgende Metallkonzentrationen (gerundet):

Tabelle 96: In Nd:YAG-Laserkristallen und -stäben enthaltenes Neodym und Yttrium

Parameter	Y	Nd	Al	O	Gesamt
Anteil (%)	2,97	0,03	5	12	
Relative Atommasse (g/mol)	264	4	135	192	595,3
Molekül-Anzahl (mol)					10,079
(anteiliges) Gewicht am Kristall (g)	2.661	44			6.000
(anteiliges) Gewicht am Laserstab (g)	18	0,3			40

Quelle: basierend auf Angerer et al. 2009; Ackermann 2013

Exporte aus der Nutzungsphase

Hinsichtlich der Exporte aus der Nutzungsphase waren keine Quantifizierungen verfügbar. Der Handel mit gebrauchten Laserkristallen ist aufgrund der nahezu unbegrenzten Lebensdauer jedoch üblich (siehe auch „Anmerkungen zur Recyclingsituation“) (Ackermann 2013). Konkrete Angaben hinsichtlich der daraus resultierenden Exporte aus der Nutzungsphase konnten nicht ermittelt werden.

Verweildauer

Die Verweildauer von Laserstäben ist im Grunde nahezu unbegrenzt. Laser selber haben eine sehr lange Betriebsdauer (einige Laser sind beispielsweise schon seit 40 Jahren in Betrieb), während die Laserstäbe nach Beendigung der Nutzungsdauer wieder in Neugeräte eingesetzt werden können (Ackermann 2013).

Potenziell als Abfall anfallende Menge

Aufgrund der fehlenden Daten zur in Verkehr gebrachten Menge ist eine Quantifizierung der in 2020 zu erwartenden Materialmenge nicht möglich. Zum einen ist aber aufgrund der Lebensdauer (und vermutlich auch Verweildauer) nur von einem geringen Rücklauf an alten Stäben auszugehen. Zum anderen ist der Metallgehalt pro Laserstab so gering, dass von einem nur geringen Recyclingpotenzial auszugehen ist.

Er:YAG Laser in der Medizintechnik

In Verkehr gebrachte Mengen

Für eine grobe Abschätzung der in Verkehr gebrachten Mengen konnten ungefähre Angaben zum jährlichen Produktionsvolumen und zur Exportquote von Er:YAG Laser-Kristallen ermittelt werden. Für eine genaue Berechnung der in Verkehr gebrachten Mengen fehlten auch Angaben zu den Exporten von Endprodukten sowie Importen von Laser-Kristallen und Endprodukten.

Metallkonzentrationen im Produkt

Im Gegensatz zu den Nd:YAG Lasern ist die Konzentration des untersuchten strategischen Metalls in den Er:YAG Lasern deutlich höher. 50 % des Yttriums werden nach Experteneinschätzung durch Erbium ersetzt (Ackermann 2013). Daraus ergibt sich folgende chemische Zusammensetzung: $Y_{1,5}Er_{1,5}Al_5O_{12}$.

Ein 6 kg-Kristall (gewöhnliche Herstellungsgröße) enthält dementsprechend 2,117 kg Erbium und 1,125 kg Yttrium. Aus einem solchen Kristall können normalerweise bis zu 150 Laserstäbe gewonnen (gebohrt) werden. Runtergebrochen auf diese Anzahl erhält man somit 14 g Erbium und 8 g Yttrium pro Laserstab.

Tabelle 97: In Er:YAG-Laserkristallen und -stäben enthaltenes Erbium und Yttrium (gerundet)

Parameter	Y	Er	Al	O	Gesamt
Anteil (%)	1,5	1,5	5	12	
Relative Atommasse (g/mol)	133	251	135	192	711,2
Molekül-Anzahl (mol)					8,437
(anteiliges) Gewicht am Kristall (g)	1.125	2.117			6.000
(anteiliges) Gewicht am Laserstab (g)	8	14			40

Quelle: basierend auf Wikipedia & Ackermann, FEE, 2013

Exporte aus der Nutzungsphase

Die Situation stellt sich hier wie bei Nd:YAG Lasern dar.

Verweildauer

Auch hier gilt dasselbe wie für den Nd:YAG Laser. Die Laser selber haben eine sehr lange Betriebsdauer von bis zu 40 Jahren, während die Laserstäbe nach Beendigung der Nutzungsdauer wieder in Neugeräte eingesetzt werden können.

Ergebnisse / potenziell als Abfall anfallende Menge

Wie beschrieben sind die Daten zur Berechnung der in 2020 zu erwartenden Mengen strategischer Metalle unvollständig. Es liegen zwar Informationen zur in Deutschland hergestellten Menge vor, jedoch müsste diese um Exporte (Exportquote bei rund 70 %) und Importe korrigiert werden, worüber jedoch keine geeigneten Daten vorliegen. Für eine grobe Abschätzung wurde die derzeitige Produktionsmenge in Deutschland herangezogen. Diese beträgt etwa 1.000 Laserstäbe und gilt als über einen längeren Zeitraum als konstant, wobei durchaus jährlich Schwankungen von bis zu 20 % zu beobachten sind (Ackermann 2013). Ausgehend von dieser konstanten Produktionsmenge und der Verweildauer von 40 Jahren wurde das langfristige Abfallpotenzial in Deutschland produzierter Laserstäbe mit 14 kg Erbium und 8 kg Yttrium geschätzt.

5.3.10 Windenergie

Die Produktgruppe Windenergieanlagen zeigt eine Mengenrelevanz für Gadolinium und Dysprosium sowie mit Einschränkungen Terbium auf und wird daher für die Produktanalyse ausgewählt. Neodym ist ebenfalls in relevanten Mengen enthalten und wird daher mitbilanziert.

5.3.10.1 Produktidentifizierung

Windkraftanlagen nutzen die kinetische Energie von Luftströmungen zur Umwandlung in mechanische Energie und zur Erzeugung elektrischer Energie mittels Generator. Die Windenergie gehört wie die Solarenergie, die Wasserkraft und die Bioenergie zu den regenerativen Energien, die in Deutschland im Rahmen der Energiewende in zunehmendem Maße ausgebaut werden (Hau 2008).

Zu den wesentlichen Komponenten einer Windkraftanlage zählen der Rotor sowie das auf dem Turm angeordnete Maschinenhaus (Gondel). Grundsätzlich wird bei den Windkraftanlagen unterschieden zwischen getriebelosen Anlagen mit Permanentmagnet (direkter Antrieb, DA-PM), den

Anlagen mit Getriebe und Permanentmagnet (indirekter Antrieb, IA-PM) und den Anlagen mit Getriebe ohne Permanentmagnet (IA). Tabelle 98 stellt Anlagen- und Generatorkonzepte übersichtsartig dar.

Tabelle 98: Anlagen- und Generatorkonzepte von Windenergieanlagen

Konzept	Spezifikation
Anlagenkonzepte	Dänisches Konzept
	Konzept mit Asynchrongenerator und Schlupfregelung
	Konzepte mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator
	Konzepte mit Synchrongenerator (permanent- und fremderregt)
	Inselanlage
Generatortypen	Synchrongeneratoren
	Asynchrongeneratoren
	Drehzahlfixe Generatorsysteme
	Synchrongeneratoren mit direkter Netzkopplung
	Asynchrongeneratoren mit direkter Netzkopplung
	Asynchrongeneratoren mit variablem Schlupf
	Drehzahlgestufte Generatorsysteme (Doppelgenerator, polumschaltbarer Generator)
	Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzrichter
	Synchrongeneratoren mit Frequenzrichter
	Asynchrongeneratoren mit übersynchroner Stromrichter-Kaskade
	Doppelspeiste Asynchrongeneratoren
	Direkt vom Rotor angetriebene drehzahlvariable Generatorsysteme
	Synchrongeneratoren mit elektrischer Erregung
	Generatorsysteme mit Permanentmagnet-Generatoren (Bau erst ab Mitte der 1990iger)

Quelle: Hau 2008; BWE 2012

Die als relevant identifizierten strategischen Metalle bzw. Seltenen Erden finden sich im Bereich der Windenergieanlagen in Permanentmagneten. Diese kommen in direkt- und indirekt angetriebenen Anlagen mit Permanentmagnet-Generatoren zum Einsatz.

Für die weitere Analyse ergeben sich also getriebe-lose Anlagen mit Permanentmagneten sowie Anlagen mit Getriebe und Permanentmagnet als zu untersuchendes Produkt.

5.3.10.2 Produktanalyse

Bei Anlagen mit Getriebe sind innerhalb des Maschinenhauses der mechanische Triebstrang und der Generator angeordnet. Dagegen stehen getriebe-lose Anlagen, die entweder einen Frequenzrichter oder Neodym-Eisen-Permanentmagnet in den Generatoren verwenden. Vorteil dieser Technik ist ein kleineres Maschinenhaus sowie eine höhere Zuverlässigkeit und Effizienz aufgrund des höheren Wirkungsgrades (Hau 2008).

Im Hinblick auf den Einsatz der strategischen Metalle Neodym, Dysprosium und Terbium sind hauptsächlich Anlagen des Typs DA-PM von Interesse. Ferner gibt es einen Anlagentyp IA-PM, der ebenfalls Permanentmagneten im Generator enthält, wobei diese Permanentmagneten sehr viel kleiner sind. Weltweit sind 14 % der eingesetzten Anlagen ohne Getriebe (Schoßig 2011, Vikström

2011), für Deutschland liegt der Anteil für DA-PM bei 1 % der onshore und 16 % der offshore Anlagen (Klotzer 2012). Aktuell geht der Trend in Deutschland zur Ausführung von Anlagen mit einer Leistung von 2,5 bis 5 MW, welche vermehrt die getriebelose Technik mit Permanentmagneten verwenden (Kleine 2012).

Wie bereits ausgeführt, sind die strategischen Metalle Neodym, Dysprosium und Terbium hauptsächlich in den Anlagen vom Typ DA-PM zu finden. In der Recherche wurden neben aktueller Literatur sowie Statistiken und Herstelleranfragen insbesondere bei den beteiligten Partnern vorliegende Abschlussarbeiten ausgewertet. Diese Abschlussarbeiten sowie die jeweiligen verfügbaren Daten sind in Tabelle 99 dargestellt.

Tabelle 99: Auswertung der Abschlussarbeiten von Projektpartnern

Literatur	Produktbeschreibung (Windkraftanlagen mit Permanentmagnet)	Menge Dysprosium im Produkt	In Verkehr gebrachte Menge	Verbleib von Dysprosium in der Nutzungsphase	Export aus der Nutzungsphase
Kleine (2012)	X	X	X		
Klotzer (2012)	X	X	X	X	
Neumann (2012)	X	X			
Witt (2012)	X		X	X	

In Verkehr gebrachte Menge

Laut der Statistik des Bundesverbandes Wind-Energie stieg die Anzahl der in Deutschland neu installierten Windenergieanlagen in den Jahren von 2000 - 2002 zunächst an auf über 2.000 Anlagen pro Jahr, fiel dann aber wieder ab und liegt derzeit bei ca. 1.000 neugebauten Anlagen pro Jahr. Da der Markteintritt der für die Untersuchung relevanten Windkraftanlagen erst nach 2005 stattfand, wird auf eine Darstellung der Jahre vor 2000 verzichtet. Die Zeitreihe der letzten 10 Jahre findet sich in Tabelle 100, die Zeitreihe der installierten Leistung in Tabelle 101 (Bundesverband Wind-Energie 2012). Diese Entwicklung ist graphisch dargestellt in Abbildung. 25 und Abbildung. 26.

Tabelle 100: Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland

Zeitachse	Zubau	Kumuliert
2000	1495	9359
2001	2079	11438
2002	2328	13759
2003	1703	15387
2004	1201	16543
2005	1049	17574
2006	1208	18685
2007	883	19460
2008	866	20301
2009	952	21164
2010	754	21607
2011	895	22297
2012	998	23030

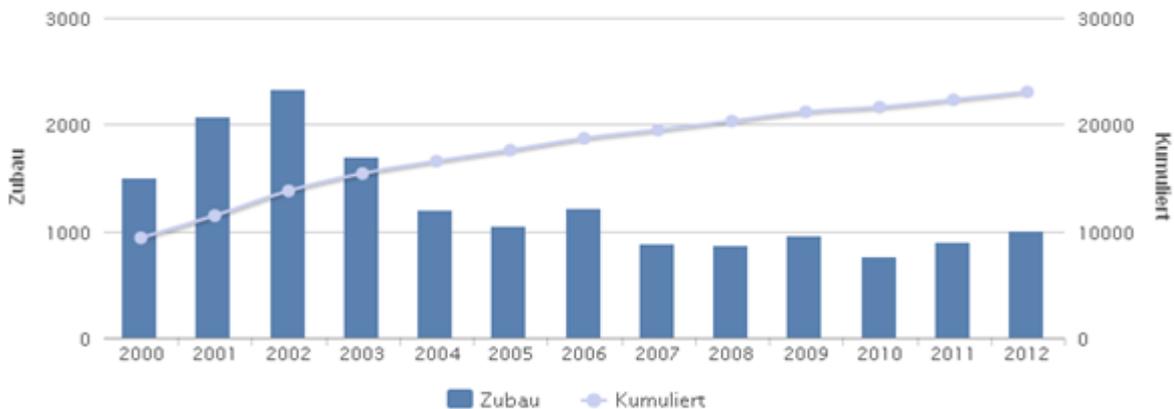
Quelle: WindEnergie

Tabelle 101: Installierte Windenergieleistung in Deutschland

Zeitachse	Zubau	Kumuliert
2000	1665	6095
2001	2659	8754
2002	3247	12001
2003	2645	14609
2004	2037	16629
2005	1808	18428
2006	2233,13	20621,86
2007	1667	22247
2008	1665	23903
2009	1917	25777
2010	1551	27190
2011	2085	29060
2012	2415,6	31307,6

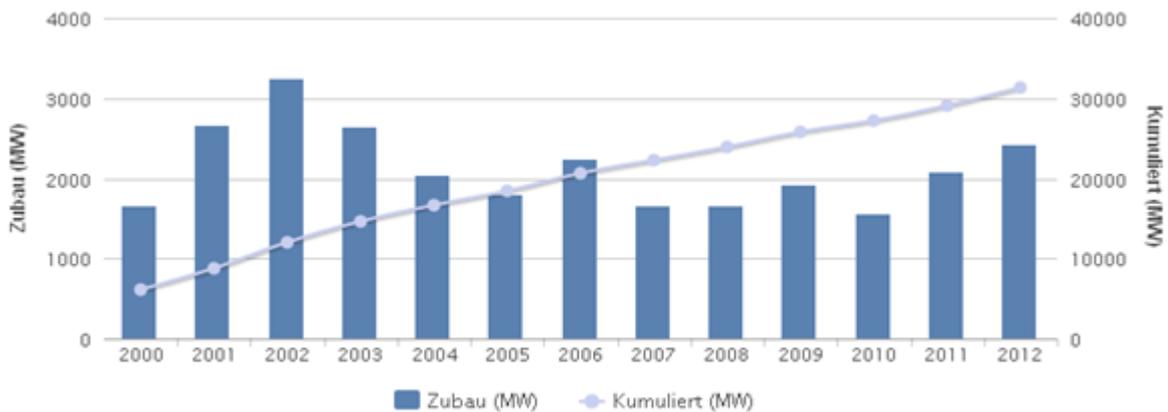
Quelle: BWE 2012

Abbildung. 25: Anzahl der Windanlagen in Deutschland



Quelle: BWE 2012

Abbildung. 26: Entwicklung der jährlichen und kumulierten installierten Leistung



Quelle: BWE 2012

Der Anteil der Anlagen von Typ DA-PM sowie von Typ IA-PM geht aus den Daten des Statistischen Bundesamtes und aus den Statistiken des Bundesverbandes der Windenergie nicht hervor. Eine Abschätzung hierzu, die auf einer Befragung von Herstellern beruht, konnte aber der Arbeit von Klotzer (2012) entnommen werden, deren Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst werden. Da die Marktführer im Windkraftsegment in Deutschland in der Vergangenheit auf konventionelle Antriebe setzten, betrug für Onshore-Anlagen der Marktanteil der Anlagen vom Typ DA-PM im Jahr 2010 lediglich 1 %. Bei Typ IA-PM wurde ein Marktanteil von ca. 4 % angenommen. Als Markteintritt wird für beide Antriebskonzepte das Jahr 2005 angegeben. Bei den Offshore-Anlagen waren lediglich 16 % aller Anlagen Typ DA-PM, 84 % hatten einen konventionellen Antrieb trotz der höheren Wartungskosten auf See. Als Markteintritt für die Anlagen mit Permanentmagneten wird hierbei das Jahr 2009 angegeben.

Die im Rahmen der Arbeit von (Klotzer 2012) durchgeführte Befragung von Herstellern umfasst auch deren Erwartungen zu den zukünftigen Marktanteilen der unterschiedlichen Antriebskonzepte. Daraus wurde die Prognose abgeleitet, dass bis zum Jahr 2020 onshore lediglich 11 % der Anlagen mit IA-PM ausgestattet sein werden und 3 % mit DA-PM. Offshore werden 35% der Anlagen einen IA-PM haben und 4 % einen DA-PM.

Schätzungen gehen davon aus, dass weltweit 1/6 (14 %) der neu installierten Windkraftanlagen Nd-Magnete enthalten (Schoßig 2011, Vikström 2011). Kleine (2012) gibt zudem an, dass in Deutschland der Trend bei den Anlagen von 2,5 - 5 MW zu Anlagen mit Permanentmagneten geht. Ebenso sieht Witt (2012) einen Trend zu DA, aufgrund ihrer robusteren Bauweise und ihrer geringeren Störanfälligkeit. Ob dieser Trend auch für Deutschland gilt, ist offen, da die dominanten Marktführer bislang keine oder kaum Permanentmagnete verwenden (Klotzner 2012), bzw. aufgrund der gestiegenen Rohstoffpreise wieder verstärkt auf konventionelle Antriebe setzen (Vestas).

Tabelle 102 und Tabelle 103 zeigen die Entwicklung der kumulierten Leistung onshore und offshore zwischen 2005 und 2020. Auf Basis der von Klotzer (2012) untersuchten Marktanteile wurde der Anteil der relevanten Antriebe auf die Gesamtleistung in MW berechnet.

Tabelle 102: Entwicklung der kumulierten Leistung von Onshore-Windanlagen von 2005– 2020³⁶

Jahr	Kumulierte Leistung onshore DA-PM	Kumulierte Leistung onshore IA-PM	Anteil IA-PM an zug. Leistung	Anteil DA-PM an zug. Leistung
	MW	MW	%	%
2005	12	3	0,67	0,17
2006	42	10	1,33	0,33
2007	75	19	2	0,50
2008	120	30	2,67	0,67
2009	183	46	3,33	0,83
2010	243	61	4	1,0

³⁶ Zahlen von 2013 - 2020 aus Klotzer 2012, Anhang A und C.

Jahr	Kumulierte Leistung onshore DA-PM	Kumulierte Leistung onshore IA-PM	Anteil IA-PM an zug. Leistung	Anteil DA-PM an zug. Leistung
2011	335	84	4,67	1,17
2012	441	110	5,33	1,33
2013	548	137	6	1,50
2014	666	167	6,67	1,67
2015	796	199	7,33	1,83
2016	938	235	8	2,0
2017	1.092	273	8,67	2,17
2018	1.258	314	9,33	2,33
2019	1.435	359	10	2,5
2020	1.625	406	10,67	2,67

Tabelle 103: Entwicklung der kumulierten Leistung von Offshore-Windanlagen von 2005-2020³⁷

Jahr	Kumulierte Leistung offshore DA-PM	Kumulierte Leistung offshore IA-PM	Anteil IA-PM an zug. Leistung	Anteil DA-PM an zug. Leistung
	MW	MW	%	%
2005				
2006				
2007				
2008				
2009	0	0	0,0	0,00
2010	7	0	16,0	0,00
2011	30	0	17,9	0,00
2012	48	0	19,8	0,00
2013	154	0	21,7	0,00
2014	504	8	23,6	0,57
2015	886	26	25,5	1,14
2016	993	32	27,4	1,71
2017	1.111	41	29,3	2,28
2018	1.547	81	31,2	2,85
2019	2.010	129	33,1	3,42
2020	2.499	185	35,0	3,99

Metallkonzentration im Produkt

Anlagen, die Permanentmagneten verwenden, werden eingeteilt in Low-Speed-, Medium-Speed- und High-Speed-Anlagen. Das Gewicht des Permanentmagneten wird mit 650 kg in einer Low-

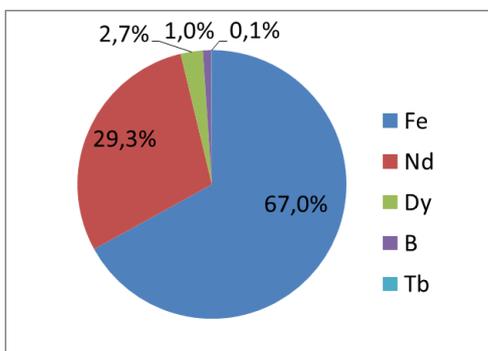
³⁷ Zahlen von 2012-2010 aus Klotzer 2012, Anhang A und C.

Speed-, 160 kg in einer Medium-Speed- und 80 kg in einer High-Speed-Anlage vom Typ DA-PM angegeben (Janssen 2012). Der Gehalt an Neodym wird mit 30 %, der Dysprosiumgehalt mit 5 % angegeben (JRC 2012).

Kleine (2012) kalkulierte anhand von Literaturangaben das durchschnittliche Gewicht eines Permanentmagneten in getriebelosen Windenergieanlagen mit ca. 680 kg PM/MW.

Permanentmagnete werden aus einem Neodym-Eisen-Gemisch hergestellt ($Nd_2Fe_{14}B$). Nach (Schüler 2011) besteht die $Nd_2Fe_{14}B$ -Legierung zu ca. 30 % aus einem Neodym-Praseodym-Gemisch und dem Additiv Dysprosium mit einem Anteil von 3 %. Bor macht ca. 1 % der Legierung aus. Terbium ist zum Teil in kleineren Menge (ca. 0,1 %) beigemischt, der Rest des Magnets besteht aus Eisen (Klotzer 2012). Demgegenüber gehen andere Autoren von niedrigeren Gehalten an Dysprosium aus. Gemäß (Kleine 2012) besteht die Zusammensetzung eines Permanentmagneten durchschnittlich aus: 67 % Fe, 29,25 % Nd, 2,67 % Dy, 1 % B und 0,08 % Tb, die Zusammensetzung ist in Abbildung. 27 dargestellt.

Abbildung. 27: Zusammensetzung eines Permanentmagneten bei getriebelosen Anlagen



Quelle: Kleine 2012

Ein durchschnittlicher Permanentmagnet einer langsam drehenden Anlage vom Typ DA-PM hat ein Gewicht von 679,75 kg PM/MW, was 18,15 kg Dy/MW, 198,83 kg Nd/MW und 0,54 kg Tb/MW entspricht. Die Anteile der Metalle am Magneten sind in Tabelle 104 dargestellt (Kleine 2012).

Tabelle 104: Prozentuale und mengenmäßige Anteile der Metalle an einem durchschnittlichen Permanentmagnet

Metall	Anteil am Permanentmagnet (%)	Gewicht (kg) in einem durchschnittlichen Permanentmagnet von 679,75 kg
Fe	67,0	455,43
Nd	29,3	198,83
Dy	2,7	18,15
B	1,0	6,80
Tb	0,1	0,54
	1	679,75

Quelle: Kleine 2012

Andere Autoren beziffern den durchschnittlichen Neodymgehalt in Permanentmagneten weltweit mit 105 - 159 kg Nd/MW (Vikström 2011) bis hin zu 200 kg Nd/MW für große Anlagen (Jacobsen 2011).

Bei den Anlagen vom Typ IA-PM ist der Permanentmagnet deutlich kleiner. Janssen 2012) gibt hierzu ein Gewicht von 80 (coupled with a 1- oder 2-stage gearbox) bis 160 kg/MW (coupled with a traditional 3-stage gearbox) an, also nur ca. 1/8 bis 1/4 des Gewichts eines Magneten in einer DA-PM Anlage. In Tabelle 105 wird exemplarisch die Zusammensetzung eines Permanentmagneten in einer Anlage vom Typ IA-PM von Vestas dargestellt. Dabei zeigt sich, dass im Vergleich zu den Permanentmagneten in Anlagen vom Typ IA-PM die Menge an Neodym nur 27,3 kg/MW beträgt im Gegensatz zu 198,83 (DA-PM). Das Verhältnis von Neodym in DA-PM zu IA-PM beträgt demnach - sofern die Gehalte für Anlagen vom Typ IA-PM verallgemeinert werden können - 7,3:1, für Dysprosium 7,9:1.

Tabelle 105: Zusammensetzung eines Permanentmagneten in einer IA-PM Anlage von Vestas

Metall	kg/MW
Neodym	27,33
Dysprosium	2,33
Terbium	0,074

Quelle: Klotzer 2012

Aufgrund der ermittelten Angaben zur kumulierten Leistung, der Marktanteile der Anlagen mit Permanentmagneten (vgl. Tabelle 104 und Tabelle 105) und der Menge an Dysprosium, Neodym und Terbium pro MW und Anlagentyp (vgl.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 106 und

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 107) lässt sich die Menge an Dysprosium, Neodym und Terbium im Bestand abschätzen wie folgt:

Tabelle 106: Abschätzung des im Bestand vorhandenen Lagers von Dysprosium, Neodym und Terbium in Onshore-Windkraftanlagen

Jahr	Kumulierte Leistung onshore DA-PM	Menge Neodym DA-PM	Menge Dysprosium DA-PM	Menge Terbium DA-PM	Kumulierte Leistung onshore IA-PM	Menge Neodym IA-PM	Menge Dysprosium IA-PM	Menge Terbium IA-PM
	MW	kg/MW	kg/MW	kg/MW	MW	kg/MW	kg/MW	kg/MW
		198,8	18,2	0,5		27,3	2,3	0,1
2005	12,1	2.408,5	219,9	6,5	3,1	84,0	7,2	0,2
2006	41,8	8.313,6	758,9	22,6	10,4	285,4	24,3	0,8
2007	75,2	14.942,6	1.364,0	40,6	18,8	513,2	43,8	1,4
2008	119,6	23.781,7	2.170,9	64,6	29,9	818,1	69,7	2,2
2009	182,9	36.374,9	3.320,4	98,8	45,7	1249,5	106,5	3,4
2010	243,2	48.352,4	4.413,8	131,3	60,8	1661,1	141,6	4,5
2011	334,6	66.523,8	6.072,6	180,7	83,7	2286,9	195,0	6,2
2012	441,2	87.719,1	8.007,4	238,2	110,3	3013,9	256,9	8,2
2013	547,7	108.894,5	9.940,3	295,7	136,9	3741,5	319,0	10,1
2014	666,1	132.434,5	12.089,2	359,7	166,5	4551,6	388,0	12,3
2015	796,2	158.303,8	14.450,6	429,9	199,0	5439,4	463,7	14,7
2016	938,2	186.537,6	17.027,9	506,6	234,5	6409,6	546,4	17,4
2017	1.092,1	217.136,1	19.821,1	589,7	273,0	7462,3	636,2	20,2
2018	1.257,7	250.063,8	22.826,8	679,1	314,4	8592,6	732,6	23,3
2019	1.435,2	285.356,1	26.048,5	775,0	358,8	9805,4	835,9	26,5
2020	1.624,6	323.013,1	29.485,9	877,3	406,2	11100,6	946,4	30,1

Tabelle 107: Abschätzung des im Bestand vorhandenen Lagers von Dysprosium, Neodym und Terbium in Offshore-Windanlagen

Jahr	Kumulierte Leistung offshore DA-PM	Menge Neodym DA-PM	Menge Dysprosium DA-PM	Menge Terbium DA-PM	Kumulierte Leistung offshore IA-PM	Menge Neodym IA-PM	Menge Dysprosium IA-PM	Menge Terbium IA-PM
	MW	kg/MW	kg/MW	kg/MW		kg/MW	kg/MW	kg/MW
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2010	7,2	1.431,6	130,7	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	30,1	5.987,2	546,5	16,3	0,0	0,0	0,0	0,0
2012	47,9	9.530,3	870,0	25,9	0,0	0,0	0,0	0,0
2013	153,8	30.585,6	2.792,0	83,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2014	504,1	100.220,7	9.148,5	272,2	8,5	231,2	19,7	0,6
2015	886,0	176.171,7	16.081,7	478,5	25,5	697,9	59,5	1,9
2016	993,5	197.527,7	18.031,1	536,5	32,2	881,1	75,1	2,4
2017	1.110,7	220.830,5	20.158,3	599,8	41,4	1130,3	96,4	3,1
2018	1.546,8	307.555,4	28.074,9	835,3	81,2	2219,3	189,2	6,0
2019	2.009,6	399.561,6	36.473,6	1.085,2	129,0	3525,9	300,6	9,5
2020	2.499,2	496.918,7	45.360,7	1.349,6	184,8	5051,5	430,7	13,7

Exporte aus der Nutzungsphase

Zu Exporten aus der Nutzungsphase liegen keine Erkenntnisse vor. Allerdings erschwert das starke Magnetfeld der Permanentmagnete einen Weitertransport und erfordert eine Entmagnetisierung der Magnete vor Ort (Schlossner 2013).

Verweildauer in der Nutzungsphase

Für Windkraftanlagen werden in der Literatur ca. 20 Jahre bis zum Rückbau bzw. zum Repowering angesetzt (Gasch 2010, Witt 2012). Allerdings fand der Markteintritt für relevante Anlagen erst 2005 bzw. 2009 statt, sodass dies Schätzungen für die Zukunft, aber keine empirisch abgesicherten Daten sind. Relevante Schrottmengen mit strategischen Mengen an Neodym, Dysprosium und Terbium dürften daher je nach Antriebskonzept voraussichtlich erst ab 2025 in Erscheinung treten.

Hierfür wurde von Klotzer (2012) eine Modellrechnung durchgeführt, die zum Ergebnis kommt, dass 2025 ca. 80 kg Dysprosium in den Recyclingkreislauf eintreten. Bis zum Jahr 2055 wird jedoch eine deutliche Steigerung der Menge auf nahezu 9 t erwartet. Es ist also mit einem langfristig deutlich erhöhten Potenzial zu rechnen. Um das langfristige Recyclingpotenzial von Dysprosium und Terbium aus WEA genauer abzuschätzen, sind weitere Analysen für die Jahre 2030, 2040 und 2050 erforderlich.

Ergebnisse

Untersuchungen bzgl. der tatsächlichen Lebensdauerverteilung von Windenergieanlagen inkl. einer Erhebung von Weibullparametern fanden sich zum Untersuchungszeitpunkt nicht. Prinzipiell handelt es sich bei Windenergieanlagen um Produkte, die - abgesehen vom Ersatz einzelner Komponenten - zu einem großen Teil erst vergleichsweise spät aus der Nutzung ausscheiden. Dies gilt

insbesondere für Generatoren mit Permanentmagneten, deren wesentlicher Vorteil neben dem reduzierten Gewicht in ihrer geringen Wartungsintensität liegt. Daher ist von einem relativ hohen Wert für den Formparameter auszugehen. Aufgrund der fehlenden Daten wurden Werte von 3,4 und 5 untersucht. Anhand dieser angenommenen Parameter und der oben dargestellten erhobenen Daten erfolgte die Berechnung der zu erwartenden Metallmengen im Jahr 2020. Hierzu wurde zunächst anhand der angenommenen Weibullparameter, der Verweildauer von 20 Jahren und der erhobenen Daten zum Bestand an installierter Leistung die in Verkehr gebrachte Metallmenge für DA-PM und IA-PM Anlagen ermittelt. Eine Unterscheidung von Onshore- und Offshore-Anlagen war hierbei nicht notwendig. Die in Verkehr gebrachte Metallmenge für ausgewählte Jahre ist in Tabelle 108 dargestellt.

Tabelle 108: In Verkehr gebrachte Mengen Seltener Erden in Windenergieanlagen (kg) (Nd, Dy, Tb)

Anal- genty		k=3	k=4	k=5
DA-PM	2010	13.370 / 1.224 / 34	13.330 / 1.220 / 34	13.322 / 1.220 / 34
	2015	102.466 / 9.381 / 258	102.050 / 9.343 / 257	101.897 / 9.329 / 256
	2020	139.352 / 12.758 / 350	137.215 / 12.562 / 345	136.255 / 12.474 / 343
IA-PM	2010	411 / 35 / 2	410 / 35 / 2	410 / 35 / 2
	2015	1.387 / 117 / 5	1.374 / 116 / 5	1.369 / 115 / 5
	2020	2.915 / 246 / 11	2.872 / 242 / 11	2.849 / 240 / 10

Anhand der Zeitreihe zur in Verkehr gebrachten Metallmenge wurden die in 2020 zu erwartenden Metallmengen für die verschiedenen Formparameter berechnet (siehe Tabelle 109). Es ergab sich insgesamt eine zu erwartende Menge an Neodym von 1.308 bis 4.470 kg, an Dysprosium von 119,4 bis 408,5 kg und an Terbium von 3,3 bis 11,4 kg.

Tabelle 109: Metallmengen aus Windenergieanlagen in 2020 (Angaben in kg)

Anlagentyp	Element	k=3	k=4	k=5
DA-PM	Neodym	4.367	2.230	1.270
	Dysprosium	399,8	204,2	116,2
	Terbium	11,0	5,6	3,2
IA-PM	Neodym	103,0	60,0	37,5
	Dysprosium	8,7	5,1	3,2
	Terbium	0,4	0,2	0,1
Gesamt	Neodym	4.470	2.290	1.308
	Dysprosium	408,5	209,31	119,4
	Terbium	11,4	5,8	3,3

5.3.11 Medizintechnische Geräte

Die Produktgruppenidentifizierung hat eine Mengenrelevanz von MRT-Geräten für Terbium und Dysprosium sowie von Gadolinium in Röntgengeräten aufgezeigt. Terbium ist zum Beispiel in Terfenol D in magnetisch-mechanischen Applikationen eingesetzt (London Commodity Markets 2012). Zudem gibt es Systeme mit Permanentmagneten, in denen eine erhebliche Menge Neodym eingesetzt wird. Gadolinium ist in Röntgengeräten im Szintillator enthalten (flat panel detector,

FPD) in Form von Gadoliniumoxysulfid und Cesium-Iodid (CsI). Die Schichtdicke eines mit Gadolinium Oxysulfide beschichteten "Screens" kann bei 300 µm liegen. Es kommen auch Dotierungen mit Terbium, Praseodym und Dysprosium vor.

5.3.11.1 Produktidentifizierung

Eine weitere Zerlegung in einzelne Produkte findet nicht statt, die zu analysierenden Produkte sind MRT- und Röntgengeräte. Eventuell kann es zu Überschneidungen mit der Produktgruppe Hochtemperatursupraleiter kommen, die in MRT-Geräten eingesetzt werden.

5.3.11.2 Produktanalyse

MRT-Geräte

Die Magnetresonanztomographie gehört zu den modernsten bildgebenden Verfahren in der diagnostischen Radiologie. Im Gegensatz zu den Röntgengeräten kommt die Magnetresonanztomographie ohne Strahlenbelastung aus. Magnetresonanztomographen (MRT-Geräte/ -Systeme) erzeugen ein „starkes, sehr homogenes“ Magnetfeld, um ein vielfaches stärker als das Erdmagnetfeld und elektromagnetische Wellen (Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, 2013). Dabei werden die im menschlichen Körper häufig vorkommenden Wasserstoffprotonen angeregt. Die dabei aufgenommen Energie wird im Anschluss, in Form von messbaren Impulsen, wieder abgegeben. „Die darstellbare Information ergibt sich unter anderem aus dem Wassergehalt und dessen Verteilung im Gewebe, dem Sauerstoffgehalt im Gewebe sowie den besonderen elektromagnetischen Eigenschaften des Wasserstoffmoleküls und seiner direkten Umgebung“ (Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, 2013). Mithilfe sogenannter Gradientenspulen kann das Magnetfeld außerdem kurzzeitig in den verschiedenen Raumrichtungen abgeändert werden, was zusätzlich eine dreidimensionale Ortskodierung ermöglicht (Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, 2013). Ein Computer setzt die verschiedenen Informationen zu einem dreidimensionalen Hell-Dunkel-Kontrast-Bild zusammen.

Die Stärke des Magnetfeldes (Feldstärke, gemessen in Tesla) ist entscheidend für die Empfindlichkeit der Messung (Signal-zu-Rausch Verhältnis); dabei ist das Signal-zu-Rausch Verhältnis proportional zur Feldstärke. Welche Feldstärken ein MRT-Gerät realisieren kann, ist abhängig vom Gerätetyp bzw. dem ihm zugrunde liegenden Magneten. Dabei dominieren heutzutage zwei Magnettypen: Permanentmagneten (0.01 bis 0.35 Tesla) und supraleitende Elektromagneten (≥ 0.5 Tesla) (Siemens AG, 2003).

Nach Aussage der Siemens AG kommen in MR-Systemen, die supraleitende Magnete benutzen, keine nennenswerten Konzentrationen Terbium, Dysprosium und Neodym vor: In den Magneten selbst sind diese Elemente gar nicht enthalten, nur in der begleitenden Elektronik des MR-Systems (Bömmel 2013).

Anders verhält es sich Systemen auf Basis von Permanentmagneten. Hier werden erhebliche Mengen Neodym-Eisen-Bor eingesetzt, wobei auch andere Dotierungen möglich sind (siehe Metallkonzentrationen). Die in MR-Systemen verwendeten Permanentmagneten sind vergleichbar mit solchen, wie sie z. B. im Bereich der Windenergie eingesetzt werden, allerdings weisen sie mit bis zu 100 kg pro Gerät ein deutlich geringeres Gewicht auf. Da solche Systeme aber nur geringe Feldstärken realisieren können, ist ihr Marktanteil (gegenüber den Systemen, die supraleitende Magnete verwenden) deutlich kleiner einzuschätzen (Bömmel 2013).

Die benötigte Feldstärke und damit der benötigte Magnettyp eines MR-Systems sind in erste Linie abhängig vom Einsatzgebiet des Gerätes. Eine allgemein optimale Feldstärke für MR-Systeme

gibt es daher nicht, dennoch sind Tendenzen in Richtung mittlerer bis hoher Feldstärken zu erkennen. Insbesondere in der Forschung werden Hochfeld-Tomographen eingesetzt (ultra-high field), die Feldstärken zwischen 3 und 11 Tesla erzielen (Rinck, 2012, Kapitel 21). Auch im klinischen Bereich werden zunehmend Hochfeld-Tomographen eingesetzt. Schätzungen des European Magnetic Resonance Forum (Rinck, 2012, Kapitel 21) zufolge, teilen sich die 2012 und 2013 (weltweit) verkauften MR-Systeme folgendermaßen auf: 28 % Systeme mit niedrigen und mittleren Feldstärken (< 1.5 Tesla), 55 % Hochfeld-Tomographen (≥ 1.5 Tesla) und 17 % Ultra-Hochfeld-Tomographen (≥ 3.0 Tesla).

Meist handelt es sich bei Systemen mit Permanentmagneten (≤ 0.35 Tesla) um offene Systeme, da sich die Form des Magneten hierzu sehr gut eignet (Siemens AG, 2003). Im Gegensatz zu konventionellen Systemen (Röhren) lassen offene Systeme Interventionen zu, wodurch sie weitere/andere Funktionsbereiche bedienen. Allerdings stehen auch Hochfeld-Tomographen (mit supraleitenden Magneten) zunehmend als offene Systeme (bis 1 Tesla) zur Verfügung. In den USA ist der Marktanteil offener MR-Systeme größer im Vergleich zu Europa, wo vermehrt Hochfeld-Tomographen (geschlossene Systeme) nachgefragt werden. Dennoch liegt selbst in den USA, dem größten Markt für MR-Systeme, der Anteil jener Systeme, die unterhalb der Feldstärke von 1 Tesla operieren, bei weniger als 15 % (Rinck, 2012, Kapitel 21). Dieser Anteil könnte in den Berechnungen des Recyclingpotenzials daher als maximaler Anteil des Bestandes, der auf Basis von Permanentmagneten operiert, angenommen werden.

Tabelle 110: Übersicht MR-Systeme

Bezeichnung (engl.)	Stärke in Tesla (T)	Magnettyp	System	Vorr. Einsatzgebiet
Ultralow field	< 0.1	Permanentmagnet	Offene Systeme	Klinische Bildgebung (Optimum 1.5T)
Low field	< 0.4			
Medium field	< 1.5	Supraleitender Magnet	Offene Systeme (bis 1T) Röhrenförmige Systeme	
High field	> 1.5			
Ultra-high field	> 3.0			Forschung

Quelle: basierend auf: Siemens AG 2003 & Rinck 2012

Neben den drei großen Herstellern von MRT-Geräten, Siemens Healthcare (Siemens AG, Medical Solutions), Philips Healthcare und General Electric (GE) Healthcare, standen wir in Kontakt mit dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. (ZVEI). Allerdings gibt es zu der Thematik bisher keine veröffentlichten Daten.

In Verkehr gebrachte Mengen

Die Darstellung der Bestandsentwicklung von MRT-Geräten gestaltet sich aufgrund fehlender Bundesstatistiken als äußerst schwierig: „Angaben zur Gesamtzahl der Geräte in Deutschland werden regulär nicht mehr veröffentlicht und [können] auch auf Anfrage bei einschlägigen Institutionen auf Bundesebene nicht eruiert werden“ (BARMER; GEK. Arztreport, 2011). Abgesehen von historischen Daten und öffentlichen Qualitätsberichten der Krankenhäuser haben Krankenkassen Zugriff auf weitere relevante Daten. Die BARMER GEK hat 2011 einen Arztbericht herausgebracht, welcher die Inhalte der genannten Informationsquellen bündelt und für eine Prognose wertvolle Referenz-Bestände zusammenträgt. Laut dem BARMER GEK Arztbericht (2011) ist bisher kein Sättigungspunkt der Nutzungsraten in Deutschland zu erkennen. Während sich Deutschland im Bereich der MRT-Untersuchungsfrequenz im Vergleich zu den anderen OECD-Ländern

schon im Spitzenfeld bewegt, besteht hinsichtlich der Zahl der MRT-Geräte je Millionen Einwohner noch Steigerungspotenzial. Doch auch im Hinblick auf die Untersuchungshäufigkeiten kann, insbesondere aufgrund demographischer Veränderungen, zukünftig durchaus von einer noch häufigeren Anwendung dieser Untersuchungstechnik ausgegangen werden. Demnach könnten sich Bestandsentwicklungen ergeben, wie sie in Tabelle 111 dargestellt sind. Dazu wurden die im BARMER Arztreport (2011) ermittelten Bestände (mit * gekennzeichnet) als Richtwerte genommen. Um die Bestände für die Zeiträume zwischen diesen Richtwerten zu berechnen wurde zunächst das durchschnittliche jährliche Wachstum zwischen je zwei Richtwerten bestimmt (ca. 31% zwischen 1984 und 1996, ca. 13% zwischen 1996 und 2008). Der historischen Bestandsentwicklung wird somit ein exponentielles Wachstum zu Grunde gelegt, da für den Markt der MRTs von einem logistischen Wachstum auszugehen ist. Ein solches wächst zunächst exponentiell und nähert sich schließlich einem Sättigungspunkt. Die Bestimmung des Wende- bzw. Sättigungspunktes ist an dieser Stelle nicht möglich. Laut der BARMER (Arztreport 2011) ist aber bisher noch von keinem Sättigungspunkt in Deutschland auszugehen was bedeutet, dass die Bestände vorerst weiter wachsen werden.

Die Bestandsentwicklung ab 2008 wurde durch lineare Regression, auf Basis der „bekannteren“ historischen Werte, geschätzt. Sie können kein absolut verlässliches Bild zukünftiger Bestandsentwicklungen zeichnen, allerdings dürfte dies für die Abschätzung des Recyclingpotenzials im Jahre 2020 - angesichts der langen Lebensdauer der Geräte - keine erhebliche Rolle spielen.

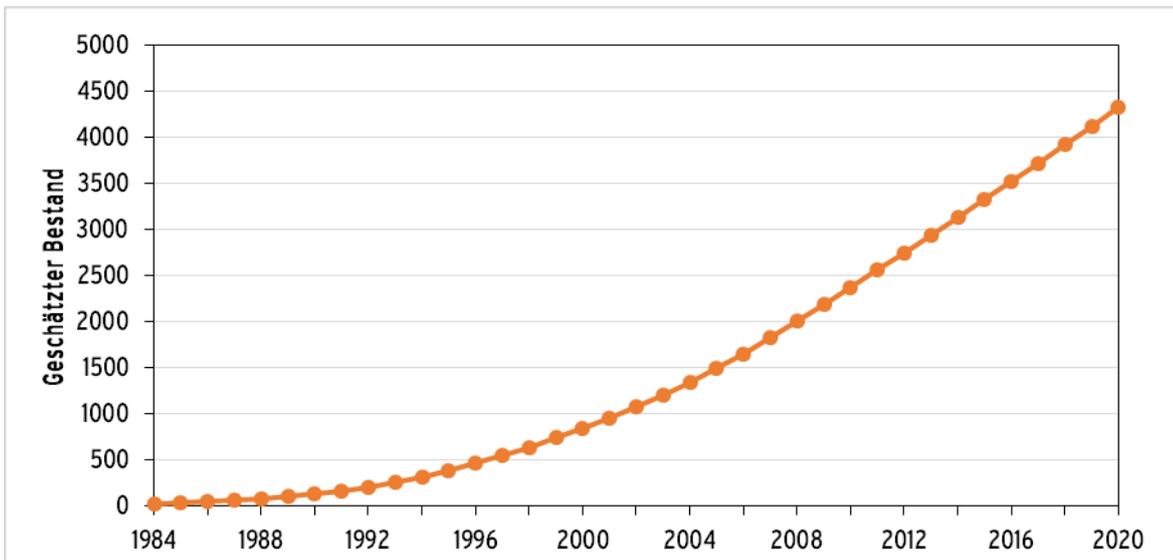
Tabelle 111: Abschätzung des inländischen (Deutschland) Bestandes von MRT-Geräten (Quelle: BARMER; GEK, Arztreport 2011)

Jahr	Geschätzter Bestand (Anzahl Geräte)
1984	20 (18)
1985	24
1986	31
1987	41
1988	53
1989	70
1990	91
1991	120
1992	157
1993	206
1994	270
1995	355
1996	462 (465*)
1997	525
1998	593
1999	670
2000	756
2001	854
2002	964
2003	1.089
2004	1.230
2005	1.389

Jahr	Geschätzter Bestand (Anzahl Geräte)
2006	1.568
2007	1.854
2008	2.006 (2.000*)
2009	2.168
2010	2.361
2011	2.553
2012	2.745
2013	2.937
2014	3.130
2015	3.322
2016	3.514
2017	3.707
2018	3.899
2019	4.091
2020	4.283

⁴Anzahl der Geräte in den alten Bundesländern; * vorliegende Richtwerte

Abbildung. 28: Abschätzung des inländischen Bestandes von MRT-Geräten in Deutschland (Quelle: BARMER; GEK, Arztreport 2011)



Wie zuvor beschrieben, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Anteil der MR-Systeme mit Permanentmagneten auf maximal 15 % des Bestandes beläuft.

Metallkonzentrationen im Produkt

Wie eingangs erwähnt, sind die Metallkonzentrationen in Systemen mit supraleitenden Magneten an dieser Stelle insofern vernachlässigbar, als dass sie nur in der begleitenden Elektronik eingesetzt werden. Dies gilt nicht für jene MR-Systeme, die sich auf den Einsatz von Permanentmagneten stützen.

In der Regel handelt es sich um Neodym-Eisen-Bor Magnete NIB ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), wobei auch andere (Misch-) Dotierungen möglich sind, wie Praseodym-Eisen-Bor-Magnet ($\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) und dem Neodym-Dysprosium-Eisen-Bor-Magnet ($\text{Nd}_{10}\text{Dy}_4\text{Fe}_{80}\text{B}_6$) (Talens Peiro et al. 2011). Ein solcher Permanentmagnet besteht zu rund 30 % aus Elementen der Gruppe der Seltenen Erden, welche sich wie folgt aufteilen:

Tabelle 112: Prozentuale und absolute Massenanteile von Seltenen Erden in einem NEB-Permanentmagneten von 100 kg

Wert	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Gesamtanteil Seltener Erden
Prozentual	70 %	24 %	5 %	1 %	30 %
Absolut	21 kg	7,2 kg	1,5 kg	0,3 kg	30 kg

Quelle: basierend auf Talens et al. 2011

Exporte aus der Nutzungsphase

Die Exportquote für die gesamte deutsche Industrie der Medizintechnik hat sich innerhalb der letzten Jahre, mit einer leicht steigenden Tendenz auf einem recht hohen Niveau um die 65 % bewegt (Spectaris, Fachverband für Medizintechnik, 2013). Im Hinblick auf den Weltexport nimmt Deutschland laut dem BMBF (2013) mit rund 13% Anteil den zweiten Platz ein - auch hier wird von einer Exportquote von über 50% ausgegangen (BMBF 2012). Bzgl. des Exports von Geräten direkt aus der Nutzungsphase liegen jedoch keine Erkenntnisse vor.

Verweildauer

MRT-Geräte weisen grundsätzlich eine sehr hohe Lebensdauer von mindestens 10 Jahren auf. Es ist allerdings davon auszugehen, dass Geräte nach einer durchschnittlichen Verweildauer von 7 Jahren ausgetauscht werden (Rinck, 2012, Kapitel 21). Grund dafür ist vielmehr eine überholte Technik als das Nachlassen zentraler Komponenten wie z.B. des Magneten. Diese stehen auch nach dem Austausch des Gerätes nicht zwangsläufig für ein Recycling zur Verfügung, da diese schon heute vielfach wiederverwendet werden (siehe auch „Anmerkungen zur Entsorgungssituation“).

Potenziell als Abfall anfallende Menge

Wie beschrieben, finden sich die hier relevanten Metalle nur in kompakten MRT-Geräten, die im Bereich der Orthopädie eingesetzt werden. Welchen Anteil diese an dem in Tabelle 113 dargestellten Bestand ausmachen, ist jedoch unklar. Um dennoch eine grobe Abschätzung der Größenordnung der potenziell als Abfall anfallenden Mengen in 2020 zu erhalten, werden Anteile der relevanten MR-Systeme am Gesamtbestand von 10, 20 und 50 % untersucht.

Die Verweildauer beläuft sich auf mindestens 10 Jahre, wobei hier vereinfachend mit 10 Jahren gerechnet wird (Fraunhofer ISI sowie eigene Erhebungen 2014). Erhebungen zu den Weibullparametern konnten für MRTs nicht gefunden werden. Daher werden hier verschiedene Werte für den Formparameter ($k = 2; 3; 4; 5$) untersucht, die die für andere Produkte zu findende Bandbreite

abdecken. Unter Annahme dieser Parameter ergeben sich anhand der dargestellten Bestandsentwicklung folgende in Verkehr gebrachte Mengen.

Tabelle 113: In Verkehr gebrachte MRT-Mengen in Abhängigkeit von verschiedenen Formparametern

Jahr	k=2	k=3	k=4	k=5	Jahr	k=2	k=3	k=4	k=5
1984	20	20	20	20	2003	186	179	177	176
1985	4	4	4	4	2004	211	204	203	203
1986	7	7	7	7	2005	238	231	231	232
1987	11	10	10	10	2006	269	261	260	261
1988	13	13	12	12	2007	388	378	376	376
1989	19	18	18	17	2008	267	255	251	248
1990	24	23	22	22	2009	293	278	271	266
1991	33	32	31	30	2010	340	323	314	307
1992	42	41	40	39	2011	355	338	328	321
1993	56	54	53	53	2012	372	356	346	340
1994	73	71	70	70	2013	390	374	367	362
1995	97	94	93	93	2014	409	395	390	388
1996	123	118	117	116	2015	426	414	411	412
1997	83	78	76	75	2016	445	434	433	436
1998	94	87	84	82	2017	464	454	454	458
1999	109	102	98	96	2018	482	472	472	474
2000	125	117	113	110	2019	500	490	488	487
2001	144	136	132	130	2020	519	508	503	498
2002	163	156	153	151					

Anhand der iVgM an MRT-Geräten ergibt sich über die oben dargestellten Annahmen zum Anteil der für SE relevanten MR-Systeme (10, 20, 50 %) und den Angaben zum Metallgehalt pro Gerät die jährlich in Verkehr gebrachte Menge an Seltenen Erden. Hierüber werden unter Annahme der Weibullverteilung die in 2020 als Abfall zu erwartenden Mengen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 114 für die verschiedenen angenommenen Marktanteile der relevanten MR-Systeme und Formparameter dargestellt.

Tabelle 114: Aus MRT-Geräten in 2020 zu erwartende Metallmengen unter Annahme verschiedener Marktanteile und Formparameter [Angaben in Kilogramm]

Marktanteile	k=2	k=3	k=4	k=5
10% - Referenzszenario	980	947	932	922
20%	1.959	1.894	1.865	1.844
50%	4.898	4.735	4.662	4.611

Die entsprechend den getroffenen Annahmen zu erwartenden Abfallmengen bewegen sich zwischen knapp 1.000 kg und 5.000 kg Seltene Erden. Es gilt jedoch zu beachten, dass ein Anteil der relevanten Systeme um die 10 % als wahrscheinlich gilt und hier als Referenzszenario angenommen wird. Entsprechend der Anteile der einzelnen Seltenen Erden würden sich für 1.000 kg SE 700 kg Neodym, 240 kg Praseodym, 50 kg Dysprosium und 10 kg Terbium ergeben.

Anmerkungen zur Entsorgungssituation

Im Bereich der MRT-Geräte scheint die Rücknahme der Geräte durch den Hersteller und die Wiederverwendung zentraler Komponenten (wie z.B. die der supraleitenden Magnete) in neueren Technologien, üblich zu sein. Die Art des Rücknahmesystems variiert. Philips nimmt Gebrauchtgeräte zurück, unterzieht sie einer Generalüberholung und bietet sie dann wieder zum Verkauf an (Philips Healthcare, 2005). Ähnlich verhält es sich mit der *Magnetic Resonance ecoline* von Siemens Healthcare (2013). Der amerikanische Hersteller GE-Healthcare hingegen verkauft seine Geräte nicht, sondern least sie, wodurch diese automatisch nach Beendigung des Leasing-Vertrages an den Hersteller zurückgeführt werden (außerdem: alle Ersatzteile für GE-Healthcare Systeme, die außerhalb der USA in Gebrauch sind, werden aus den USA importiert) (Metz, 2013).

Röntgengeräte

Als gängigstes Röntgenverfahren gilt heute die Computertomographie (CT), die in den 60er Jahren die konventionelle Methode des Projektionsröntgens weitestgehend abgelöst hat (Wilhelm, 2006). Dabei wurde der Film als Informationsträger durch entsprechende Computertechnologien und Röntgendetektoren abgelöst (Wilhelm, 2006). Heute gehören diese Geräte zur Standardausrüstung von neuroradiologischen Abteilungen (Wilhelm, 2006). Die Anwendungsgebiete reichen von der Unfalldiagnostik, über Untersuchungen am Kopf und der Lunge bis hin zu Untersuchungen am Bewegungsapparat (Wilhelm, 2006).

Die Kernkomponenten eines CT-Gerätes sind die Röntgenquelle und das Detektorsystem (Wilhelm 2006). Die in der Röntgenquelle (-röhre) erzeugte Strahlung durchläuft den menschlichen Körper und wird auf der gegenüberliegenden Seite vom Detektor registriert (Wilhelm 2006). Je höher die Anzahl der Detektoren, desto größer die Anzahl der verschiedenen Winkel, aus der die Körperschicht zugleich durchleuchtet wird und desto geringer die benötigte Aufnahmezeit.

Die heute relevantesten CT-Messwerterfassungssysteme sind die sogenannten „Fächerstrahl-Systeme“, die entweder mit einem stationären oder einem rotierenden Detektor-System ausgestattet sind. Systeme mit rotierenden Detektoren arbeiten mit bis zu 1.000 Detektoren, Systeme mit stationären Detektoren sogar mit bis zu 5.000 Detektoren (Wilhelm 2006). Die Anzahl der Detektoren bestimmt nicht nur die Aufnahmezeit, es ist außerdem die Aufgabe des Detektorsystems die „Signal tragenden“ Strahlen in elektrische Signale umzuwandeln, um diese anschließend zu einem Bild verarbeiten zu können. Die Materialanforderungen sind daher sehr hoch (Wilhelm 2006). „In der CT werden überwiegend zwei Typen von Röntgendetektoren eingesetzt: Xenon-Hochdruckionisationskammern und Szintillisationskristalle mit Photodioden“ (Suter 2012). Wegen ihrer positiven Eigenschaften werden häufig vor allem Letztere verwendet (Wilhelm 2006). Hier gelten Seltene Erden aufgrund ihres hohen Absorptionskoeffizienten als geeignete (szintillierende) Materialien (Wilhelm 2006).

Ursprünglich wurde die Produktgruppe der Röntgengeräte aufgrund der Anwendung von Gadolinium ausgewählt (wobei sich hier keine eindeutige Mengenrelevanz gezeigt hat), da Gadoliniumoxysulfid (Gd_2O_3S), neben Tallium-dotiertem Cäsiumjodid ($CsJ:Tl$), üblicherweise als szintillierende Materialien in den Festkörperdetektoren (Szintillator) eingesetzt wird (Wilhelm 2006). Daneben kommen aber auch Dotierungen mit Terbium, Praseodym und Dysprosium vor.

In Verkehr gebrachte Mengen

Aufgrund der kostspieligen Anschaffung und der langlebigen Technik der Röntgengeräte befinden sich derzeit noch Geräte aus den 1980er Jahren in der Nutzung. Eine Hochrechnung auf Basis der Anzahl von Arztpraxen ist nicht möglich, da nicht jede Arztpraxis über ein Röntgengerät verfügt.

Zahlen über Radiologen sind zwar vorhanden, aber dort kommen in der Regel mehr als ein Röntgengerät zum Einsatz. Statistiken hierzu sind nicht verfügbar und auch Experten konnten keine Zahl nennen.

Was die Marktentwicklungen betrifft, so gilt der Bereich der Medizintechnik laut Angerer et al. (2009) als Wachstumsbranche, wobei dies aus deutscher Sicht insbesondere dem Export zuzuschreiben ist. Auf dem Weltmarkt wird bis 2030 ein jährliches Wachstum von maximal 4,75 % erwartet (Angerer et al. 2009).

Eine Datengrundlage, die die Differenzierung der Röntgengeräte nach Metallgehalten ermöglichen würde, ist nicht verfügbar.

Die Abschätzungen des CT-Bestandes in Deutschland (Tabelle 115) erfolgt nach derselben Vorgehensweise wie beschrieben für Tabelle 111, wobei der Basisbestand im Jahre 1972 zunächst geschätzt werden musste.

Tabelle 115: Abschätzung des inländischen (Deutschland) Bestandes von Computertomographen

Jahr	Geschätzter Bestand (Anzahl Geräte)	Jahr	Geschätzter Bestand (Anzahl Geräte)
1972	25	1997	1.413
1973	34	1998	1.485
1974	45	1999	1.561
1975	61	2000	1.640
1976	82	2001	1.724
1977	110	2002	1.812
1978	149	2003	1.905
1979	200*	2004	2.002
1980	224	2005	2.105
1981	250	2006	2.212
1982	280	2007	2.325
1983	313	2008	2.444*
1984	350	2009	2.500*
1985	392	2010	2.472
1986	438	2011	2.600*
1987	490	2012	2.675
1988	548	2013	2.746
1989	613	2014	2.817
1990	686	2015	2.888
1991	767	2016	2.959
1992	858	2017	3.031
1993	960	2018	3.102
1994	1.074	2019	3.173
1995	1.202	2020	3.244
1996	1.344*		

* vorliegende Richtwerte (BARMER GEK, Arztreport, 2011)

Metallkonzentrationen im Produkt

Die Schichtdicke eines mit Gadolinium Oxysulfide beschichteten “Screens” kann bei 300 µm liegen. Die Länge der verwendeten Kristalle liegt bei etwa 10 mm (Suter 2012).

Die gesamte Metallkonzentration in einem entsprechenden Röntgengerät ist allerdings stark abhängig vom Hersteller und der Anzahl der verwendeten Detektoren, die extrem variieren kann.

Angerer et al. (2009) haben einen Gadoliniumoxysulfid-Gehalt von ca. 500 g in den Siemens Geräten errechnet. Dies entspräche einem Anteil von 191,54 g Gadoliniumoxid und 166,12 g Gadolinium.

Tabelle 116: Richtwert für die Gadoliniumoxid-Konzentration in Computertomographen

Parameter	Gadoliniumoxysulfid (Gd ₂ O ₂ S)	Gadoliniumoxid (Gd ₂ O ₃)
Metallkonzentration je Gerät	500 g	191,54 g

Quelle: basierend auf Angerer et al. 2009

Vergleichbare Angaben für andere Hersteller stehen nicht zur Verfügung und werden von den Unternehmen selber als vertraulich eingestuft.

Exporte aus der Nutzungsphase

Aufgrund der Datenlage gelten hier die gleichen Annahmen wie zuvor für die MRT-Geräte. Die Daten, welche für bildgebende Verfahren insgesamt bzw. für die gesamte deutsche Industrie der Medizintechnik gelten, wurden in die Statistik einbezogen.

Verweildauer

Angerer et al. (2009) geht in seiner Studie von einer mittleren Lebensdauer von 8 Jahren für Computertomographen aus, diese kann aber auch deutlich größer sein. Eigene Recherchen lassen auf eine vergleichsweise lange Nutzungsdauer von etwa 20 Jahren schließen (Fraunhofer ISI sowie eigene Erhebungen 2014).

Ergebnisse

Für Röntgengeräte lagen keine Erhebungen bzgl. der Weibullparameter vor. Analog zu den MRTs werden daher Formparameterwerte von k = 2 bis 5 untersucht. Anhand dieser k-Werte, der Verweildauer von 20 Jahren und der dargestellten Bestandsentwicklung lassen sich die in Verkehr gebrachten Mengen ermitteln. Hieraus ergaben sich die in folgender Tabelle dargestellten Zeitreihen.

Tabelle 117: Zeitreihen zur Inverkehrbringung von Röntgengeräten/CTs, in Abhängigkeit von verschiedenen Formparametern

Jahr	k=2	k=3	k=4	k=5	Jahr	k=2	k=3	k=4	k=5
1990	86	80	77	75	2006	177	170	167	165
1991	96	90	86	84	2007	188	181	178	175
1992	108	102	98	96	2008	198	192	189	185
1993	122	115	112	109	2009	140	133	130	127
1994	137	130	126	123	2010	61	54	51	48
1995	154	147	143	140	2011	221	215	212	210

Jahr	k=2	k=3	k=4	k=5	Jahr	k=2	k=3	k=4	k=5
1996	171	164	160	158	2012	172	167	165	163
1997	102	94	91	89	2013	173	168	166	165
1998	109	100	98	97	2014	177	172	171	171
1999	117	108	106	105	2015	181	177	176	177
2000	124	115	113	113	2016	185	181	181	181
2001	133	124	122	123	2017	190	186	186	187
2002	141	133	131	132	2018	193	190	189	189
2003	150	142	140	141	2019	197	194	193	193
2004	158	151	149	149	2020	201	197	197	196
2005	169	161	159	158					

Anhand der iVgM an Röntgengeräten/CTs und der oben dargestellten Metallmenge ergaben sich die jährlich in Verkehr gebrachte Metallmengen. Hieraus wurde unter Annahme der Weibullverteilung und der verschiedenen Formparameterwerte die zu erwartende Metallmenge in 2020 bestimmt. Unter Annahme der verschiedenen Parameter ergab sich eine Gadoliniummenge von 23,9 bis 24,8 kg.

Tabelle 118: In 2020 zu erwartende Gadoliniummenge aus Röntgengeräten/CTs (Angaben in kg)

Element	k=2	k=3	k=4	k=5
Gd	24,8	24,2	24,1	23,9

5.3.12 Brennstoffzellen

Aus der Analyse der Produktgruppen hat sich bezüglich Brennstoffzellen eine Relevanz für Platin, Palladium sowie Yttrium gezeigt. Des Weiteren ergab sich eine Relevanz für Cer und Lanthan.

5.3.12.1 Produktidentifizierung

Im Bereich der Brennstoffzellen gibt es unterschiedliche Arten, die sich insbesondere durch die eingesetzten Elektrolyte, Elektrodenmaterialien und Membranen unterscheiden:

- Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC);
- Alkalische Brennstoffzelle (AFC);
- Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC);
- Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC);
- Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC);
- Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC).

Relevante Anteile der untersuchten Metalle finden sich in einigen Zellenarten. Der folgende Abschnitt beschreibt zunächst Zellenarten, die direkt aufgrund fehlender Relevanz von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden können.

Alkalische Brennstoffzellen (AFC) als erste auszuschließende Bauform sind in den 1960er Jahren für die militärische Raumfahrt entwickelt worden (PtJ 2015a). Mit einer Betriebstemperatur bis zu 90 °C sind sie den Niedertemperaturbrennstoffzellen zuzuordnen (Baumann F.M. et al. 2015).

Sowohl bedingt durch ihre niedrige Lebensdauer von 2.000 - 5.000 Stunden als auch hohe Reinheitsanforderungen an den Brennstoff, sind sie Stand heute auf Nischen- bzw. Spezialanwendungen, wie beispielsweise die Raumfahrt oder wenige U-Bootantriebe beschränkt (PtJ 2015a; Kordes et al. 1996). Zusätzlich können die Katalysatoren ohne Platingruppenmetalle ausgeführt werden (Heinzel et al. 2006; Kordes et al. 1996). Beide Fakten unterstreichen eine fehlende Mengenrelevanz und führten zu einem Ausschluss der AFC bei der weiteren Betrachtung.

Einen weiteren von der Betrachtung auszuschließenden Brennstoffzellentyp stellt die Schmelzkarbonatzelle (MCFC) dar. Diese kann mit 650 °C Einsatztemperatur den Hochtemperaturzellen zugeordnet werden. Die Zelle wird gänzlich ohne Edelmetallkatalysatoren betrieben (PtJ 2015a) (Kordes et al. 1996). Zusätzlich ist der weltweite Markt von MCFC Brennstoffzellen auf einige wenige Einheiten beschränkt (E4tech 2014). Daher wurde auf eine weitergehende Betrachtung auch hier verzichtet.

Alle weiteren Zellen werden nachfolgend hinsichtlich ihres generellen Aufbaus, der ReStra-Metallgehalte sowie der prognostizierten Lebensdauer und in Verkehr gebrachte Mengen der einzelnen Zellentypen untersucht. Zelltypen, für die sich aufgrund geringer in Verkehr gebrachter Mengen und/oder niedriger Metallkonzentration keine Relevanz für die weitere Betrachtung im Projekt ergab, wurden in Kapitel 5.3.12.2 identifiziert. Insgesamt umfasst die nachfolgende Analyse bezogen auf die Anzahl der in Verkehr gebrachten Brennstoffzellen mindestens 95 %; bezogen auf die Leistung über 60 % aller Zellenformen.

5.3.12.2 Produktanalyse

In einer Brennstoffzelle (BSZ) wird, im Gegensatz zur Gewinnung elektrischer Energie mittels Wärmekraftmaschine und Generator, chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels direkt in elektrische Energie umgewandelt.

Die Vorteile von BSZ sind ein hoher Wirkungsgrad, Modularität, Möglichkeit der Nutzung unterschiedlicher Brennstoffe, niedrige Emissionen und Geräuscharmheit (Angerer et al. 2009). Eingangs soll die in Deutschland im relevanten Bezugszeitraum installierte Leistung quantifiziert werden. In einem ersten Schritt wird dafür die mittlere Lebenserwartung der Zellen ermittelt, welche als Grundlage für die in Verkehr gebrachte Menge dient. Dies geschieht aufgrund ähnlicher Lebensdauern zellenunabhängig wie der Produktanalyse vorangestellt.

In Verkehr gebrachte Menge

Zu Brennstoffzellen stehen keine Daten zur installierten Leistung zur Verfügung. Einen alternativen Ansatz stellt das Extrapolieren bekannter Produktionsstatistiken und -prognosen für einzelne Jahre auf den relevanten Zeitraum von 2012 bis 2020 dar. Stützwerte aus einer umfragegestützten Verbandsprognose (VDMA Survey 2013) wurden mit interpolierten Werten ergänzt, um diskrete abgeschätzte Jahreswerte für eine installierte Anzahl von Brennstoffzellen in Deutschland zu erhalten. Die verfügbaren Literaturwerte beschreiben hierbei jedoch nicht die installierten, sondern die produzierten Zellen in Deutschland. Nach Abzug der jeweiligen Exportquote (auch hier wurden bekannte Stützwerte aus derselben Prognose des VDMA auf zukünftige Jahre interpoliert) verbleiben die installierten inländischen Zellen. Diese wurden abschließend disaggregiert nach Zellentyp und der durchschnittlichen Leistung zu einer kumulierten installierten Leistung nach Zellentyp weitertransformiert. Tabelle 119 zeigt die jeweiligen Exportquoten Deutschlands im relevanten Zeitraum.

Tabelle 119: Exportanteile von Brennstoffzellen in Deutschland nach (VDMA Survey 2013) ergänzt um Interpolationen

Jahr	Exportanteil [%]
2012	24
2013	27
2014	34*
2015	39
2016	41*
2017	43*
2018	44*
2019	46*
2020	46

*: Interpolierter Wert

In einem zweiten Schritt wurden die jährlich installierten Systeme in Deutschland aufsummiert wiedergegeben. Aufgrund der stark ansteigenden Anzahl installierter Systeme seit dem Jahr 2012 (2012: 3.600 Systeme; 2020: 162.000 Systeme) wurde eine Interpolation mittels exponentiellen Interpolationspolynoms zwischen den beiden bekannten Stützstellen 2015 und 2020 vorgenommen (VDMA Survey 2013). Die starke Zunahme erschien aufgrund hoher Lerneffekte und einer weiteren Marktdiffusion gerechtfertigt. Im Vergleich zu einer stückweise linearen Interpolation zwischen den Stützstellen 2012, 2013, 2015 und 2020 weist die vorgenommene Interpolation einen sanfteren und konsistenteren Verlauf auf und reduziert so die „Sprünge“ zwischen einzelnen Jahren.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 120 zeigt nachfolgend die installierten Einheiten für Deutschland im Zeitraum 2012 bis 2020.

Berechnungsgrundlage ist folgende synthetische Formel:

$$\text{Installierte Einheiten } (IE_x) = 1 - \frac{\text{Exportanteil [\%]}}{100} * 32.000 * e^{0,448*x}$$

Tabelle 120: Abschätzung installierter Einheiten an Brennstoffzellen in Deutschland im Zeitraum 2012-2020. Eigene Berechnungen nach (VDMA 2013) mit interpolierten Werten.

Jahr	Installierte Einheiten Brennstoffzelle (Deutschland)
2012	3.600
2013	5.500
2014	12.600
2015	19.500
2016	31.800*
2017	51.600*
2018	85.300*
2019	138.300*
2020	162.000

* Interpolierter Wert

Der letzte Arbeitsschritt zur Bestimmung der installierten Leistungen nach Zellentyp lag in der Bestimmung der mittleren Leistung pro Zelle nach Zellentyp. Für dessen Ermittlung wurden Vergleichsdaten im Zeitraum 2012 bis 2014 gemittelt analysiert und mit Tabelle 119 und Tabelle 121 visualisiert.

Tabelle 121: Mittlere Leistung der einzelnen Brennstoffzellen

Zellentyp	Mittlere Leistung in kW pro Zelle
PEMFC	1,31
DMFC	0,08
PAFC	Keine Angabe
SOFC	12,73

Quelle: E4tech 2014

Lediglich für PAFC-Zellen existieren keine quantifizierbaren Daten. Dies fällt jedoch nur marginal ins Gewicht, da von diesem Zellentyp 2014 weltweit weniger als 100 Einheiten produziert wurden (E4tech 2014). Ein Marktanteil nach verkaufter Anzahl an Zellen ist daher praktisch nicht vorhanden; nach installierter Leistung liegt er lediglich bei zwei Prozent (E4tech 2014; VDMA Survey 2013). Daher wurde der Zellentyp PAFC an dieser Stelle mangels praktischer Relevanz von einer weiteren Betrachtung ausgenommen. Eine detaillierte Analyse erfolgte für die Zellentypen PEMFC, DMFC und SOFC.

Mit den zuvor errechneten Funktionen und Parametern wurde die installierte Leistung im relevanten Zeitraum errechnet (

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 122).

Tabelle 122: Installierte Leistung [MW] der relevanten Zellentypen in Deutschland im Zeitraum 2012-2020

Jahr	PEMFC	DMFC	SOFC
2012	4,2	0,0	2,3
2013	6,3	0,0	5,7
2014	14,8	0,1	8,3
2015	22,9	0,1	12,9
2016	37,4	0,1	21,1
2017	60,7	0,2	34,2
2018	100,3	0,3	56,5
2019	162,7	0,5	91,5
2020	190,6	0,6	107,2

Die weiteren Berechnungsschritte wurden aufgetrennt auf die einzelnen zu untersuchenden Brennstoffzellentypen vorgenommen. Wesentlicher Vorteil war hierbei die Identifizierung relevanter Materialien und die Möglichkeit der eingehenden Beschreibung der verschiedenen Zellentypen.

Metallkonzentrationen und Metallmengen in SOFC

Solid oxide fuel cells (SOFC) sind für die Untersuchung aufgrund ihres Gehalts an Yttrium und Lanthan relevant.

SOFC bestehen aus zwei porösen Elektroden, zwischen denen ein dichter, ionenleitender Elektrolyt liegt. An der Kathode wird Sauerstoff zugeführt, der die vom externen Stromkreis kommenden Elektronen aufnimmt und zu Oxidionen reagiert, die zur Anode durch das ionenleitende Elektrolyt wandern. An der Anode rekombinieren die Oxidionen mit Wasserstoff (und/oder Kohlenstoffmonoxid) zu Wasser (und/oder Kohlenstoffdioxid). Dabei werden Elektronen frei, die von der Anode über den externen Stromkreis zur Kathode fließen (Angerer et al. 2009). Die chemischen Reaktionen in der SOFC (in Abhängigkeit des verwendeten Brennstoffes) werden in Tabelle 123 dargestellt.

Tabelle 123: Reaktionsgleichungen der beiden Reaktionen, die in einer SOFC ablaufen

Brennstoff	Wasserstoff	Kohlenmonoxid	Methan
Anode	$H_2 + O_2^- \leftrightarrow H_2O + 2e^-$	$CO + O_2^- \leftrightarrow CO_2 + 2e^-$	$CH_4 + 4O_2^- \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O + 8e^-$
Kathode	$1/2 O_2 + 2e^- \leftrightarrow O_2^-$	$1/2 O_2 + 2e^- \leftrightarrow O_2^-$	$2O_2 + 8e^- \leftrightarrow 4O_2^-$
Gesamtreaktion	$H_2 + 1/2 O_2 \leftrightarrow H_2O$	$CO + 1/2 O_2 \leftrightarrow CO_2$	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O$

Quelle: Leinfelder 2004

Das für die Produktuntersuchungen relevante Yttrium befindet sich hierbei im Elektrolyt, der meistens aus Yttriumdotiertem Zirkoniumoxid (YSZ) besteht. YSZ ist wegen seiner ausreichenden ionischen Leitfähigkeit, der chemischen Stabilität und der mechanischen Festigkeit weit verbreitet. Sein Nachteil ist die niedrige Ionen-Leitfähigkeit im Bereich niedriger Arbeitstemperaturen (< 750°C) (Angerer et al. 2009). Das Lanthan wird als Lanthan-Strontium-Manganat für die Kathode verwendet.

Aus der Literatur liegen Angaben zu unterschiedlichen Metallkonzentrationen in verschiedenen Bauformen der SOFC vor. Allerdings liegen die Metalle in jeweils unterschiedlichen Erscheinungsformen vor, so dass ein direkter Vergleich bzw. die Berechnung einer Standardabweichung nicht möglich war. Die Ergebnisse sind in Tabelle 124 dargestellt.

Tabelle 124: Gehalt an Y und La in SOFC

Brennstoffzellentyp	Gehalt an Y-haltigem Material	Gehalt an La-haltigem Material	Erscheinungsform	Quelle
HT SOFC	3,4 - 3,6 g pro SOFC		YSZ	Khan 2009
HT SOFC		0,7 - 0,75g pro SOFC	LSM	Khan 2009
LT SOFC	0,34 - 0,38 g pro SOFC		YSZ	Khan 2009
SOFC	0,01 kg/kW		Yttrium	Angerer 2009
SOFC (fuel stack 125 kW (el))	0,122 kg/kW		Yttriumchlorid Pulver	Primas 2007
SOFC (fuel stack 125 kW (el))		0,062 kg/kW	LaCrO ₃ Pulver	Primas 2007
SOFC (fuel stack 125 kW (el))		4,28 kg/kW	LaMnO ₃ Pulver	Primas 2007
SOFC (großes BHKW)	0,08 kg/kW		ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)	Krewitt et al., 2004
SOFC (großes BHKW)	0,12 kg/kW		YCl ₃	Krewitt et al., 2004
SOFC (großes BHKW)		0,06 kg/kW	Dotiertes LaCrO ₃	Krewitt et al., 2004
SOFC (großes BHKW)		4,26 kg/kW	Dotiertes LaMnO ₃	Krewitt et al., 2004
SOFC (Hausheizung)	0,13 kg/kW		Ni-ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)	Krewitt et al., 2004
SOFC (Hausheizung)	4,03 kg/kW		ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)	Krewitt et al., 2004
SOFC (Hausheizung)		0,12 kg/kW	Dotiertes LaMnO ₃	Krewitt et al., 2004
ST SOFC		0,83 - 0,92 g pro SOFC	LSFC	Khan 2009

Zur weiteren Berechnung erfolgte auf Basis der Werte nach Primas (2007) und Krewitt et al. (2004) anhand der Summenformeln eine Berechnung der Konzentration an Yttrium und Lanthan pro installierter Leistung (vgl. Tabelle 125). Dazu wurde über das Molekulargewicht der Legierungen der Anteil an Yttrium und Lanthan an der Legierung und mit den Metallmengen aus Tabelle 124 die Menge an Yttrium und Lanthan pro Brennstoffzelle berechnet.

Tabelle 125: Umrechnung der Legierung in reines Y bzw. La

Legierung/Verbindung	Molekulargewicht	Anteil Y bzw. La am Gewicht	Masse Y in kg/kW	Masse La in kg/kW
YCl ₃	195,26	0,46	0,056	
ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)	349,04	0,51	4,03	
LaCrO ₃	238,91	0,58		0,036

Legierung/Verbindung	Molekulargewicht	Anteil Y bzw. La am Gewicht	Masse Y in kg/kW	Masse La in kg/kW
LaMaO ₃	241,85	0,57		2,457

Die abgeschätzten Metallkonzentrationen betragen daher etwa 2,5 kg Lanthan und 4,09 kg Yttrium pro Kilowatt elektrischer Zellenleistung. Zwar geben einzelne Quellen - dezidiert für kleine Systeme - bei benötigtem Lanthan signifikant niedrigere Werte an (Krewitt et al. 2004). Eine plausible Erklärung für eine deutlich niedrigere spezifische Lanthanmenge bei abnehmender Systemgröße konnte jedoch nicht gefunden werden. Daher wurde mit den konservativen Werten und Parametern weiter bilanziert.

Metallkonzentrationen und Metallmengen in PEMFC

PEMFC nutzen als Elektrolyten eine protonenleitende Membran. Basis dieser Membranen sind Fluorethylene. Sie können mit etwa 80 °C bis 120 °C Arbeitstemperatur den Niedertemperaturbrennstoffzellen zugeordnet werden (Blesl et al. 2013). Als Katalysatormaterialien kommen die Edelmetalle Palladium, Ruthenium und vor allem Platin zum Einsatz.

Zur Quantifizierung der relevanten Materialien (Platin, Palladium und Ruthenium) bereits in Verkehr gebrachter PEMFC-Brennstoffzellen musste eingangs die mittlere Beladung der Katalysatoren mit den Metallen ermittelt werden. Die teilweise schnellen Technologiefortschritte und die sich daraus ergebenden Veränderungen stellten dabei teilweise eine Schwierigkeit dar. Allen Entwicklungsstufen ist der Fokus auf das Metall Platin gemein. Die Ergänzungsmaterialien Palladium und Ruthenium werden in weit geringerem Umfang eingesetzt und wurden daher abgeschnitten (U.S. Department of Energy 2004). Die Beladungswerte für Platin im Jahr 2015 liegen bei etwa 0,1 - 0,15 $\frac{g}{kW}$. Für eine konservative Abschätzung wurde mit dem höheren der beiden Werte gerechnet. Bis zum Jahr 2020 werden sich die Beladungsdichten von Platin am Katalysator auf dann unter 0,1 $\frac{g}{kW}$ reduzieren (Mathey J. PLC 2011). Innerhalb dieses Zeitraums wurde von einer gleichförmigen Entwicklung ausgegangen, daher wurden die fehlenden jährlichen Werte der Metallkonzentration im Katalysator extrapoliert. Tabelle 126 zeigt die Platinkonzentrationen im relevanten Zeitraum.

Tabelle 126: Platinkonzentrationen in PEMFC im Zeitraum 2012-2020; fehlende Werte interpoliert

Jahr	Platinkonzentration $\frac{g}{kW}$
2012	0,20*
2013	0,19*
2014	0,17*
2015	0,15
2016	0,14*
2017	0,12*
2018	0,10*
2019	0,10*
2020	0,09

*: Interpolierte Werte

Quelle: Mathey J. PLEC 2011

Metallkonzentrationen und Metallmengen in DMFC

Die Direktmethanolbrennstoffzelle lässt sich als Weiterentwicklung der zuvor beschriebenen PEMFC sehen. Auch diese ist mit einer Betriebstemperatur von 60-130 °C den Niedertemperaturzellen zuzuordnen. Im Unterschied zur PEMFC wird Methanol als Protonenspender verwendet (Karamanolis 2003).

Als potenzielle Katalysatormaterialien kommen Platin, Palladium und Ruthenium in unterschiedlichen Zusammensetzungen und Legierungen in Frage. Die Anteile der einzelnen Legierungen an den einzelnen DMFC-Brennstoffzellen sind nicht weiter bekannt. Es existieren lediglich verschiedenste Literaturwerte zu Metallbeladungen der Katalysatoren. Erschwerend kommen unterschiedlichste Ausführungen der Katalysatoren hinzu: So existieren Ansätze zu variierenden Platin- zu Ruthenium-Verhältnissen oder Kryogele bestehend aus Kohlenstoff-Nafion zur Aufbringung von Platin-Ruthenium Katalysatoren (Arbizzani et al. 2006; Gang Shao et al. 2006). Gängige Beladungsdichten liegen bei aktuellen Demonstratorobjekten bei 0,3 mg/cm² Platin (Söhn 2010). Es existieren jedoch wie bereits angesprochen durchaus weitere Legierungs- und Mischungsmöglichkeiten. Platin-Palladium-Mischungen oder weitere Platin-Ruthenium Katalysatoren sind denkbar (Z.Q. Ma, P.C. 2003; Hacquard 2005). Wie in

Tabelle 122 beschrieben, beträgt die kumulierte angenommene installierte Leistung für Direkt-methanol-Brennstoffzellen in Deutschland im Zeitraum 2012 - 2020 unter 2 MW. Geht man von einem identischen Verhältnis von Beladung pro cm^2 im Verhältnis zu Beladung pro MW im Vergleich zu PEMFC aus, beträgt die aktuelle leistungsbezogene Beladungsdichte von Platin etwa $0,2 \frac{\text{g}}{\text{kW}}$ (Mathey J. PLC 2011). Auch bei unterstelltem ausbleibendem weiterem technologischem Fortschritt kumuliert sich die Menge an verbautem Platin bis zum Jahr 2020 auf maximal 400 Gramm. Im Vergleich zur marktbeherrschenden PEMFC und den dort erwartbaren Mengen ist keine signifikante Relevanz bis zum Jahr 2020 gegeben. Auch bedingt durch die hohen Unsicherheiten ist eine detaillierte Materialanalyse aufgelöst auf einzelne Jahre wenig zweckmäßig.

Exporte aus der Nutzungsphase

Da es sich bei allen Brennstoffzellentypen noch um eine zu neue Technologie handelt, sind keine Informationen über etwaige Exporte aus der Nutzungsphase bekannt. Diese wurden daher hier vernachlässigt.

Verweildauer in der Nutzungsphase

Alle Zellentypen müssen aufgrund einer noch nicht vollständig erreichten Industriereife mit gewissen Unsicherheiten bezüglich der anzunehmenden Lebensdauern analysiert werden. Beginnend mit den Solid-Oxide-Fuel-Cells (SOFC) beträgt die mittelfristig geforderte Nutzungsperiode 40.000 Volllaststunden oder 5 Jahre (FZ Jülich 2011; FZ Jülich 2012). Die Firma Hexis geht von einer potenziellen Umsetzung solcher haltbarer Zellen aus. PEMFC als zweiter und wichtigster zu untersuchender Zellentyp weisen heute schon unter optimalen Einsatzbedingungen Lebensdauern von 40.000 Laststunden auf (Bleslet al. 2013). Gleiches ist für DMFC anzunehmen, da diese eine direkte Weiterentwicklung der PEMFC darstellen (Kordes et al. 1996). Insgesamt scheint ein definierter zellenunabhängiger Zielwert von 40.000 h als sinnvolle Abschätzung. Daher wurde für die nachfolgende Produktanalyse eine Lebensdauer von fünf Jahren für jeden Typ untersuchter Zelle angenommen. Dies korreliert mit einem relevanten Bezugszeitraum zwischen 2012 und 2020.

Ergebnisse

Im Folgenden werden für SOFC Brennstoffzellen die in 2020 zu erwartende Mengen an Metallen aus Altgeräten berechnet. PEMFC Brennstoffzellen wurden nicht weiter betrachtet, da die in Verkehr gebrachten Metallmengen zu gering (etwa 0,84 kg Pt in 2012 und 17 kg Pt in 2020) und die entsprechend in 2020 zu erwartenden Mengen zu vernachlässigen sind (0,04 % bezogen auf die aus den anderen analysierten Produkten zu erwartende Menge). Ebenso verhält es sich mit den DMFC-Brennstoffzellen (kumulierte Menge Pt bis 2020 unter 0,4 kg; zu erwartender Rücklauf circa 0,0002 % der Platinmenge aus ReStra-Produkten).

Auf Basis der oben beschriebenen Parameter erfolgte die Bestimmung der in 2020 zu erwartenden Menge an Lanthan und Yttrium aus SOFC. Erhebungen bzgl. der Weibullparameter konnten für Brennstoffzellen nicht gefunden werden. Daher wurden verschiedene Formparameterwerte ($k = 2; 3; 5$) untersucht, die die Spannbreite für sonstige Produkte abdecken. Für die mittlere Verweildauer wurden entsprechend obiger Ausführungen 5 Jahre angenommen.

Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 127 zusammengefasst. Für Yttrium ergab sich eine zu erwartende Menge von 50.186 kg bis 78.152 kg bzw. im Mittel von 63.014 kg. Für Lanthan ergab sich eine Menge von 30.676 kg bis 47.770 kg bzw. im Mittel von 38.517 kg.

Tabelle 127: Mengen strategischer Metalle in 2020 aus Brennstoffzellen (Angaben in kg)

Element	k=2	k=3	k=5	Ø
Y	78.152	60.705	50.186	63.014
La	47.770	37.106	30.676	38.517

5.3.13 Optische Faseranwendungen

Die Produktgruppe optische Faseranwendungen wurde aufgrund ihrer Relevanz für Germanium (20 - 35 % des Germaniumeinsatzes) und Erbium (75 % des Erbiumeinsatzes) ausgewählt.

5.3.13.1 Produktidentifizierung

Germanium wird in Form von Germaniumtetrachlorid (GeCl_4) in optischen Glasfaserkabeln eingesetzt (Umicore Precious Metals Refining 2012). Zwei Arten von optischen Fasern sind hierbei zu nennen:

- Faser für Langstreckenkabel - „single mode stepped-index fiber“ (SMSIF) und
- Faser für Kurzstreckenkabel - „multimode fiber“ (MF).

SMSIF sind Fasern für Langstrecken-Kabel, beispielsweise für weite Überlandstrecken oder Unterseekabel. Diese Kabel übertragen Daten mit sehr hohen Raten (100 Gigabytes pro Sekunde), wobei die Signalstärke von Verstärkern aufrechterhalten wird (alle 50 bis 100 km) (Butterman und Jorgenson 2004). Die zweite Faserart, MF, dient für Transmissionen über kürzere Distanzen, bspw. zwischen zentralen Kommunikationspunkten und Verteilstationen, zwischen großen Bürogebäuden und zur Verbindung innerhalb von LANs.

Erbium kommt in zwei Arten optischer Verstärker zum Einsatz, in Erbium-dotierten Faserverstärkern (erbium-doped fiber amplifizier, EDFA) sowie in Erbium-dotierten Wellenleiterverstärkern

(erbium-doped waveguide amplifier, EDWA). Diese optischen Verstärker kommen auf vielfältige Art zum Einsatz (nach Wittmer et al. 2011b; Becker et al. 1999):

- als Nachverstärker zum Verstärken eines Sendesignals unmittelbar hinter der Laserquelle,
- als Repeater (oder Inline-Verstärker) auf langen Übertragungsstrecken wie z.B. bei der transozeanischen Übertragung sowie
- als Vorverstärker unmittelbar vor einem Detektor.

Grundsätzlich lässt sich also festhalten, dass Erbium-dotierte Faserverstärker im Wesentlichen dazu dienen, Signale breitbandig zu verstärken und die Realisierung langer Übertragungsstrecken mit einer hohen Bandbreite zu ermöglichen.

Für die weitere Analyse ergaben sich also optische Kurz- und Langstreckenkabel (SMSIF und MF) sowie die dazugehörigen Erbium-dotierten Faserverstärker als Produkte. In Absprache mit dem Umweltbundesamt fand hierbei eine Beschränkung auf optische Telekommunikationsinfrastruktur im öffentlichen Raum statt. Bezüglich der Telekommunikationsinfrastruktur innerhalb von Gebäuden erfolgte lediglich eine Grobabschätzung der Mengenrelevanz.

5.3.13.2 Produktanalyse

Im Bereich der optischen Faseranwendungen ist entsprechend der Produktidentifizierung Germanium, welches als Dotierungselement in Glasfaserkabel eingesetzt wird, sowie Erbium in optischen Verstärkern von Relevanz. Wie erwähnt, lag der Schwerpunkt der Untersuchung auf der Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum, den Metro-Backbones bzw. Metropolitan Area Networks (MAN) und Metro-Zugangsnetzen. Hier werden ausschließlich SMSIF Kabel eingesetzt. Bzgl. der innerhalb von Gebäuden vorhandenen Glasfaserinfrastruktur (betrifft MF Kabel) erfolgte in Absprache mit dem Umweltbundesamt eine eingeschränkte Betrachtung, welche den Bestand in der Infrastruktur von Rechenzentren auf Basis einer UBA-Publikation (Hintemann und Fichter 2010) untersucht.

Glasfaserkabel, die optische Lichtwellenleiter sind, weisen neben höheren erreichbaren Übertragungsraten gegenüber elektrischen Systemen noch weitere Vorteile wie geringere Dämpfung, niedrigeres Gewicht, Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen, höhere Abhörsicherheit und einen preiswerteren Rohstoff (Quarzsand) auf (Hering und Martin 2006).

Optische Verstärker werden im City-Glasfasernetz ab einer Entfernung von etwa 80 km benötigt. Meist befindet sich innerhalb dieser Distanz bereits ein Technikstandort, der eine Unterbrechung des Netzes darstellt, weshalb kein Einsatz von Verstärkern erforderlich ist (Stelter 2013). Jedoch werden optische Verstärker bei der Verteilung und Übertragung von Fernsehsignalen eingesetzt. Auf 64 Kunden kommt hier ein Verstärker (Stelter 2013).

In Verkehr gebrachte Mengen

Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum

Die Verlegung von Glasfaserkabeln in der Telekommunikationsinfrastruktur fand in Deutschland fast von Beginn an in Leerrohren/Kabelschutzrohren statt, um einen leichteren Austausch zu gewährleisten und den Schutz vor bspw. vor Witterungseinflüssen und Nagetieren zu erhöhen (Stelter 2013).

Die Telekom beziffert die Länge ihres Glasfasernetzes für 2005 auf 206.300 km (Scharp 2011), wobei dies die o. g. Metro-Backbones, MAN und Metro-Zugangsnetze umfasst. Der Marktanteil

der Telekom im Bereich wurde von Experten auf maximal 50 % geschätzt (Scharp 2011). Darauf aufbauend lässt sich die gesamte Länge des Glasfasernetzes in Deutschland in 2005 grob auf mindestens 412.600 km abschätzen. Bezüglich des jährlichen Ausbaus für die einzelnen Jahre lagen keine Angaben vor. Laut einer Experteneinschätzung fand der Ausbau in Deutschland schwerpunktmäßig in den Jahren 1998 bis 2006 statt (Stelter 2013). Der Ausbau lässt sich weiterhin in folgende Phasen gliedern:

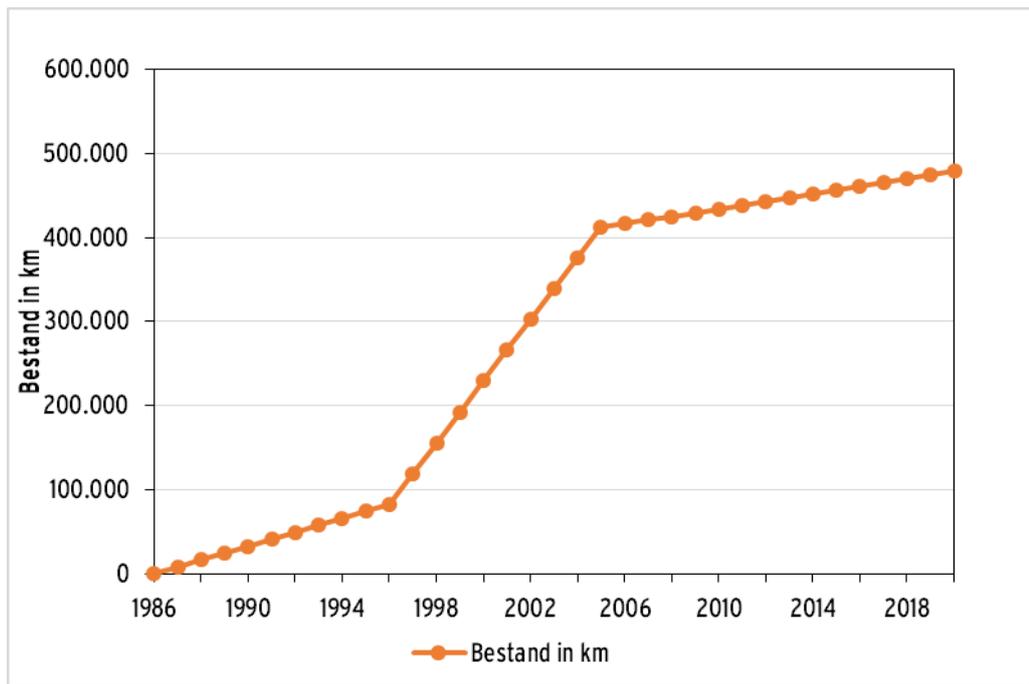
- seit 1987: Bau von Glasfaser Punkt zu Punkt Verbindungen zwischen Städten,
- 1997 bis 2001: Boom-Phase des Ausbaus von Backbone-Netzen in Europa („neuer Markt“),
- bis 2006: weitgehender Abschluss des Ausbaus der City-Netze (Backbones),
- ab 2006: Beginn Ausbau im Bereich FTTH (Fiber-to-the-home).

Hierauf aufbauend wird angenommen, dass 80 % des Bestandes von 2005 in den Jahren 1997 bis 2005, welche die Boom-Phase und die Zeit danach bis zum Abschluss des Ausbaus der City-Netze darstellen, installiert wurden. Davor wird ebenfalls ein lineares Wachstum für die Jahre 1987 bis einschließlich 1996 angenommen. Ab 2006 lässt sich eine deutliche Reduzierung des Ausbaus feststellen (Stelter 2013). Als eine grobe Abschätzung wurde hier ein weiteres lineares Wachstum um jährlich 1 % des Bestandes von 2005 angenommen, wobei der Einfluss dieser Abschätzung auf die Bestimmung der Abfallmengen in 2020 aufgrund der hohen Verweildauer der Kabel in der Nutzungsphase als ausgesprochen gering zu bewerten ist. Die angenommene Bestandsentwicklung ist in Tabelle 128 sowie Abbildung. 29 dargestellt.

Tabelle 128: Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum

Jahr	Bestand in km	Jahr	Bestand in km
1986	0	2004	375.924
1987	8.252	2005	412.600
1988	16.504	2006	416.726
1989	24.756	2007	420.852
1990	33.008	2008	424.978
1991	41.260	2009	429.104
1992	49.512	2010	433.230
1993	57.764	2011	437.356
1994	66.016	2012	441.482
1995	74.268	2013	445.608
1996	82.520	2014	449.734
1997	119.195	2015	453.860
1998	155.871	2016	457.986
1999	192.546	2017	462.112
2000	229.222	2018	466.238
2001	265.897	2019	470.364
2002	302.573	2020	474.490
2003	339.248		

Abbildung. 29: Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum



Aus der Bestandsentwicklung wurden als Kombination von Bestandszuwachs und Austausch bestehender Infrastruktur die in Verkehr gebrachten Mengen abgeleitet. Der Bedarf für den Austausch errechnet sich aus der Weibullverteilung. In Tabelle 129 sind die Mengen dargestellt, die sich für die Referenz-Verweildauer von 50 Jahren (siehe Abschnitt Verweildauer) und einen Formparameter von 1,7 (NIES 2010) ergaben.

Tabelle 129: Inverkehrbringung Glasfaserinfrastruktur im öffentlichen Raum

Jahr	iVgM in km	Jahr	iVgM in km
1987	8.252	2004	38.249
1988	8.252	2005	38.535
1989	8.261	2006	6.294
1990	8.281	2007	6.623
1991	8.309	2008	6.937
1992	8.344	2009	7.227
1993	8.387	2010	7.503
1994	8.435	2011	7.766
1995	8.490	2012	8.019
1996	8.549	2013	8.264
1997	37.038	2014	8.501
1998	37.108	2015	8.732
1999	37.213	2016	8.955
2000	37.360	2017	9.173
2001	37.540	2018	9.385
2002	37.750	2019	9.592
2003	37.987	2020	9.793

Glasfaserinfrastruktur in Rechenzentren

Bezüglich der Glasfaserinfrastruktur in Rechenzentren liegen in einer UBA-Publikation (Hintemann und Fichter 2010) Daten vor, die sich auf die Länge der installierten Glasfaserkabel beziehen. Hier werden in Abhängigkeit von der Größe des Rechenzentrums folgende Angaben zur Kabellänge gemacht (Hintemann und Fichter 2010):

- Große Rechenzentren: \varnothing 120.000 m
- Mittlere Rechenzentren: \varnothing 12.000 m
- Kleine Rechenzentren: \varnothing 1.500 m
- Serverraum: \varnothing 5 % Glasfaserkabel von 180 m Kabeln insgesamt

In Verbindung mit den Daten zum Bestand an Rechenzentren in Deutschland (siehe 5.3.20) wurden die Mengen des Gesamtbestands an Glasfaserkabeln in Deutschland bestimmt. Die hieraus resultierenden Mengen sind in Tabelle 130 dargestellt.

Tabelle 130: Anzahl von Rechenzentren in 2008 und resultierender Bestand an Glasfaserinfrastruktur

Rechenzentrumstyp	Anzahl Rechenzentren	Glasfaserkabel pro Rechenzentrum [m]	Gesamtbestand Glasfaserkabel [km]
Serverschrank	33.000	-	-
Serverraum	18.000	9	162
Kleines Rechenzentrum	1.750	1.500	2.625
Mittleres Rechenzentrum	370	12.000	4.440
Großes Rechenzentrum	50	120.000	6.000
Gesamt	53.170		13.227

Quelle: Hintemann und Fichter 2010 und eigene Berechnungen

Für die zukünftige Entwicklung wurden analog zum Vorgehen bei der Analyse strategischer Metalle in Rechenzentren (vgl. 5.3.20 sowie Hintemann und Fichter 2010) zwei Szenarien zu Grunde gelegt, ein „business as usual“-Szenario sowie ein „Green-IT“-Szenario. Für das Jahr 2015 ergab sich aus den beiden Szenarien der in

Tabelle 131 dargestellte Bestand an verschiedenen Typen von Rechenzentren. Für die Jahre zwischen 2008 und 2015 bzw. 2016 bis 2020 wurde ein exponentielles Wachstum angenommen. Die angenommenen Wachstumsraten basieren dabei auf den Angaben aus Hintemann und Fichter (2010) und sind für jeden Rechenzentrumstyp und die beiden untersuchten Szenarien unterschiedlich (s.

Tabelle 131).

Hieraus ergab sich in Verbindung der notwendigen Glasfaserinfrastruktur für die beiden Szenarien die in Tabelle 132 und Abbildung 30 dargestellte Entwicklung des Gesamtbestandes an Glasfaserinfrastruktur in Rechenzentren.

Tabelle 131: Szenarien zur Entwicklung der Rechenzentrumsstruktur

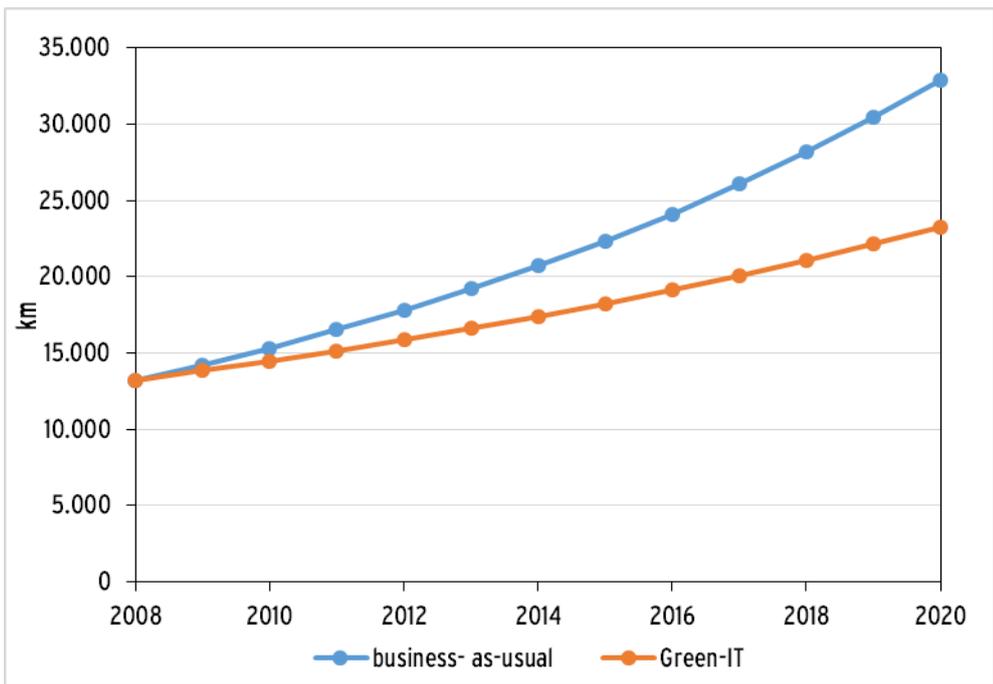
Rechenzentrums- typ	Anzahl Re- chenzentren (2008)	Anzahl Rechenzentren (2015) („Business as usual“)	Jährliche Wachstums- rate	Anzahl Rechenzen- tren (2015) („Green-IT“)	Jährliche Wachstums- rate
Serverschrank	33.000	34.000	1,00	27.000	0,97
Serverraum	18.000	17.000	0,99	14.000	0,96
Kleines Rechen- zentrum	1.750	2.150	1,03	1.750	1,00
Mittleres Rechen- zentrum	370	680	1,09	540	1,06
Großes Rechen- zentrum	50	90	1,09	75	1,06
Gesamt	53.170				

Quelle: Hintemann und Fichter 2010

Tabelle 132: Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur in Rechenzentren

Jahr	Business-as-usual [km]	Green-IT [km]
2008	13.227	13.227
2009	14.232	13.825
2010	15.323	14.459
2011	16.507	15.130
2012	17.791	15.840
2013	19.184	16.592
2014	20.696	17.388
2015	22.338	18.231
2016	24.120	19.122
2017	26.055	20.066
2018	28.157	21.065
2019	30.440	22.123
2020	32.920	23.242

Abbildung 30: Bestandsentwicklung Glasfaserinfrastruktur in Rechenzentren



Die in Verkehr gebrachten Mengen von Glasfaserkabeln in Rechenzentren ergeben sich zum einen aus dem Zuwachs, zum anderen aus dem Ersatz bestehender Infrastruktur. Hierfür wurde für das Jahr 2008 eine homogene Altersstruktur angenommen. Zusätzlich wurden der Zuwachs als Differenz zum Vorjahr und dessen Austausch anhand der Weibullverteilung berechnet. Unter Annahme einer Verweildauer von 14,6 Jahren (siehe Abschnitt *Verweildauer*) und einem Formparameter von $k = 1,7$ (NIES 2010) ergaben sich die in Tabelle 133 dargestellten in Verkehr gebrachten Mengen für die beiden Szenarien.

Tabelle 133: In Verkehr gebrachte Mengen Glasfaserkabel in Rechenzentren

Jahr	„Business-as-usual“ [km]	„Green-IT“ [km]
2008	826	826
2009	1.831	1.423
2010	1.915	1.458
2011	2.015	1.500
2012	2.135	1.550
2013	2.273	1.608
2014	2.430	1.674
2015	2.606	1.747
2016	2.802	1.825
2017	3.019	1.912
2018	3.258	2.006
2019	3.521	2.107
2020	3.809	2.215

Optische Verstärker

Der Einsatz von EDFA und EDWA spielt für das untersuchte Glasfasernetz in Deutschland nach Experteneinschätzung keine Rolle. Wohl aber kommen EDFA in der Verteilung von Fernsehsignalen zum Einsatz, wo ein EDFA auf 64 Fernsehanschlüsse kommt (Stelter 2013). Entsprechend wird der Bestand an EDFAs anhand der Zahl der Fernsehanschlüsse abgeschätzt. In Tabelle 134 ist der Bestand an Fernsehanschlüssen für drei Jahre, 1998, 2003 und 2008 dargestellt.

Tabelle 134: Kabelanschlüsse und entsprechende optische Verstärker

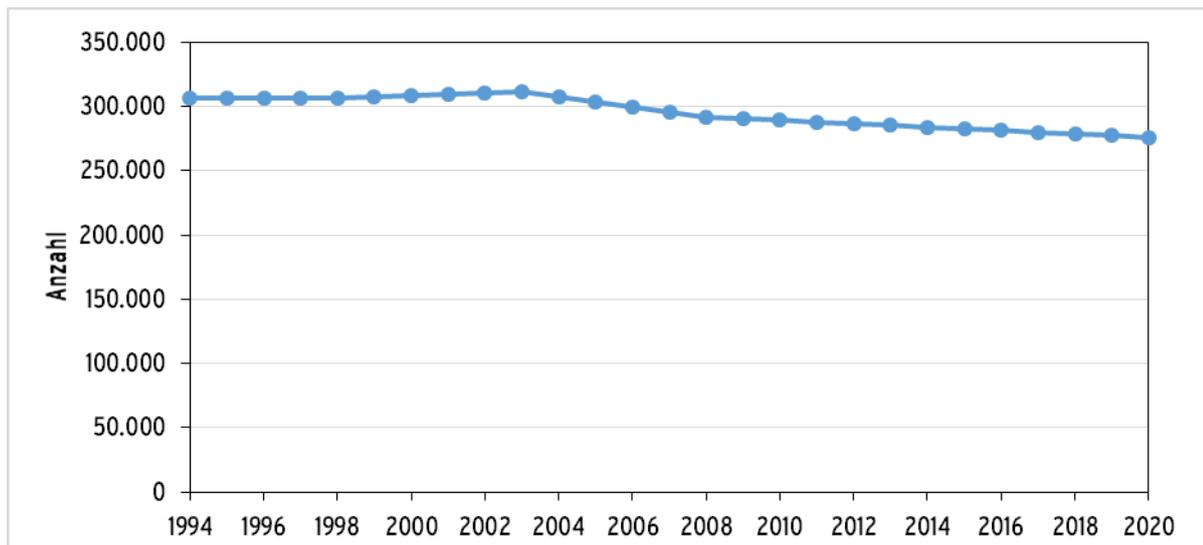
Jahr	1998	2003	2008
Erfasste Haushalte	68.863	59.713	58.984
Hochgerechnete Haushalte (1000)	36.703	37.391	39.077
davon Kabelanschluss	19.587	19.965	18.693
Anzahl optischer Verstärker	306.047	311.953	292.078

Hieraus ergab sich der entsprechende Bestand an optischen Verstärkern in den jeweiligen Jahren. Für die dazwischen liegenden Jahre wurde eine lineare Bestandsentwicklung angenommen. Für die Jahre von 2008 bis 2020 wurde eine Fortschreibung des zehnjährigen Trends von 1998 bis 2008 angenommen. Für die Jahre vor 1998, welche aufgrund der Verweildauer von 15 Jahren nur von geringer Relevanz in Bezug auf 2020 sind, wurde ein konstanter Bestand und entsprechend eine homogene Altersstruktur angenommen. Die hieraus resultierende Bestandsentwicklung ist in Tabelle 135 sowie Abbildung 31 dargestellt.

Tabelle 135: Bestandsentwicklung optischer Verstärker

Jahr	Anzahl optische Verstärker	Jahr	Anzahl optische Verstärker
1994	306.047	2008	292.078
1995	306.047	2009	290.717
1996	306.047	2010	289.362
1997	306.047	2011	288.013
1998	306.047	2012	286.671
1999	307.219	2013	285.334
2000	308.396	2014	284.005
2001	309.577	2015	282.681
2002	310.763	2016	281.363
2003	311.953	2017	280.052
2004	307.873	2018	278.747
2005	303.846	2019	277.447
2006	299.871	2020	276.154
2007	295.949		

Abbildung 31: Bestandsentwicklung optischer Verstärker



Die in Verkehr gebrachte Menge in jedem Jahr ergab sich aus dem Ersatz des Bestandes von 1998, für den eine homogene Altersstruktur angenommen wurde, und ggf. dem Zuwachs, wobei nur in wenigen Jahren ein wachsender Bestand festzustellen war. In Jahren mit einem Rückgang der Anschlüsse wurden Ersatz und Rückbau miteinander verrechnet. Für eine Verweildauer von 15 Jahren (siehe Abschnitt unten zu Verweildauern) und einen Formparameter von $k = 2,25$ (NIES 2010) ergaben sich die in Tabelle 136 dargestellten in Verkehr gebrachten Mengen.

Tabelle 136: In Verkehr gebrachte Mengen EDFA für Kabelanschlüsse

Jahr	In Verkehr gebrachte Mengen	Jahr	In Verkehr gebrachte Mengen
1998	21.468	2010	18.710
1999	22.584	2011	18.619
2000	22.475	2012	18.529
2001	22.334	2013	18.439
2002	22.183	2014	18.346
2003	22.039	2015	18.250
2004	16.639	2016	18.150
2005	16.573	2017	18.047
2006	16.512	2018	17.942
2007	16.456	2019	17.835
2008	16.402	2020	17.729
2009	18.806		

Metallkonzentration im Produkt

In Glasfaserkabeln dient die Germaniumdotierung dazu, den Brechungsindex der Fasern (SiO_2) zu erhöhen. Es gibt im Wesentlichen zwei Fasertypen: Single-mode-Fasern mit 9 μm Kerndurchmesser sowie Multi-mode-Fasern mit 50 μm Kerndurchmesser (Oberschmidt 2012). Erstgenannte Art wird in erster Linie für lange Strecken verwendet, die andere Art wird seit kurzem für FTTH in Städten (Oberschmidt 2012) sowie für Anwendungen bspw. in Rechenzentren verwendet. Ähnliche Angaben finden sich in Angerer et al. (2009), wo ein Durchmesser für Multi-Mode-Fasern von typischerweise 50 bis 100 μm und für Single-mode-Fasern von 8,3 bis 10 μm angegeben wird.

Bei den Einmodenstufenindexfasern mit 9 µm Kerndurchmesser wiegen 1 km bzw. 1.000 m weniger als 0,2 g (ausgehend von einer Dichte des Materials (SiO₂) von 2.500 kg/m³, ergibt sich für 1.000 m Faser eine Masse von 0,15 g). Der GeO₂-Anteil beträgt hier nur wenige Prozent (Oberschmidt 2012), was einer GeO₂-Menge von 3 bis 8 mg pro km bzw. 2 bis 5,5 mg Ge pro km entspricht. Die Anzahl der Fasern pro Kabel variiert und kann bis zu 192 Fasern pro Kabel betragen. Im Durchschnitt kann nach Experteneinschätzung jedoch davon ausgegangen werden, dass durchschnittlich 72 Fasern in einem Kabel enthalten sind (Stelter 2013). Bezogen auf ein (Einmoden-) Glasfaserkabel ergaben sich folglich Mengen von 144 bis 396 mg/km bzw. im Mittel 270 mg/km. Der so ermittelte Wert für Einmodenstufenindexfasern deckte sich mit Angaben von 313 mg/km aus Angerer et al. (2009). Dieser bezieht sich auf den Verbrauch für Glasfaserkabel (im Gegensatz zur tatsächlichen Menge im Produkt) und liegt somit noch etwas über dem ermittelten Wert von 270 mg/km. Bei Multi-Mode-Fasern liegt die Menge pro Faser aufgrund des höheren Querschnitts mit 11 bis 30 mg Ge pro Kilometer entsprechend höher (Oberschmidt 2012). Die Glasfaserkabel in der gebäudeinternen Anwendung weisen i.d.R. jedoch nur etwa 2 Fasern auf (LEONI 2011; Stelter 2013). Es ergab sich folglich eine Menge von 22 bis 60 mg pro Kabelkilometer bzw. im Mittel von 41 mg/km.

Der Erbiumgehalt in EDFA ergab sich ebenfalls aus der Dotierung der enthaltenen Fasern. Ein EDFA hat einige 10 m Erbium-dotierte Fasern, der Durchmesser des Kerns beträgt etwa 2 µm. Die Erbium-Dotierung ist ca. 10²⁴/m³. Auf dieser Basis kann das Gewicht des verbauten Erbiums pro EDFA abgeschätzt werden (Oberschmidt 2012). Pro EDFA ergaben sich maximal 0,2 µm Erbium (Oberschmidt 2012).

Exporte aus der Nutzungsphase

Bzgl. Exporten aus der Nutzungsphase zeigte es keine Anzeichen für eine Mengenrelevanz. Diese Einschätzung wurde von den befragten Experten bestätigt.

Verweildauer

Die optischen Glasfaserkabel der öffentlichen Telekommunikationsinfrastruktur werden als Kabel/Leitungen eingegraben. Laut Expertenauskunft und Literaturangaben werden für Glasfaserkabel allgemein 30, teilweise auch 40 Jahre als Lebensdauer angesetzt (Stelter 2013; FTTH Council 2013; Fischer 2008). Bzgl. der tatsächlichen Nutzungsdauer fehlen bisher noch ausreichend Informationen, nach Experteneinschätzungen ist jedoch von deutlich höheren, mindestens von einer zu Kupferkabeln vergleichbaren Verweildauer auszugehen. Diese werden teilweise 50 Jahre und länger genutzt, auch Nutzungsdauern von bis zu 100 Jahren erscheinen bei Glasfaserkabeln möglich (Oberschmidt 2012; Stelter 2013). Hierauf basierend wurden 50 Jahre als Referenzwert für die Berechnung angenommen. Die Einflüsse einer Variation der Verweildauer (30 Jahre, 60 Jahre) wurden ebenfalls untersucht. Es bleibt anzumerken, dass es bisher kaum vorkommt, dass Glasfaserkabel tatsächlich aus dem Boden entfernt werden. Da die Kabel jedoch meist in Leerrohren verlegt werden, kann es durchaus wahrscheinlich sein, dass sie nach einigen Jahrzehnten Nutzung wieder entfernt werden (Oberschmidt 2012).

Anders stellt sich die Situation für Glasfaserkabel in Rechenzentren dar. Hier ist es unklar, inwieweit es mit Ablauf der Verweildauer des Rechenzentrums von 5,5 Jahren zu einem Austausch der zugehörigen Glasfasern kommt und inwieweit diese wiederverwendet werden. Hier wurde Bezug nehmend auf Daten aus (NIES 2010) („optical fiber cable“) eine Verweildauer der Glasfaserkabel aus Rechenzentren von 14,6 Jahren angenommen.

EDFAs und EDWAs werden etwa 5 - 10 Jahre beim Erstbenutzer sowie bis zu genauso lange beim Zweitnutzer betrieben (Oberschmidt 2012). Es ergab sich also eine Verweildauer in der Nutzungsphase von etwa 10 - 20 Jahren, wobei für die Berechnung ein mittlerer Wert von 15 Jahren angenommen wurde.

Ergebnisse

Entsprechend der obigen Ausführungen wurde für die Glasfaserkabel im öffentlichen Raum/Telekommunikationsinfrastruktur eine mittlere Verweildauer von 50 Jahren angenommen. Als Formparameter wird in NIES (2010) für optische Faserkabel ein Wert von $k = 1,7$ angegeben, der hier ebenfalls verwendet wurde. Die hieraus resultierenden Germaniummengen in 2020 sind in Tabelle 137 dargestellt. Die Tabelle zeigt ebenfalls den Einfluss einer abweichenden Verweildauer. Es ergab sich eine zu erwartende Germaniummenge in 2020 von 1,64 kg. Bei einer Variation der Verweildauer erhöht sich diese Menge auf 3,41 kg bzw. reduziert sich auf 1,24 kg.

Tabelle 137: Germaniummenge aus Glaserfaserkabeln (Telekommunikationsinfrastruktur) in 2020 (Angaben in kg)

Element	Verweildauer 50 Jahre	Verweildauer 30 Jahre	Verweildauer 60 Jahre
Ge	1,64	3,41	1,24

Für Glasfaserkabel in Rechenzentren wurde wie oben beschrieben eine Verweildauer von 14,6 Jahren sowie ebenfalls ein Formparameter von $k = 1,7$ angenommen. Bzgl. der zukünftigen Entwicklung wurden die beiden Szenarien „business-as-usual“ und „Green IT“ untersucht. Es ergaben sich zu erwartende Mengen von rund 25 g Germanium in 2020 im „business-as-usual“ Szenario und 17 g im „Green IT“ Szenario (siehe Tabelle 138).

Tabelle 138: Germaniummenge in 2020 aus Glasfaserkabeln in Rechenzentren (Angaben in g)

Element	Business-as-usual	Green-IT
Ge	25,2	16,7

Für EDFA und EDWA konnten in der Literatur keine speziellen Weibullparameter gefunden werden. Daher wurden Werte ähnlicher Produkte herangezogen, die in NIES (2010) verfügbar sind. Hier finden sich folgende Werte für den Formparameter:

- „digital transmission equipment“: $k = 1,92$
- „electric wires and cables“: $k = 2,67$
- “other computer peripheral equipment”: $k = 1,88$
- “optical fibres and cables”: $k = 1,7$
- “wired communication equipment”: $k = 2,82$

Es zeigte sich, dass die Werte sich zwischen 1,7 und 2,8 bewegen. Für die Untersuchung wurde ein mittlerer Wert von 2,25 verwendet, wobei auch der Einfluss einer Variation des Formparameters untersucht wird. Als Verweildauer wurden entsprechend der obigen Ausführungen 15 Jahre angenommen. Er ergab sich eine zu erwartende Erbiummenge von 3,7 mg in 2020 bzw. bei einer Variation des Formparameters von zwischen 3,5 und 3,8 mg (siehe Tabelle 139).

Tabelle 139: Erbiummenge in 2020 aus EDFA (Angaben in mg)

Element	k=2,25	k=1,7	k=2,8
Er	3,73	3,55	3,81

5.3.14 Photovoltaik

Die Produktgruppe Photovoltaikzellen wurde aufgrund ihrer Relevanz für Gallium, Indium und Germanium ausgewählt.

5.3.14.1 Produktidentifizierung

Die genannten Metalle kommen in Dünnschicht-PV-Zellen zum Einsatz, in Cl(G)S- , CdTe- , a-Si(Ge)- und GaAs- Zellen. Eine Mengenrelevanz bzgl. der untersuchten strategischen Metalle wurde sich bei ClGS- , CdTe- und a-Si- Zellen festgestellt.

Galliumarsenid (GaAs-) Zellen weisen zwar den höchsten Wirkungsgrad unter PV-Zellen auf, sind allerdings aufgrund der aufwendigen Herstellung äußerst kostenintensiv, sodass sie nahezu keinen Einsatz finden und sich selbst für Weltraumanwendungen nicht durchsetzen konnten (Falk 2006; Angerer et al. 2009). Für die Energieerzeugung hat diese Technologie keine Relevanz, was sich in den entsprechenden Statistiken widerspiegelt (PHOTON 2012). Von einer Mengenrelevanz für die betroffenen strategischen Metalle (Gallium, Germanium) ist für das Jahr 2020 nicht auszugehen. Eine nähere Analyse dieser Technologie fand daher nicht statt.

a-Si Zellen weisen Indiumgehalte in Form von Indium-Zinnoxid (ITO/TCO) auf. In bestehenden Untersuchungen bzgl. strategischer Metalle in Energietechnologien findet dies bis auf eine Ausnahme (Moss et al. 2011) jedoch keine Berücksichtigung. Dennoch erfolgt im Rahmen der Produktanalyse eine nähere Betrachtung bzgl. der Indiummenge. a-SiGe- Zellen, Siliciumzellen mit Germaniumzusatz, an deren Entwicklung bereits seit einiger Zeit gearbeitet wird (siehe Photovoltaics Bulletin 2003), weisen zwar ein großes Potenzial auf, spielen derzeit jedoch noch keine Rolle (vgl. Sander et al. 2007; PHOTON 2012). Hier besteht noch Forschungsbedarf der betroffenen Zelltypen (dual-junction, triple-junction Zellen) insbesondere bezüglich der Betriebsstabilität; derzeit kommt es teilweise noch zu Reduzierungen der Leistung von 50 % innerhalb der ersten 100 Betriebsstunden (Kazmerski 2006).

Als zu analysierende Produkte ergaben sich daher ClGS- , CdTe- und a-Si- Zellen, deren Anteil an der jährlich installierten PV-Leistung sich von 2001 auf 2011 um einen Faktor 11 (CdTe) bzw. 12 (ClGS) erhöht hat (vgl. PHOTON 2012) bzw. sich bei a-Si etwas reduziert hat (8,9 % in 2001, 5 % in 2010, 3,4 % in 2011; PHOTON 2012).

5.3.14.2 Produktanalyse

Photovoltaik bedeutet die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom mit Hilfe von Solarzellen unter Ausnutzung des physikalischen Photoeffekts. Durch die Absorption von Licht (Photonen) wird in einem Halbleiter eine elektrische Spannung aufgebaut (Stollwerk 2001). Photovoltaikzellen lassen sich unterscheiden in Dickschichtzellen (monokristalline Siliciumwafer, multikristalline Siliciumwafer) und Dünnschichtzellen. Bei Dünnschichtzellen wird eine extrem dünne Schicht aktiven Materials auf ein Trägermaterial (Glas, Stahl, Kunststoff) aufgebracht, was Material- und Kostenvorteile mit sich bringt und einen flexibleren Einsatz ermöglicht (vgl. bspw. El Chaar et al. 2011). Hier relevant sind ClGS , CdTe und a-Si Dünnschichtzellen. (Herleitung siehe unten).

CIGS- (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid, auch Chalcopyrit genannt) Zellen stellen eine Mischung von CIS (Kupfer-Indium-di-Selenid) und CGS (Kupfer-Gallium-Diselenid) dar. Die chemische Formel von CIGS ist $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$. Der x Wert kann hier Werte zwischen 0 und 1 annehmen (vgl. Speirs et al. 2011) und gibt das Verhältnis von CIS zu CGS an. Wenn $x = 1$, handelt es sich um reines CIS, bei $x = 0$ um pures CGS. Auf dem Markt sind Zellen mit unterschiedlichen Anteilen an Gallium erhältlich. Neben den Zellen mit Selen gibt es die Schwefelverbindung CuInS_2 , die gar keinen Galliumanteil aufweist.

Bei CdTe (Cadmiumtellurid) -Zellen wird eine Schicht CdTe mit CdS kombiniert. Zusätzlich wird als TCO (transparent conductive oxide) indiumdotiertes Zinnoxid eingesetzt, wodurch sich die Relevanz für die weitere Analyse ergibt. CdTe-Zellen stellen derzeit unter den Dünnschichttechnologien die Verbreitetste dar.

a-Si-Solarzellen stellen die neben CdTe dominierende Dünnschichttechnologie dar (vgl. PHOTON 2012; Sander et al. 2007), auch wenn CdTe-Zellen in den letzten Jahren deutliche Zuwächse zu verzeichnen hatten. Wie bei CdTe-Zellen ergibt sich hier die Relevanz aus dem Einsatz von indiumdotiertem Zinnoxid (ITO) als TCO, wobei wie in der Produktidentifizierung erwähnt die Datenlage bzgl. der Metallkonzentration im Produkt vergleichsweise schlecht ist.

In Verkehr gebrachte Mengen

Für die Bestimmung der in Verkehr gebrachten Mengen wurden zunächst die Statistiken des BMU zur installierten Leistung erneuerbarer Energien herangezogen (BMU 2012a). Anhand dieser kann die jährlich installierte Photovoltaikleistung für die Jahre 1991 bis 2011 bestimmt werden. Die folgenden Jahre (2011 bis 2020) sind aufgrund der langen Nutzungsdauer von Photovoltaikmodulen für die Bestimmung der im Jahr 2020 anfallenden Mengen strategischer Metalle aus Photovoltaikzellen nur von geringer Bedeutung. Dennoch sind Annahmen über die in Verkehr gebrachten Mengen erforderlich. Hierzu wurde das Szenario 2011A der Leitstudie 2011 herangezogen (BMU 2012b). Hier wird von einem jährlichen Zubau zwischen 2.500 und 3.500 MW ausgegangen. Für 2015 wird eine installierte Leistung von 38.515 MW, für 2020 53.500 MW angenommen. Eine Übersicht der Werte für die jährlich installierte PV-Leistung von 1991 bis 2020 beinhaltet Tabelle 140. Für die weitere Analyse wurde die installierte Leistung pro Zelltyp benötigt, also die jährlich installierte Leistung an a-Si-, CIGS- und CdTe-Zellen. Hierfür wurden Statistiken zu den weltweiten Anteilen der verschiedenen Modultypen für die Jahre 2001 bis 2011 herangezogen (PHOTON 2012). Für Europa oder Deutschland liegen vergleichbare Daten nicht vor. Für die Jahre 2012 bis 2020 wurden die Anteile auf Grundlage von Angaben des JRC fortgeschrieben. Hier wurde ein Szenario angenommen, welches von einem Fortbestand der Dominanz von siliciumbasierten Zellen ausgeht (Moss et al. 2011). Für die Jahre vor 2001 fehlen Angaben zu den Anteilen von CIGS-, CdTe- und a-Si-Zellen, wobei sie in den genannten Jahren bei CIGS und CdTe jedoch als vernachlässigbar eingestuft werden können. Der Anteil von CdTe-Modulen lag auch in den Jahren 2001 und 2002 bei 0,5 bzw. 0,7 %. Der Anteil von CIGS-Modulen lag von 2001 bis 2007 stets unter 0,6 % und stieg erst ab 2008 auf 1 % an. Die erste Markteinführung von CIGS-Modulen hat 1998 stattgefunden (Papathanasiou 2012), wobei andere Quellen für CIGS und CdTe von einer Markteinführung im Jahr 2001 sprechen (Köntges 2002). Für die Jahre 1997 bis 2001 wurde daher ein linearer Anstieg von 0 auf 0,2 % angenommen. Bei CdTe ist eine breite Markteinführung von Modulen in etwa zur selben Zeit festzustellen (vgl. Köntges (2002); Bätzner (2008)); hier wurde ebenfalls ein linearer Anstieg vom Jahr 1997 an angenommen.

Schwieriger stellte sich die Datenlage bei a-Si-Zellen dar. Für die Jahre 2001 bis 2011 lagen jährliche Angaben zum Anteil dieser Technologie weltweit vor. Für die Jahre davor wurde auf Daten

der European Photovoltaic Industry Association (EPIA) zurückgegriffen (EPIA 2011). Hier waren Angaben zu den Marktanteilen von a-Si ab 1980 in Fünfjahresschritten verfügbar. Für die Jahre dazwischen fand eine lineare Extrapolation statt. Wie bei CdTe und CIGS wurden die Marktanteile der Technologie mit der in Deutschland installierten PV-Leistung kombiniert. Hierfür lagen Daten bis 1990 rückwirkend vor (BMU 2012a). In 1990 betrug die installierte PV-Leistung in Deutschland 0,6 MW. Für die fehlenden Jahre davor wurde ein jährlicher Ausbau um 0,1 MW angenommen.

Eine Übersicht der Werte findet sich in Tabelle 140.

Tabelle 140: Jährlich installierte PV-Leistung, CIGS, CdTe und a-Si Anteile

Jahr	Installierte PV Leistung [MW/a]	CIGS [%]	CIGS [MW]	CdTe [%]	CdTe [MW]	a-Si [%]	a-Si [MW]
1987	0,1					24,60%	0,0246
1988	0,1					25,40%	0,0254
1989	0,1					26,20%	0,0262
1990	0,1					27,00%	0,027
1991	1,4					24,00%	0,336
1992	1					21,00%	0,21
1993	2					18,00%	0,36
1994	1					15,00%	0,15
1995	2					12,00%	0,24
1996	3					12,08%	0,36225
1997	7					12,15%	0,8505
1998	5	0,05%	0,003	0,13%	0,0063	12,23%	0,61125
1999	9	0,10%	0,009	0,25%	0,0225	12,30%	1,107
2000	44	0,15%	0,066	0,38%	0,165	9,60%	4,224
2001	110	0,20%	0,22	0,50%	0,55	8,90%	9,79
2002	110	0,20%	0,22	0,70%	0,77	6,40%	7,04
2003	139	0,60%	0,83	1,10%	1,5	4,50%	6,255
2004	670	0,40%	2,7	1,10%	7,37	4,40%	29,48
2005	951	0,20%	1,9	1,40%	13,3	4,70%	44,697
2006	843	0,20%	1,7	2,70%	22,8	4,70%	39,621
2007	1.271	0,50%	6,4	4,70%	59,7	5,20%	66,092
2008	1.950	1,00%	19,5	6,40%	124,8	5,10%	99,45
2009	4.446	1,70%	75,6	9,00%	400,1	6,10%	271,206
2010	6.988	1,60%	111,8	5,30%	370,4	5,00%	349,4
2011	7.485	2,40%	179,6	5,50%	411,7	3,40%	254,49
2012	3.780	2,69%	101,6	5,44%	205,8	4,30%	162,54
2013	3.399	2,98%	101,2	5,39%	183,2	5,20%	176,748
2014	3.199	3,27%	104,5	5,33%	170,6	6,10%	195,139
2015	3.098	3,56%	110,2	5,28%	163,5	7,00%	216,86
2016	3.009	3,84%	115,7	5,22%	157,1	7,20%	216,648
2017	2.997	4,13%	123,9	5,17%	154,8	7,40%	221,778

Jahr	Installierte PV Leistung [MW/a]	CIGS [%]	CIGS [MW]	CdTe [%]	CdTe [MW]	a-Si [%]	a-Si [MW]
2018	2.994	4,42%	132,4	5,11%	153,0	7,60%	227,544
2019	2.994	4,71%	141,1	5,06%	151,4	7,80%	233,532
2020	2.991	5,00%	149,6	5,00%	149,6	8,00%	239,28

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf BMU 2012b; PHOTON 2012; Moss et al. 2011

Metallkonzentration im Produkt

Als Bezugsgröße für die Erfassung der Metallkonzentration im Produkt wurde die Masse in Gramm pro Kilowatt (peak), d. h. der spezifische Metallgehalt, ausgewählt. Dies erlaubte es im Anschluss, die in Verkehr gebrachte Menge strategischer Metalle als das Produkt der jährlich installierten Leistung und des spezifischen Metallgehalts zu bestimmen.

Die Materialmenge pro kWp ist abhängig von

- der Dichte des aktiven Materials,
- der Dicke der aktiven Schicht (in μm),
- der Anteile der Materialien in der aktiven Schicht,
- der Effizienz des Moduls.

Die Datenerhebung der Metallkonzentrationen im Produkt ist zum einen auf Basis einer Hersteller- und Expertenbefragung, zum anderen auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche erfolgt. Da die Angaben aus der Literatur sich teilweise auf andere Bezugsgrößen beziehen (bspw. g/m^2), musste eine Umrechnung/Normalisierung der Werte erfolgen. Diese Umrechnung ist anhand des Wirkungsgrads der Module erfolgt.

Der Wirkungsgrad gibt den Anteil der Leistung wieder, der in elektrischen Strom umgewandelt werden kann (Wirkungsgrad = elektrische Leistung/Leistung des einfallenden Sonnenlichts) (vgl. Stollwerk 2001). Entsprechend lässt sich anhand der Effizienz bzw. des Wirkungsgrades die Nennleistung pro m^2 Modulfläche bestimmen und hierüber wiederum die Masse pro installierter Leistung.

CIGS

Die Materialdicke bei CIGS-Zellen schwankt zwischen über einem bis zu 3 μm (vgl. Speirs et al. 2011; Fthenakis 2009a; Jungbluth et al. 2009; Bleiwas 2010). Bei den meisten Modulen liegt die Schichtdicke bei etwa 2 μm . Die Effizienz kommerzieller Module liegt zwischen 10 und 12 %.

Wie eingangs erwähnt, gibt es bei CIGS-Zellen Unterschiede im Galliumanteil. Dennoch lässt sich sagen, dass die Schwefelverbindung CuInS_2 , die keinen Galliumanteil aufweist, nur eine untergeordnete Rolle spielt und Zellen mit Galliumzusatz die Regel sind (Sander et al. 2007). Weitere Schwankungen der Metallkonzentrationen können aus der Schichtdicke und der Moduleffizienz resultieren. Solche Schwankungen im Gallium- und Indiumanteil spiegeln sich auch in den Literatur- und Primärdaten wider.

Innerhalb der Datenerhebung wurden solche Studien von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, die lediglich Angaben über den Produktionsinput und nicht über die Materialkonzentration im Produkt enthielten (Keshner und Arya 2004; Kausch und Matschullat 2005; Bleiwas 2010; Fthenakis et al. 2009a), die keine ausreichenden Daten lieferten, um eine Umrechnung in Masse

pro installierter Leistung durchzuführen (BINE Informationsdienst 2010), lediglich Angaben für einen „Technologiemix“ (Krewitt et al. 2005; Zuser und Rechberger 2011), nur aggregierte Werte enthielten (Raugei et al. 2007; Berger et al. 2010; Sander et al. 2007) oder aus sonstigen Gründen als nicht verlässlich zu bewerten waren, bspw. da die Herkunft bzw. Entstehung der Daten nicht nachvollziehbar war (Jungbluth et al. 2009).

Aus den verbliebenen Studien sowie den Experten- und Herstellerangaben ergab sich eine Spannweite von 2,3 bis 20 g/kWp (peak) für Gallium und von 9,8 bis 29 g/kWp für Indium. Eine Übersicht der Werte findet sich in folgender Tabelle.

Tabelle 141: Gehalte strategischer Metalle in CIGS-Zellen (Angaben in g/kWp)

Element	(Moss et al. 2011)	(U.S. Department of Energy 2011a)	(U.S. Department of Energy 2010)	(Anderson 2000)	Expertenankunft, Helmholtz-Institut Berlin	Herstellerangabe
Ga	2,3	12,4 - 18,5	4 - 20	5,3	12,8 - 19,7	3,8
In	19	15,4 - 23,1	16,5 (-110)*	(29,1)**	15,9 - 24,4	9,8

*Die Angabe von 110 g/kWp stellt einen deutlichen Ausreißer dar und wird bei der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt. In der DOE critical materials strategy findet sich dieser Wert auch nicht wieder. Bis zu diesem Zeitpunkt hat keine Rückmeldung vom DOE stattgefunden, inwieweit es sich bei der Angabe um einen Fehler handelt.

**Angabe ist als unrealistisch einzuschätzen, da in der Studie von einer hundertprozentigen Materialausnutzung ausgegangen wird. In der folgenden Betrachtung bleibt sie daher unberücksichtigt.

CdTe

Bei CdTe-Zellen ist wie eingangs erwähnt nur der Indiumanteil in TCO von Relevanz. Die meisten vorhandenen Studien zu den Materialbedarfen und Materialintensitäten von CdTe-Zellen fokussieren jedoch auf die Metalle Cadmium und Tellur und beinhalten keine Angaben zu den Mengen an Indium (vgl. u.a. U.S. Department of Energy 2011a; Fthenakis und Kim 2011; Keshner und Arya 2004; Woodhouse et al. 2012; Bleiwas 2010). Die Datenerhebung stützt sich daher im Wesentlichen auf eine Studie sowie Angaben eines Herstellers. Eine weitere Studie wurde von der Betrachtung ausgeschlossen, da die Berechnung der Indiumgehalte nicht nachvollziehbar war (Öhrlund 2012). Wie bei CIGS wurden die Angaben auf Masse pro installierte Leistung umgerechnet. Hieraus ergab sich eine Spannweite für die Indiumgehalte von 15,4 bis 18,3 g/kWp.

Tabelle 142: Gehalte strategischer Metalle in CdTe-Zellen (Angaben in g/kWp)

Element	(Moss et al. 2011)	Herstellerangabe
In	15,9	15,4 - 18,3

a-Si

Bei a-Si-Zellen ist wie bei CdTe nur der Indiumanteil im TCO von Relevanz. Die Datenlage stellt sich hier noch schlechter dar als bei CdTe-Zellen. In Studien zu kritischen Materialien sowie in LCA- und LCI-Studien von Photovoltaikzellen bleibt der Indiumgehalt bei a-Si-Zellen meist unberücksichtigt. Teilweise wird die Verwendung von Indium zwar erwähnt (bspw. in Sander et al. 2007), Mengenangaben werden jedoch nicht gemacht. Auch Herstelleranfragen ergaben diesbezüglich keine zusätzlichen Informationen. Die Produktanalyse stützt sich daher auf eine Quelle (Moss et al. 2011). Hier wird ein Indiumgehalt von 5,32 g/kWp angegeben.

Exporte aus der Nutzungsphase

Für Exporte aus der Nutzungsphase ist davon auszugehen, dass diese für die untersuchten Photovoltaikzellen im Betrachtungszeitraum keine Relevanz haben. Insbesondere für die betrachteten Technologien CdTe und CIGS, welche erst seit rund 10 bis 12 Jahren kommerziell im Einsatz sind, sind Exporte aus der Nutzungsphase in relevanter Größenordnung auszuschließen. Bei dieser recht jungen Technologie ist bisher keine Entwicklung wie bei Windenergieanlagen festzustellen, bei der alte Anlagen nach dem Rückbau aufbereitet und als second-hand Anlagen wieder verkauft und i.d.R. ins Ausland exportiert werden. Auch spielt das sogenannte Repowering, also der Ersatz älterer, leistungsschwächerer Anlagen durch neue leistungsstärkere Anlagen, bei Photovoltaikanlagen im Gegensatz zu Windenergieanlagen noch keine Rolle. Zudem wird für Photovoltaikanlagen 20 Jahre lang die Einspeisevergütung gezahlt, was einen vorzeitigen Abbau und Export zusätzlich unwahrscheinlich macht. Auch für a-Si-Zellen haben die Recherchen keinen Anhalt für mögliche Exporte aus der Nutzungsphase erbracht.

Verweildauer

Da es sich bei Photovoltaikzellen um eine recht junge Technologie handelt (zumindest bezogen auf den Einsatz in größerem Maßstab), gibt es bisher keine empirischen Untersuchungen bzgl. des tatsächlichen Alters von Altmodulen.

In Ökobilanz- und sonstigen Studien zu Photovoltaikanlagen werden meist 20 bis 30 Jahre als Lebensdauer angegeben (vgl. Sherwani et al. 2010; García-Valverde et al. 2009; Stoppato 2008; Berger et al. 2010; Briem et al. 2004; Azzopardi und Mutale 2010; Held und Ilg 2011; Rauegi und Fthenakis 2010). Auch die ausschließliche Betrachtung von Studien, die sich nur mit den untersuchten Zelltechnologien befassen, zeigt hier dasselbe Bild bzgl. der Lebensdauern, zu denen Angaben von 20 bis 30 Jahren gemacht werden. Die Produktgarantien der Hersteller liegen meist bei etwa 10 Jahren, während die Leistungsgarantien bei meist 25 Jahren liegen. Die Einspeisevergütung für Photovoltaikzellen in Deutschland wird für 20 Jahre gezahlt, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Zellen mindestens für diese Dauer in der Nutzung verweilen, wobei es unwahrscheinlich erscheint, dass die Anlagen nach Ablauf der Vergütung entfernt werden, zudem sie zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschrieben sein dürften.

In einer der wenigen Studien, die sich mit der Lebensdauerbetrachtung von PV-Modulen befassen, wird eine Verweildauer von 29,6 Jahren angegeben (Kuitche 2010). In (Kumar und Sarkan 2013) finden sich zumindest Angaben zur charakteristischen Lebensdauer (Lebensdauer nach der 63,2 % der Produkte noch in der Nutzung verweilen). Hier werden 27,7 bis 28 Jahre angegeben.

Auf dieser Basis wird für die Produktanalyse von Photovoltaikzellen eine mittlere Verweildauer von 25 Jahren angenommen. Zusätzlich wird der Einfluss einer längeren angenommenen Verweildauer von 30 Jahren untersucht.

Potenziell als Abfall anfallende Menge

Für die Berechnung wird, wie oben beschrieben, eine mittlere Lebensdauer von 25 Jahren (bzw. 30 Jahren) angenommen. Hierfür müssten theoretisch (entsprechend der Methodik) die Zeitreihen zur Inverkehrbringung ab 1982 (bzw. 1975) berücksichtigt werden. Für die Photovoltaikzellen genügt es jedoch, bis zur Mitte der 1980 zurückzugehen, da hier die ersten Photovoltaikzellen in Betrieb genommen wurden. Mengenmäßig relevante Installation von über einem MW/a lassen sich erst ab den späten Neunziger Jahren feststellen. Auch die ersten relevanten Installationen von CIGS- und CdTe-Zellen fanden erst ab 1998 statt.

Bezüglich der Weibullparameter (Formparameter) lassen sich in der Literatur kaum Angaben finden. In einer kürzlich erschienenen Arbeit von Kumar werden Formparameterwerte von $k = 9,982$ und $k = 14,41$ angegeben (Kumar und Sarkan 2013). Diese Werte liegen jedoch weit außerhalb der Werte, die sich für jedes andere Produkt finden lassen und werden als wenig zuverlässig eingestuft. Von Kuitche wird ein Wert von $k = 5,3759$ angegeben (Kuitche 2010). Dieser Wert liegt am oberen Rand des ansonsten für Produkte identifizierten Wertebereichs. Dies kann für Photovoltaikzellen durchaus realistisch sein, da diese tendenziell spät aus der Nutzung ausscheiden und eher selten früher entsorgt werden. Zudem beruht der Wert auf realen Daten aus verschiedenen Witterungszonen (cold-dry, hot-dry, hot-moist) sowie auf beschleunigten Belastungstest. Der Wert von 5,3759 wird daher als verlässlicher als die sonstigen gefundenen Werte eingestuft und als Referenzwert für die Berechnung verwendet. Zusätzlich wird der Einfluss eines geringeren k-Werts von 4 untersucht.

Die Berechnung der in 2020 als Abfall anfallenden Mengen entsprechend dem in 5.1.1.3 dargestellten Vorgehen ergibt die in Tabelle 143 dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 143: Menge strategischer Metalle aus Photovoltaikanlagen in 2020 bei verschiedenen Metallkonzentrationen und k-Werten (kg) Teil 1: Verweildauer = 25 Jahre

Technologie	Metall	Metallkonzentration [kg/MW]	Kommentar	k=5,3759	k=4
CIGS	Indium	9,8	Herstellerangabe, untere Grenze	10,54	31,1
		15,9	Experteneinschätzung, optimistisch	17,13	50,6
		24,4	Experteneinschätzung, pessimistisch, obere Grenze	26,36	77,9
	Gallium	2,34	Angabe aus (Moss et al. 2011), untere Grenze	2,53	7,5
		3,8	Herstellerangabe	4,1	12,1
		12,8	Experteneinschätzung, optimistisch	13,81	40,8
		19,7	Experteneinschätzung, pessimistisch, obere Grenze	21,24	62,7
CdTe	Indium	15,39	Herstellerangabe, optimistisch, untere Grenze	66,56	174,0
		15,9	Angabe aus (Moss et al. 2011)	68,76	180,0
		18,3	Herstellerangabe, pessimistisch, obere Grenze	79,14	206,9
a-Si	Indium	5,32	Angabe aus (Moss et al. 2011)	29,1	62,3

Tabelle 144: Menge strategischer Metalle aus Photovoltaikanlagen in 2020 bei verschiedenen Metallkonzentrationen und k-Werten (kg) Teil 1: Verweildauer = 30 Jahre

Technologie	Metall	Metallkonzentration [kg/MW]	Kommentar	k=5,3759	k=4
CIGS	Indium	9,8	Herstellerangabe, untere Grenze	4,0	15,2
		15,9	Experteneinschätzung, optimistisch	6,5	24,6
		24,4	Experteneinschätzung, pessimistisch, obere Grenze	10,0	37,9
	Gallium	2,34	Angabe aus (Moss et al. 2011), untere Grenze	1,0	3,6
		3,8	Herstellerangabe	1,6	5,9
		12,8	Experteneinschätzung, optimistisch	5,1	19,9
		19,7	Experteneinschätzung, pessimistisch, obere Grenze	8,0	30,5
CdTe	Indium	15,39	Herstellerangabe, optimistisch, untere Grenze	25,2	85,0
		15,9	Angabe aus (Moss et al. 2011)	26,0	87,8
		18,3	Herstellerangabe, pessimistisch, obere Grenze	29,9	101,1
a-Si	Indium	5,32	Angabe aus (Moss et al. 2011)	11,4	30,9

Im Referenzszenario (k = 5,3759, VD = 25 Jahre) ergab sich für CIGS eine Indiummenge von 10,5 bis 26,4 kg in 2020 sowie eine Galliummenge von 2,5 bis 21,2 kg. Größer fällt die Indiummenge aus CdTe-Zellen aus, mit 66,6 bis 79,1 kg. Für a-Si-Zellen ergab sich eine Indiummenge von 29,1 kg. Aufgrund des relativ dynamischen Marktes (hohe Marktanteile, volatile Anteile der verschiedenen Technologien) führt die Variation der Parameter Verweildauer und Formparameter der Weibullverteilung zu relativ großen Schwankungen der Ergebnisse. Für Indium aus CIGS vergrößert sich die Bandbreite auf 4 bis 77,9 kg in 2020, für Gallium aus CIGS auf 1,0 bis 62,7 kg. Für Indium aus CdTe und a-Si ergaben sich 25,2 bis 206,9 kg bzw. 11,4 bis 62,3 kg.

Entsprechend bestehen bzgl. der zu erwartenden Metallmenge im Jahr 2020 zwar gewisse Unsicherheiten. Es lässt sich aber sagen, dass sich in den folgenden Jahren die zu erwartende Metallmenge mit großer Sicherheit in Richtung der hier ermittelten Obergrenze bzw. darüber hinaus entwickeln wird.

5.3.15 LEDs

Die Produktgruppe LEDs wurde aufgrund ihrer Mengenrelevanz für Gallium und Indium identifiziert.

5.3.15.1 Produktidentifizierung

Für die weitere Analyse wurden folgende Produkte nach vermuteter sinkender Mengenrelevanz identifiziert: LED-Lampen, LED-Leuchten, LED-Anzeigesysteme, Straßenbeleuchtung.

Begrifflichkeiten

LED Light emitting diode – Licht aussendende Diode; die wichtigsten Bestandteile anorganischer LED sind der Chip (mehrere teilweise dotierte Schichten verschiedener Halbleitermaterialien), die Kunststofflinse zum Schutz des Chips und zur Lenkung des Lichts, ggf. ein Leuchtstoff zur Beeinflussung der Lichtfarbe, der Bonddraht (Anschlussdraht auf Oberseite der Diode, Anode und Kathode, evtl. Führungsrahmen und sonstige Kontakte, ggf. Reflektor und Gehäuse).

LED-Anzeigesystem Oberbegriff für optische Nutzerschnittschellen, bei denen Informationen mit Hilfe von LED angezeigt werden.

- LED-Anzeigetafel** Bei LED-Anzeigetafeln stellt die LED (bzw. die Kombination aus drei farblich unterschiedlichen LED) einen Lichtpunkt (ein Pixel) eines Bildes dar. LED-Anzeigetafeln werden z.B. in Sportstadien, Veranstaltungsräumen und -arenen, als Anzeigetafeln im Bereich Verkehrsinfrastruktur (öffentlicher Nah- und Fernverkehr, Fernstraßen, Verkehrsregelung, Flughäfen) oder als Informationstafeln z.B. bei Tankstellen, Gewerbebetrieben oder Kraftwerken verwendet. Oftmals handelt es sich um individualisierte digitale Anzeigesysteme, deren Konfektionierung nach Kundenwünschen erfolgt (Größe, Anzahl LED, Farbe etc.).
- LCD** Bei den Flüssigkristallanzeigen („Liquid Crystal Displays“) wird das Bild von einer Flüssigkristallschicht erzeugt. Das hierzu notwendige Hintergrundlicht wird von LED geliefert. Dabei sind zwei wesentliche Techniken zu unterscheiden, die auch die Menge an eingesetzten LED determinieren. Einmal die Edge-Technik, bei der die LED an den Rändern angeordnet sind und die Flüssigkristalle von den Rändern des Bildschirms angestrahlt werden. Und die Full- oder Direkttechnik, bei der die LEDs über die gesamte Bildschirmfläche verteilt sind und die Flüssigkristalle über die ganze Fläche direkt von hinten angestrahlt werden.
- LCD-Anzeigetafel** Der Begriff LCD-Anzeigetafel wird in diesem Bericht für große LCD im öffentlichen Raum, bei Veranstaltungen bzw. im gewerblichen Bereich verwendet. Die Abgrenzung zu Monitoren und Fernsehern wird aufgrund der steigenden Größe von Fernsehern und Monitoren zunehmend fließend.
- LED-Lampe, LED-Leuchte** *“ Als Lampe bezeichnet man eine Einrichtung zur Erzeugung von (in der Regel sichtbarem) Licht; darin eingeschlossen sind alle zusätzlichen Einrichtungen für ihre Zündung, Stromversorgung und Stabilisierung oder für die Verteilung, Filterung oder Umwandlung des Lichts, sofern diese Einrichtungen nicht entfernt werden können, ohne dass die Einheit dauerhaft beschädigt wird. Als Leuchte bezeichnet man ein Gerät zur Verteilung, Filterung oder Umwandlung des von einer oder mehreren Lichtquellen übertragenen Lichts, das alle zur Aufnahme, zur Fixierung und zum Schutz der Lichtquellen notwendigen Teile und erforderlichenfalls Hilfselemente zusammen mit den Vorrichtungen zu ihrem Anschluss an die Stromquelle, jedoch nicht die Lichtquellen selbst umfasst. Lampen, die untrennbar mit der Leuchte (also den „zusätzlichen Einrichtungen“ im obigen Sinne) verbunden sind, sind damit insgesamt als Lampe zu qualifizieren und unterfallen damit dem ElektroG2. Beispielhaft seien hier zur Nutzung in Haushalten bestimmte Taschenlampen, Arbeitslampen, Stirnlampen, Fahrradlampen oder auch (Weihnachts-) Lichterketten genannt, sofern diese mit eingebauten, nicht austauschbaren Lampen (z.B. LED-Lampen) versehen sind oder auch „LED-Stripes“ mit fest verbundenen zusätzlichen Einrichtungen.”* (Quelle: stiftung ear 2013)

Abgrenzung zum Projekt RePro

Produkte der Gruppe LED-Anzeigesysteme werden sowohl im gewerblichen, als auch im nicht-gewerblichen Bereich eingesetzt. Im Projekt ReStra werden entsprechend den Absprachen mit dem Umweltbundesamt ausschließlich gewerbliche Anwendungen betrachtet. Entsprechend den Absprachen werden die gewerblichen LED-LCD-Bildschirme in die Mengenbetrachtung zu den LCD-Bildschirmen im Projekt RePro integriert, da eine klare Abgrenzung kaum realisierbar ist und die dual-use bzw. ausschließlich privat genutzten Geräte den Markt deutlich dominieren.

5.3.15.2 Produktanalyse

Anzeigetafeln

Mengenschätzung über Marktinformationen

Das Statistische Bundesamt weist die Menge von in Deutschland produzierten LED-Anzeigetafeln als Stückzahlen und als Wertangabe aus. Die Im- und Exporte³⁸ in bzw. aus Drittländern werden nicht in Stückzahlen angegeben, sondern nur als Wertangabe. Die Differenz zwischen Import und Export liegt zwischen annähernd Null (2010) bis zu 40% des Wertes, der in der Produktionsstatistik angegeben ist (2011). Eine Rückrechnung von Wertangaben auf Stückzahlen wäre nur mit sehr großen Unsicherheiten möglich, da Anzeigetafeln überwiegend nach spezifischen Vorgaben des Bestellers individuell hergestellt werden.

Tabelle 145: Anzahl an in Deutschland produzierten LED-Anzeigetafeln

Statistische Melde-Nr.	Jahr	Anzeigetafeln mit Leuchtdiodenanzeige (LED), Stückzahl
3162 11 750 (Destatis 2013a)	1996	91.577
	1999	10.688
	2000	53.454
	2001	43.391
	2002	35.192
	2003	35.836
	2004	43.437
	2005	52.480
	2006	55.367
	2007	39.920
279020500 (Destatis 2013b)	2008	52.412
	2009	55.162
	2010	63.759
	2011	69.405

Da es sich bei den LED-Anzeigetafeln in den meisten Fällen um Sonderanfertigungen handelt, könnte aus der Anzahl nur mit sehr großer Datenunsicherheit auf die iVgM von LED geschlossen werden.

Mengenschätzung über Anwendungsfelder

Sportstadien

³⁸ Warennummer WA85312020.

In Sportstadien werden LEDs vor allem in sogenannten Videowalls und Videobanden genutzt. Für die Mengenabschätzung wurden alle Fußballstadien der ersten drei deutschen Bundesligen berücksichtigt, darüber hinaus Eishockey-, Handball- und Basketballstadien der jeweils ersten Liga. Diese Sportarten decken alle großen Sportstadien und Veranstaltungsarenen in Deutschland ab (Stadionwelt 2013b). Die Stadien wurden nach Zuschauerkapazität gruppiert. Die nachfolgende Tabelle zeigt die verschiedenen Stadiongrößen und die jeweils angenommenen Größen der Videowalls.

Tabelle 146: Videowalls in Stadien

Zuschauerkapazität des Stadions	Angenommene Größe der Videoleinwand in m ²	Anzahl der Stadien
5.000 - 10.000	25	35
10.000 - 20.000	50	29
20.000 - 40.000	85	19
40.000 +	120	15

Quelle: Stadionwelt 2013c, Stadionwelt 2013d, eigene Berechnungen

Die Größe der Videowalls wurde anhand der Größe der Walls in den Stadien der 1. und 2. Fußballbundesliga sowie der in ausgewählten Eishockey- und Handballarenen geschätzt (Stadionwelt 2012a, Stadionwelt 2012b). Damit ergibt sich eine Fläche von 5.740 m². Dazu kommen in den Fußballstadien der 1. Und 2. Liga noch 3.240 m² Videobanden (Stadionwelt 2013a). Dies entspricht einer Anzahl von ca. 61 Millionen LED³⁹.

Der Großteil der LED-Videowalls ist zwischen 2005 und 2010 in Betrieb genommen worden (Stadionwelt 2012a, Stadionwelt 2012b). Seit 2010 werden zumindest Videobanden im Innenbereich auch durch LCD-Anzeigesysteme gestellt. Den zeitlichen Verlauf der installierten LED Anzeigeflächen zeigt die folgende Tabelle.

³⁹ Hier und in den folgenden Umrechnungen von Flächen in Anzahl von LEDs, werden die Faktoren aus Stadionwelt (2013a) von durchschnittlich 6.811 LED pro Quadratmeter angewandt.

Tabelle 147: Zeitlicher Verlauf der installierten LED-Anzeigetafeln

Jahr	Installierte Menge pro Jahr in m ²
1997	78
1998	197
1999	23
2000	24
2001	257
2002	38
2003	221
2004	302
2005	822
2006	232
2007	39
2008	615
2009	1.082
2010	764
2011	1.146
2012	1.153

Quelle: Stadionwelt 2012a

Für die weiteren Jahre bis 2020 wird eine Abflachung der Kurve erwartet, da die großen Stadien bereits in großem Umfang ausgerüstet sind, die Diffusion der Technik in die kleineren Stadien aufgrund der hohen Preise langsamer erfolgt und die Verdrängung der LED-Anzeigetafeln durch LCD-Videotafeln bereits eingesetzt hat. In der Prognose bis 2020 wurden daher die jährlichen Neuinstallationen auf dem Niveau des Jahres 2012 angesetzt (1.000 m² /a).

Bahnhöfe

An Bahnhöfen werden LEDs in erster Linie für Anzeigetafeln verwendet. Dabei kann zwischen Zugzielanzeigern am Gleis und Anzeigetafeln im Bahnhofsinneren unterschieden werden. Zur Mengenabschätzung der LEDs wird die Kategorieneinteilung der Bahnhöfe der Deutschen Bahn verwendet (Deutsche Bahn 2013). Für die einzelnen Bahnhofskategorien wurden nach Betrachtung einiger repräsentativer Bahnhöfe Schätzungen über die Anzahl der Gleise, die Anzahl der Zugzielanzeiger pro Gleis und die Größe der sonstigen Anzeigetafeln vorgenommen.

Tabelle 148: Erhebung zu Displays in Bahnhöfen

Bahnhofskategorie	Anzahl der Bahnhöfe	Anzahl der Gleise	Zugzielanzeiger pro Gleis (Anzahl)	Größe sonstige Anzeigetafeln (in m ²)
1	21	13	10	80
2	82	8	8	40
3	230	5	4	20
4	600	3	3	10
5	1.070	2	2	0
6	2.500	1	1	0
7	870	1	0	0

Quelle: Deutsche Bahn 2013, eigene Berechnungen

Bei einer geschätzten Fläche von ca. 0,3125 m² pro Zugzielanzeiger am Gleis ergibt sich damit eine Gesamtfläche von 12.599 m² mit insgesamt 85.817.368 LEDs. In kleinen Bahnhöfen ist ein Großteil der Anzeigetafeln zwischen 2009 und 2012 errichtet worden, gefördert durch das Konjunkturpaket des Bundes (Mitteldeutsche Zeitung 2013, WDR 2013). Weitergehende Differenzierungen der pro Jahr installierten Flächen sind nicht verfügbar.

Für die Prognose bis zum Jahr 2020 wird angenommen, dass nur Ersatzinstallationen erfolgen, da alle Bahngleise (die die größten LED-Mengen beitragen) ausgestattet sind. Bei einer angenommenen technischen Lebensdauer der LED von 50.000 Stunden und einer Leuchtdauer von 24 Stunden pro Tag ergibt sich ein Austausch nach ca. 6 Jahren. Für den Zeitraum von 2013 bis 2020 wird daher eine jährliche Neuinstallation von 2.000 m² angesetzt.

Flughäfen

Bei Flughäfen werden LEDs ebenfalls in erster Linie in Anzeigetafeln verwendet. Detaillierte Erhebungen zu den Flächen je Größenklasse von Flughäfen sind nicht verfügbar. Daher wurde für die Bezugsgröße Flugsteig (Gate) auf der Grundlage von Begehungen von Flughäfen eine Fläche von 4 m² Anzeigetafel je Flugsteig angesetzt. Diese Zahl schließt sowohl die Anzeigetafeln direkt am Flugsteig ein als auch anteilig größere Anzeigetafeln, die am Terminal platziert sind oder aber in anderen Bereichen des Flughafens. Die Anzahl der Flugsteige pro Flughafen wurde über Größenklassen der Flughäfen entsprechend den Passagierzahlen pro Flughafen geschätzt. Dabei wurde nach Betrachtung einiger repräsentativer Flughäfen von Folgendem ausgegangen:

Tabelle 149: Erhebung zu Flughäfen

Flugpassagiere pro Jahr	Anzahl Flughäfen	Anzahl Flugsteige
10.000 - 100.000	9	1
100.000 - 1.000.000	10	5
1.000.000 - 5.000.000	9	10
5.000.000 - 15.000.000	5	25
15.000.000 +	4	45

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ADV (2013) und AZWORLD AIRPORTS (2013)

Damit ergibt sich eine Fläche von 1.816 m² mit insgesamt 12.369.212 LEDs. Für eine Differenzierung der installierten Flächen nach Jahr der Installation ist keine Datengrundlage verfügbar. Für die Fortschreibung bis zum Jahr 2020 werden pauschal 200 m² für Neuinstallationen und 200 m² für Ersatzinstallationen pro Jahr berücksichtigt.

Straßenverkehr

Statistiken über die in Verkehr gebrachten Verkehrssignalanlagen an Straßen, Binnenwasserstraßen und Häfen lassen vermuten, dass hier auch LEDs in relevanter Menge verwendet werden (Eurostat 2013, Prodcom Code 27.90.70.30). Allerdings ist hier aufgrund der unklaren Datenlage keine Schätzung der verbauten LEDs möglich.

Sonstige LEDs

Medienberichte über einzelne Veranstaltungen lassen vermuten, dass an vielen öffentlichen Plätzen in Deutschland LED-Videoleinwände aufgestellt sind, die vor allem zu Werbezwecken genutzt werden. Ein Beispiel dafür ist eine 100 m² große Multitouch-LED-Wand am Nürburgring (LG 2009). Außerdem gibt es viele Anbieter, die LED-Wände für Großveranstaltungen vermieten. So hat die Firma Screen Rent laut eigenen Angaben zur Fußball WM 2010 und zur Fußball EM 2012 an 60 Standorten Videowände zum Public Viewing bereitgestellt (Screen Rent 2013). Die Mengenabschätzung gestaltet sich hier äußerst schwierig, sodass keine Angaben zu verbauten LED in die Mengenerhebung einfließen können.

Gesamtmenge LED nach verschiedenen Anwendungsfeldern

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Erhebungen zusammen.

Tabelle 150: Übersicht zur Anzahl von LED in LED Anzeigetafeln in Deutschland

Anwendungsfeld	Menge LEDs
Sportstadien	61.164.936
Bahnhöfe	85.817.368
Flughäfen	12.369.212
Straßenverkehr	k. A.
Sonstiges	k. A.
GESAMT	159.351.516 (+ unbekannte Mengen aus Straßenverkehr und sonstigen Anwendungsfeldern)

Wesentliche Datenunsicherheiten bei der dargestellten Bestimmung der installierten LED sind:

- lückenhafte Flächenangaben der LED-Anzeigetafeln für Bahnhöfe, Flughäfen, mobile Einätze und Verkehrsinfrastruktur,
- fehlende Flächenangaben zu LED-Anzeigetafeln in den Bereichen Straßenverkehr und mobile LED-Anzeigetafeln,
- pauschaler Umrechnungsfaktor von Flächen auf LED-Stückzahlen.

Durch die unvollständige Datenlage zu den Flächen wird die Anzahl der verwendeten LED deutlich unterschätzt. Allein im Bereich Formel-1-Rennen werden für 2 Strecken LED-Anzeigetafeln mit einer Fläche von über 600 m² berichtet (Nürburgring, Hockenheim) (LG 2013).

In Bezug auf den pauschalen Umrechnungsfaktor kann keine Richtung des Fehlers (Über-/Unterschätzung) geschätzt werden, da Angaben zu LED-Dichte bei den Anzeigetafeln außerhalb von Stadien nicht verfügbar sind.

Für die Gesamtmassenstromberechnungen wird daher von 300 Mio. installierten LED in Anzeigetafeln im Jahr 2012 ausgegangen.

Zeitliche Entwicklung der iVgM

Wie dargestellt, sind keine Statistiken verfügbar, die die in Verkehr gebrachten Mengen nach Jahren differenzieren. LED Anzeigetafeln sind schon lange in vielfältigen Anwendungsbereichen auf dem Markt. Die Installation in großen Massen in LED-Anzeigesystemen erfolgte aber erst ab Ende der 90er Jahre. Der zeitliche Verlauf der Installationen wurde zum einen durch die technische Entwicklung und die sinkenden Preise je LED-Modul, zum anderen aber auch durch die verfügbaren Gelder zur Installation bestimmt (z. B. durch das Konjunkturprogramm bei Bahnhöfen bzw. durch die erzielbaren Umsätze durch Werbung). Für die Berechnungen im Folgenden wird auf der Grundlage der Bestandsdaten, des Zeitraums der In-Verkehr-Bringung und einer Ersatzquote pauschal ein linearer Verlauf der Neuinstallationen ab 1990 bis 2012 angenommen (15 Mio. LED pro Jahr) und ab 2013 bis 2020 Neu- und Ersatzinstallationen von 20 Mio. LED/a.

Lebensdauer

Eine Schätzung über eine durchschnittliche Lebensdauer von LED wurde von zwei LED-Anzeigehersteller gemacht und mit etwa 50.000 Stunden angegeben (Panasonic & Wetelco pers. kom. 2013). Dabei ist zu beachten, dass die LED dann noch nicht defekt sind, sondern nur deren Leuchtkraft um etwa 50 % nachgelassen hat (Wetelco pers. kom. 2013). Wenn man davon ausgeht, dass jede Anzeigetafel pro Tag nur wenige Stunden betrieben wird, steigt deren technische Lebensdauer in Jahren schnell auf über 60 Jahre. Tatsächlich wird die durchschnittlich Nutzungsdauer aber oftmals mit 10 Jahren deutlich niedriger angesetzt (Panasonic pers. kom. 2013). Grund hierfür ist, dass auch bei LED-Anzeigetafeln nicht die technische Lebensdauer der Anlagen ihre Nutzungsdauer begrenzt, sondern schnelle Technologiezyklen den Wechsel auf entweder neue Produkte oder neuen Techniken begünstigen. Bei den mengenrelevanten LED-Anzeigetafeln, bei denen die Bildqualität keine sehr große Rolle spielt (z.B. Anzeigetafeln auf Bahngleisen), ist die Brenndauer pro Tag so hoch, dass hier von einer Lebensdauer von unter 10 Jahren ausgegangen werden kann.

Für die weiteren Berechnungen im Folgenden wird daher eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 10 Jahren angesetzt. Die Zwischenlagerung nach Ende der Nutzungsphase bis zur Entsorgung wird aufgrund des Platzbedarfs für die Altmodule keine zeitliche Rolle spielen und deshalb vernachlässigt.

Aufgrund des Preisniveaus der LED-Anzeigetafeln und des modularen Aufbaus kann davon ausgegangen werden, dass ein Anteil der Geräte für eine weitere Nutzung exportiert wird und somit

nicht für ein Recycling in Deutschland verfügbar ist. Angaben über einen solchen Gebrauchtgeräteexport liegen unter anderem⁴⁰ deswegen nicht vor, weil die Statistiken nicht zwischen gebrauchten und neuen Elektronikgeräten unterscheiden. Für eine informierte Schätzung des Anteils der Exporte fehlt die Grundlage. Aus diesem Grund werden mögliche Exporte in den Mengenstromberechnungen nicht berücksichtigt.

Straßenbeleuchtung

Auf der Basis von Spengler (2013) und Reintjes, Spengler (2013) kann die im Jahr 2012 installierte Anzahl von LED in Straßenbeleuchtungen in Deutschland auf 2,7 - 3,6 Mio. LED beziffert werden⁴¹. Wird für die LED in Straßenbeleuchtungen eine durchschnittliche Lebensdauer von 12 Jahren angesetzt,⁴² ergibt ein Abfallpotenzial von ca. 2 Mio. LED im Jahr 2020. Diese Menge ist im Vergleich zu den anderen Anwendungsgebieten als sehr gering einzuschätzen, weshalb Straßenbeleuchtungen in den weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

Metallkonzentrationen in LEDs

Für die folgende Berechnung wurde eine Referenz-LED angenommen, die von Spengler et al. (2013) definiert wurde. Dabei ist zu beachten, dass LED in sehr vielen unterschiedlichen Bauarten und Konfigurationen hergestellt werden. Bei den Mengenbetrachtungen handelt es sich daher um eine qualifizierte Schätzung.

Tabelle 151: Metallkonzentrationen in einer Referenz-LED nach Spengler et.al. (2013) (Angaben in Mikrogramm/LED)

Metall	Menge
Ga	9
In	7
Ce	2
Y	63
Au	206
Ag	11

⁴⁰ Außerdem ist eine Wertschwelle ein Faktor für die Aufnahme des Gebrauchtmoduls in die Statistiken.

⁴¹ Der Anteil von LED-Straßenlampen an der Gesamtzahl der Straßenbeleuchtungen wurde auf ca. 2 % in 2012 geschätzt. Dies sind 180.000 LED-Module, von denen jedes Modul im Durchschnitt 15 - 20 LED enthält.

⁴² Dabei wird davon ausgegangen, dass hochwertige LEDs mit geringen Lichtverlusten über die Nutzungsdauer eingesetzt werden und es wird entsprechend eine längere Lebensdauer angenommen, als z. B. bei Retrofit-Lampen (Reintjes, Spengler 2013).

Ergebnisse

Entsprechend der obigen Ausführungen sind nur LED-Anzeigetafeln in der weiteren Berechnung der in 2020 zu erwartenden Mengen zu berücksichtigen⁴³. Die Berechnung der zu erwartenden Mengen an strategischen Metallen im Jahr 2020 erfolgt anhand der dargestellten Annahmen zu den in Verkehr gebrachten Mengen, den Metallkonzentrationen und der Verweildauer von 10 Jahren.

Bzgl. der Weibullparameter zeigen Untersuchungen von LEDs Werte von 6,43 und 8,23 (Fan 2012). Beide Werte werden als obere und untere Grenze für die Berechnung herangezogen.

Anhand der dargestellten Ergebnisse ergibt sich aus LED-Anzeigetafeln für das Bezugsjahr 2020 eine zu erwartende Menge an Gallium von 0,14 kg, an Indium von 0,11 kg, an Cer von rund 0,03 kg, an Yttrium von 0,96 kg sowie an Gold von 3,12 bis 3,15 kg.

Tabelle 152: Mengen strategischer Metalle in 2020 aus LED-Anzeigetafeln (Angaben in kg)

Element	k=6,43	k=8,23
Ga	0,14	0,14
In	0,11	0,11
Ce	0,03	0,03
Y	0,96	0,96
Au	3,15	3,12

5.3.16 Haushaltsanwendungen

Die Produktgruppe Haushaltsanwendungen wurde als Anwendung von Dysprosium und Terbium identifiziert.

5.3.16.1 Produktidentifizierung

Der Anwendungsbereich von Dysprosium und Terbium bei Haushaltsgeräten sind Neodymmagnete in Motoren. Die Vorrecherche ergab als Produkte mit möglicher Mengenrelevanz:

- Fahrräder: Elektrische Fahrräder und Scooter sowie Nabendynamos,
- Diverse Haushaltsanwendungen: Kameras, Uhren, Rekorder,
- Haushaltsgroßgeräte: Raumklimaanlagen, Waschmaschinen, Trockner,
- Elektrische Werkzeuge: Bohrmaschinen.

Elektrokleingeräte werden im Projekt *RePro* behandelt. Daher werden Kameras, Uhren und Rekorder sowie Bohrmaschinen hier nicht betrachtet.

⁴³ Straßenbeleuchtung, LCD-Anzeigesysteme, LED-Lampen und LED-Leuchten werden in den Massenberechnungen des Projektes ReStra nicht berücksichtigt.

Die Recherchen zeigten, dass direkte Mengenangaben zur Verwendung von Dysprosium und Terbium in Haushaltsanwendungen nicht in der notwendigen Breite verfügbar sind (s. u.). Daher wurde ein Vorgehen gewählt, bei dem zunächst die Menge der verwendeten Neodymmagnete bestimmt wurde und anschließend über das Verhältnis der Elemente Neodym, Dysprosium und Terbium in den Magneten zueinander die Mengen der Einzelemente.

5.3.16.2 Produktanalyse

Elektrische Fahrräder und Scooter

Der Zweirad-Industrie-Verband unterscheidet Fahrräder mit elektrischem Antrieb folgendermaßen (ZIV 2013):

- „E-Bikes“: Alle Elektrofahrräder, unabhängig davon, ob der Motor das Treten nur unterstützt oder das Fahrzeug auch ausschließlich vom Motor angetrieben werden kann,
- „Pedelects“: „Pedal Electric Cycle“ Unterstützung des Motors erfolgt nur, wenn pedaliert wird (Kraft- oder Tretsensor erforderlich). Im Unterschied zu Krafträdern muss bei Pedelects die Unterstützung des Motors ab 25 km/h abgeregelt werden. Die maximale Motorleistung bei Elektrofahrrädern ist 250 Watt.
Bis zu einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von 6 km/h ist bei Pedelects mit Anfahr-/Schiebehilfe ein Antrieb nur mit Motorkraft möglich. Ziel ist es, das Anfahren oder Schieben eines schweren Pedelects (z.B. Transport- oder Post-Pedelect) zu unterstützen.
- „Schnelle Pedelects“: Die sogenannten schnellen Pedelects sind Kraftfahrzeuge und benötigen eine Betriebserlaubnis und ein Versicherungskennzeichen.

Im Unterschied zu den E-Bikes, bei denen der Motor ein Zusatzantrieb zu dem Pedalantrieb ist, haben E-Scooter keinen Tretantrieb. Segway-Stehroller können den Scootern zugeordnet werden.

In Verkehr gebrachte Mengen

Da viele elektrische Fahrräder zulassungs- und versicherungsfrei sind, ist eine Bestimmung der iVgM nicht wie bei Autos über die Zulassungsstatistik möglich. Verfügbare Verkaufsstatistiken beschreiben die iVgM ab dem Jahr 2002 (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 153: Verkaufszahlen für elektrische Fahrräder in Deutschland (Stück)

Jahr	Anzahl (Stück)
2002	10.000
2003	15.000
2004	15.000
2005	25.000
2006	40.000
2007	70.000
2008	110.000
2009	150.000
2010	200.000
2011	310.000
2012	380.000

Quelle: ZIV (Neuberger 2012) ergänzt durch (ZIV-Zweirad 2013)

Nach Schätzung des ZIV sind ca. 95 % aller verkauften elektrischen Fahrräder Pedelecs (Schreyer 2013). Das KBA erfasst die Zulassungszahlen elektrische Krafträder in der Kategorie „Zweirädrige Kfz mit unbekanntem Hubraum“ (KBA 2012a). In dieser Kategorie wurden im Jahr 2011 267 Fahrzeuge neu zugelassen. Aufgrund dieser Mengenverhältnisse fokussiert die folgende Analyse auf Pedelecs.

Für die Zeitreihe der iVgM zur Bestimmung des Abfallpotenzials im Jahr 2020 (1,5-facher Zeitraum der durchschnittlichen Nutzungsdauer) wird die Prognose des ZIV-Zweirad berücksichtigt, nach der erwartet wird, dass sich der Markt für Elektrofahrräder in Deutschland mittelfristig auf einen jährlichen Anteil am Gesamtmarkt für Fahrräder von maximal 15 % einpendelt (Schreyer 2013). Der Gesamtmarkt für Fahrräder lag in 2012 bei ca. 4 Millionen Stück (Neuberger 2012).

Nutzungsdauer

Angaben zur Nutzungsdauer sind bei diesem relativ jungen Produkt mit geringem Verbreitungsgrad derzeit nicht verfügbar. Bei Preisen deutlich über 1.000 € kann von einer langen Nutzungsdauer ausgegangen werden, wenn das Pedelec funktionsfähig bzw. reparierbar bleibt. Die technische Lebensdauer der Akkus ist allerdings begrenzt. Für einen hochwertigen Akku wird bei fachgerechter Nutzung eine Lebensdauer von etwa drei bis fünf Jahren erwartet entsprechend rund 1.000 Ladezyklen (Neuberger 2012).

Darüber, ob am Ende der technischen Lebensdauer ein Austauschakku gekauft wird (oder noch erhältlich ist), liegen keine Kenntnisse vor. Ebenso nicht über das Verbraucherverhalten bei Akkus, deren Kapazität im Laufe der Zeit geringer wird. Pedelecs werden überwiegend als Zweifahrräder gekauft (Neuberger 2012), woraus ebenfalls auf eine lange Nutzungsdauer geschlossen werden kann. Daher wurde in den folgenden Berechnungen von einer Nutzungsdauer von 12 Jahren bei einem einmaligen Austausch des Akkus ausgegangen.

Exporte aus der Nutzungsphase

Über Exporte aus der Nutzungsphase liegen keine Informationen vor und wurden daher bei den folgenden Berechnungen nicht berücksichtigt.

Metallkonzentrationen

Constantinides (2012) nennt als Gewicht von Neodymmagneten in den verschiedenen Varianten von elektrischen Rädern eine Spannweite von 60 g bis 350 g. Zepf (2015) gibt Mengen von 180 g bis 380 g für E-Bikes und Pedelecs an. Für die in Deutschland verkauften mengenrelevanten Pedelecs wurde für die folgenden Berechnungen von einer Größe im unteren Bereich dieser Spannweite ausgegangen (150 g), da es sich hier lediglich um eine Tretunterstützung handelt, die zudem bei maximal 25 km/h abgeregelt wird.

Die Zusammensetzung von Neodymmagneten in diesem Bereich wird von Graedel (2011) mit 20 % Nd, 5 % Dy und 1 % Tb angegeben, Constantinides (2012) nennt einen Dy-Anteil von 4,2 % Dy. Die folgende Tabelle fasst die Produkt- und Stoffströme in den Jahren 2002 bis 2020 zusammen.

Tabelle 154: iVgM von Nd, Dy und Tb durch Pedelecs in Deutschland von 2002 bis 2020 (Angaben in kg)

Jahr	Anzahl Pedelecs (Stück)	Nd (kg)	Dy (kg)	Tb (kg)
2002	10.000	300	75	15
2003	15.000	450	113	23
2004	15.000	450	113	23
2005	25.000	750	188	38
2006	40.000	1.200	300	60
2007	70.000	2.100	525	105
2008	110.000	3.300	825	165
2009	150.000	4.500	1.125	225
2010	200.000	6.000	1.500	300
2011	310.000	9.300	2.325	465
2012	380.000	11.400	2.850	570
2013	437.000	13.110	3.278	656
2014	480.700	14.421	3.605	721
2015	516.753	15.503	3.876	775
2016	542.590	16.278	4.069	814
2017	558.868	16.766	4.192	838
2018	570.045	17.101	4.275	855
2019	581.446	17.443	4.361	872
2020	587.261	17.618	4.404	881

Ergebnisse

Für die Berechnung der im Jahr 2020 zu erwartenden Metallmengen wurde entsprechend der obigen Ausführungen von einer Verweildauer von 12 Jahren ausgegangen. Veröffentlichungen zu den Weibullparametern von Elektrofahrrädern finden sich bisher nicht. In Nies (2010) wird für Fahrräder ein Formparameter von $k=1,75$ genannt. Für Batterien wird hier ein Wert von 2,2 genannt. Diese beiden Werte wurden für die Berechnung herangezogen. Neben diesen Werten wurde zusätzlich ein höherer Wert von $k=3$ untersucht. Es ergeben sich die in Tabelle 155 dargestellten Metallmengen in 2020. Die zu erwartende Menge an Neodym bewegt sich zwischen 4.768 kg und 6.399 kg (im Mittel 5.584 kg), die Dysprosiummenge zwischen 1.192 und 1.600 kg (im Mittel 1.396 kg) und die Terbiummenge zwischen 238 und 320 kg (im Mittel 279 kg).

Tabelle 155: Metallmengen in 2020 aus Pedelecs

Formparameter	Nd in 2020 [kg]	Dy in 2020 [kg]	Tb in 2020 [kg]
k=1,75	6.399	1.600	320
k=2,2	5.644	1.411	282
k=3,0	4.768	1.192	238

Nabendynamos

Die Anzahl der verkauften Fahrräder sowie der Fahrräder mit Nabendynamo auf dem deutschen Markt in den Jahren 2004-2013 zeigt Tabelle 156. Der Anteil verkaufter Fahrräder mit Nabendynamo hat sich in den letzten Jahren stabil entwickelt. Nabendynamos wurden im Markt der hochpreisigen Räder gut angenommen, Entwicklungsgrenzen liegen jedoch im niederpreisigen Segment, da Fahrräder mit Nabendynamos gegenwärtig dort mit Kompletträdern nicht konkurrieren können. Die derzeitige Tendenz ist rückläufig, da E-Bikes einen immer größeren Anteil an den verkauften Fahrrädern ausmachen und rechtliche Änderungen der Straßenverkehrszulassungsordnung (STVZO) preisgünstigere Batteriebeleuchtungen legalisiert haben (vgl. ADFC 2013).

Tabelle 156: Anzahl verkaufter Fahrräder sowie Fahrräder mit Nabendynamo in Deutschland in den Jahren 2004-2013

Jahr	Anzahl verkaufte Fahrräder und E-Bikes gesamt (Mio.)	Davon Fahrräder mit Nabendynamos (Mio.)
2004	4,70	2,0
2005	4,75	2,2
2006	4,43	2,5
2007	4,60	2,7
2008	4,35	2,8
2009	4,05	2,5
2010	4,01	2,6
2011	4,10	2,5
2012	3,95	2,4
2013	3,80	2,3
Gesamt	42,74	24,5

Quellen: pers. kom. 2015d und Statista 2015

Bei diesen Zahlen handelt es sich um verkaufte Neufahrräder mit Nabendynamos. Der Anteil der über den Reparaturhandel verkauften Nabendynamos ließ sich schwer bestimmen, dürfte sich aber im niedrigen einstelligen Prozentbereich am Gesamtverkauf bewegen (Quelle: pers. kom. 2015d). Bei den verkauften Nabendynamos handelt sich zum Großteil um Ferrit-Magnete für den niedrigpreisigen Markt. Nabendynamos mit Neodymmagneten werden hauptsächlich im Mittel/Obersegment verbaut.

Die Datenlage zur Inverkehrbringung stellt sich schwach dar. Es wurde auf Basis von Experteninformationen näherungsweise von einer jährlichen Inverkehrbringung von 250.000 Nabendynamos ab 2012 ausgegangen. Für die Jahre davor wird ein linearer Anstieg von 100.000 im Jahr 2004 angenommen. Die Inverkehrbringung der relevanten strategischen Metalle wurde über die beschriebenen Metallgehalte pro Nabendynamo bestimmt.

Exporte aus der Nutzungsphase

Über Exporte aus der Nutzungsphase liegen keine Informationen vor und wurden daher nicht berücksichtigt.

Metallkonzentrationen

Die vertiefenden Recherchen ergaben, dass in den in Nabendynamos verwendeten Permanentmagnete weder Dysprosium noch Terbium, sondern stattdessen Neodym und Praseodym zum Einsatz kommen. Praseodym gehört nicht zu den im Rahmen von ReStra zur weiteren Untersuchung ausgewählten Metalle. Im Rahmen der Berechnung der Materialmengen wurde es zunächst dennoch mitbetrachtet, in der Mengenbilanzierung jedoch nicht einbezogen.

Eines der am deutschen Markt gängigsten Modelle, welches als Grundlage für die Berechnung herangezogen wird, enthält bei einem Gesamtgewicht von ca. 46 g pro Magnet 7,64 g Neodym und 2,44 g Praseodym (Quelle: pers. kom. 2015c).

Verweildauer

Der geplante Nutzungsrahmen eines Nabendynamos liegt bei ca. 20.000-25.000 km. Es ist davon auszugehen, dass die meisten Verbraucher diesen Rahmen nicht ausschöpfen, sondern ihr Fahrrad vorher aus anderen Gründen austauschen, z. B. aufgrund von Verschleiß anderer Teile oder aus modischen/technischen Gründen. Die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Fahrrads liegt in Deutschland bei ca. 10 Jahren (Quelle: pers. kom. 2015c). Dieser Zeitraum wurde als Nutzungsdauer von Nabendynamos zu Grunde gelegt.

Ergebnisse

Für die Berechnung der Materialmengen in 2020 wurde Verweildauer von 10 Jahren zu Grunde gelegt. Bezüglich der Weibullparameter erfolgte analog zur Betrachtung der Elektrofahräder eine Untersuchung verschiedener Formparameterwerte. Neben dem in Nies (2010) für Fahrräder genannten Wert von 1,75 wurden Werte von 2,2 und 3 untersucht. Es ergaben sich die in Tabelle 157 dargestellten Metallmengen in 2020. Für Neodym bewegt sich die Menge zwischen 1.372 kg und 1.435 kg (im Mittel 1.404 kg), für Praseodym zwischen 438 und 464 kg (im Mittel 451 kg).

Tabelle 157: Metallmengen in 2020 aus Nabendynamos

Formparameter	Nd in 2020 [kg]	Pr in 2020 [kg]
k=1,75	1.372	438
k=2,2	1.398	446
k=3	1.435	464

Raumklimaanlagen

Bei Raumklimaanlagen werden grundsätzlich zwei Typen unterschieden. Bei den Fenstergeräten sind alle Komponenten der Anlage in einer Einheit, bei dem geteilten Typ sind die Komponenten auf eine innenliegende Einheit und eine außenliegende Einheit verteilt. Weiterhin können Klimaanlagen danach unterteilt werden, ob sie nur kühlen können oder zusätzlich auch heizen.

Der Kompressor gilt als wesentliche Einheit, über die die Effizienz der Klimaanlage beeinflusst werden kann. In neueren Geräten werden Neodymmagnete für den Antrieb verwendet.

In Verkehr gebrachte Menge

Im Rahmen der Marktanalyse der Studie zur Ökodesignrichtlinie analysierte Riviere (2008) die Verkaufszahlen von Raumklimaanlagen <12 KW und erstellte eine Prognose für die Jahre bis 2030. Danach flacht der Anstieg der Verkaufszahlen kontinuierlich bis zum Jahr 2030 ab (siehe folgende Tabelle, in der die Verkaufsprognosen bis zu dem für das ReStra Projekt relevanten Jahr 2020 dargestellt sind).

Tabelle 158: Gesamtverkäufe und Prognose der Gesamtverkäufe von Raumklimaanlagen mit einer Leistung <12kW in Deutschland von 2005 bis 2020

Jahr	2005	2010	2015	2020
Verkaufte Stückzahl	113.534	180.960	204.338	215.453

Quelle: Riviere 2008

Raumklimaanlagen mit kompakten und effizienten Kompressoren mit Neodymmagneten wurden ca. ab dem Jahr 2000 in Verkehr gebracht (METI 2013). Der Treiber bei der Marktdurchdringung ist die höhere Energieeffizienz. In Japan wurde für das Jahr 2011 eine Marktdurchdringung von 100 % beschrieben. Der Marktanteil wird für die EU für das Jahr 2011 mit 50 % angegeben (Shah 2013).

Verweildauer

Du und Graedel (2011) geben für Raumklimaanlagen eine Nutzungsdauer von 15 Jahren an. Riviere (2008) nennt basierend auf Untersuchungen des Alters von Geräten, die entsorgt wurden; für den japanischen (gesättigten) Markt eine Nutzungsdauer von 12 Jahren für Haushaltsgeräte und von 10 bis 15 Jahren für gewerbliche Geräte. Aus Statistiken über die Anzahl der Haushalte und Bestand und Verkauf von Raumklimaanlagen wurden 10 bis 11 Jahre als Nutzungsdauer abgeleitet (Riviere 2008).

Bei der Übertragung der Daten auf die Situation in Deutschland ist zu beachten, dass der Markt in Deutschland derzeit nicht gesättigt ist (Riviere 2008). Daher wird in Deutschland erst später ein Niveau von Verdrängungskäufen stattfinden, wie es für das Jahr 2008 mit 62 % für Japan festgestellt wurde (Riviere 2008). Für die folgenden Berechnungen wurde ein Nutzungszeitraum von 11 Jahren angenommen.

Exporte aus der Nutzungsphase

Da zu Exporten aus der Nutzungsphase keine Informationen vorlagen und daher keine qualifizierte Aussage vorgenommen werden konnte, wurden diese in der weiteren Berechnung nicht betrachtet.

Metallkonzentration

Informationen zu durchschnittlichen Gewichten von Neodymmagneten in Raumklimaanlagen liegen aus einer Untersuchung in Japan vor (NEDO 2013) (100 g/Raumklimaanlage). Bei einer Zusammensetzung der Magnete von 20 % Nd, 5 % Dy und 1 % Tb (Graedel 2011) ergaben sich die in der folgenden Tabelle beschriebenen Mengenströme. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Marktdurchdringung in Deutschland in der gleichen Geschwindigkeit erfolgte, wie von NEDO (2013) für Japan angegeben wurde.

Tabelle 159: In Verkehr gebrachte Metallmengen in Raumklimaanlagen

Jahr	iVgM mit Neodym (Stück)	Nd-Menge (kg)	Dy-Menge (kg)	Tb-Menge (kg)
2005	0	0	0	0
2006	38.106	762	191	38
2007	84.303	1.686	422	84
2008	107.793	2.156	539	108
2009	128.956	2.579	645	129
2010	146.578	2.932	733	147
2011	155.934	3.119	780	156
2012	163.668	3.273	818	164
2013	173.538	3.471	868	174
2014	181.693	3.634	908	182
2015	190.034	3.801	950	190
2016	196.233	3.925	981	196
2017	202.520	4.050	1.013	203
2018	206.787	4.136	1.034	207
2019	211.098	4.222	1.055	211
2020	215.453	4.309	1.077	215

Ergebnisse

Für die Berechnung der in 2020 zu erwartenden Metallmengen wurde entsprechend der obigen Ausführungen eine Verweildauer von 11 Jahren angenommen. Für den Weibullformparameter finden sich in Nies (2010) zahlreiche Angaben, die sich zwischen 1,87 und 3 bewegen. Diese beiden Werte wurden daher für die Berechnungen genutzt.

Die zu erwartenden Metallmengen im Jahr 2020 sind in Tabelle 159 dargestellt. Es ergaben sich zwischen 2.036 und 2.135 kg Neodym (im Mittel 2.086), zwischen 509 und 534 kg Dysprosium (im Mittel 522 kg) sowie zwischen 102 und 107 kg Terbium (im Mittel 105 kg).

Tabelle 160: Metallmengen aus Raumklimaanlagen

K-Wert	Nd in 2020 [kg]	Dy in 2020 [kg]	Tb in 2020 [kg]
k=1,87	2.135	534	107
k=3,0	2.036	509	102

Weiße Ware

Neodym-Magnete können in Haushaltsgroßgeräten (HHGG) wie z. B. Waschmaschinen und Kühl-/Gefriergeräten eingesetzt werden, um die Leistung der jeweiligen Komponente (z. B. Antriebsmotor, Umwälzpumpe) zu vergrößern bzw. ihre Baumaße zu verringern.

In Verkehr gebrachte Mengen

In den Statistiken von Herstellerverbänden und der statistischen Institutionen werden Neodym-Geräte nicht separat ausgewiesen. Daher wurden Gespräche mit europäischen Hausgeräteherstellern (Electrolux, Miele, Bosch Siemens Hausgeräte) zur Verwendung von Motoren mit Neodymmagneten in HHGG geführt.

Danach werden Neodym-Magnete nur in wenigen Premiummodellen eingesetzt. Als Gründe hierfür wurden genannt, dass die Notwendigkeit verringerter Baumaße bei erhöhter Leistung in diesem Produktsegment nur in Ausnahmefällen besteht und die höheren Kosten der Komponenten daher nicht gerechtfertigt sind. Ihr Anteil an der Gesamtgruppe der HHGG wurde einheitlich mit deutlich unterhalb des Promillebereichs geschätzt. Eine Anfrage bei der japanischen New Energy and Industrial Technology Development Organisation (NEDO) ergab einen Marktdurchdringungsgrad in Japan von deutlich unter 20%. Zu den weiteren Planungen zur Verwendung von Neodym-Magneten wurde mit Hinweis auf Betriebsgeheimnisse in den Interviews keine Auskunft gegeben.

Aufgrund der Interviewergebnisse wurde davon ausgegangen werden, dass die Mengenrelevanz dieses Anwendungsbereichs im Betrachtungszeitraum des ReStra-Projektes in einer zu vernachlässigenden Größenordnung liegt.

5.3.17 Keramiken

Für die Produktgruppe Keramiken hat sich eine Relevanz für Yttrium sowie mit Einschränkung Cer gezeigt.

5.3.17.1 Produktidentifizierung

Für die beiden Metalle lassen sich im Wesentlichen zwei relevante Anwendungen identifizieren, der Einsatz in Keramiken als Schleifmedium (vgl. Noboran Ltd 2011b, 2011a; Rajpurohit Group of Enterprises 2012; Chen und Liu 2002) sowie in keramischen Hitzeschutz-Beschichtungen in Gasturbinen (Reidy und Simkovich 1993; Cao et al. 2004; Clarke und Phillpot 2005; He et al. 1999).

Als weiteres Anwendungsfeld lassen sich Elektrolyten-Membranen in Brennstoffzellen nennen (vgl. Luo et al. 2004; U.S. Department of Energy 2011c; Rajashekara et al. 2006; Automotive Fuel Cell Cooperation; Scientific America; Hertz et al. 2009), wobei die Betrachtung dieser Anwendung innerhalb der Produktgruppe Brennstoffzellen erfolgt, sofern eine Mengenrelevanz festgestellt wird.

Als Produkte für die weitere Analyse ergaben sich also (geordnet nach vermuteter Mengenrelevanz) Schleifkeramiken/-medien und keramische Hitzeschutzbeschichtungen in Gasturbinen.

5.3.17.2 Produktanalyse

Die beiden relevanten Produkte innerhalb der Produktgruppe Keramiken sind zum einen Schleifkeramiken und zum anderen Hitzeschutzkeramiken, die in Gasturbinen und Flugzeugtriebwerken zum Einsatz kommen. Die Betrachtung der beiden Produkte erfolgt aufgrund ihrer Verschiedenheit getrennt voneinander in den folgenden Abschnitten 0 und 0 (bzw. 0 und 0). In beiden Produkten ergab sich die Relevanz in erster Linie aus Yttrium stabilisiertem Zirkondioxid (ZrO_2) (YSZ) bzw. Cer stabilisiertem Zirkondioxid (CSZ).

Schleifkeramiken

Bei Schneidkeramiken gibt es Materialien aus ZrO_2 mit Y, Ce und Mg-Dotierungen (Görke 2012). Relevant für die Betrachtung ist hier in erster Linie das Yttrium-stabilisierte Zirkondioxid. Die Datenlage zum Einsatz strategischer Metalle in Schleifkeramiken stellt sich insgesamt sehr schwierig dar. Für den deutschen Markt sind hier in erster Linie Produkte der Hersteller Treibacher Schleifmittel GmbH, 3M und Saint Gobain relevant (Niehuhr 2012).

In Verkehr gebrachte Menge

Über den Verband Deutscher Schleifmittelwerke mit Sitz in Bonn (VDS-Bonn) konnten Angaben zur Einfuhr von künstlichem Korund und Siliciumcarbid bezogen werden. In 2011 wurden demnach 132.000 Tonnen künstliches Korund und 140.600 Tonnen Siliciumcarbid eingeführt. Welcher Teil hiervon allerdings in der Schleifmittelindustrie weiterverarbeitet wurde, ist nicht bekannt (Grecksch 2012). Daten speziell zu den hier relevanten Schleifmitteln konnten weder über die Verbände noch über Hersteller oder sonstige Statistiken bezogen werden. Von den als maßgeblich relevant identifizierten Herstellern gab es ebenfalls keine bzw. keine positive Rückmeldung zu den entsprechenden Anfragen.

Metallkonzentration im Produkt

Durch eine Herstellerbefragung konnten Erkenntnisse über die Metallkonzentration im Produkt erlangt werden. Demnach werden Seltene Erden in Sinterkorunden bzw. Sol-Gel-Schleifkornmaterialien eingesetzt (Niebuhr 2012). Wie eingangs erwähnt sind für den deutschen Markt die Produkte der Hersteller Treibacher Schleifmittel GmbH, 3M und Saint Gobain relevant (Niebuhr 2012).

Von anderen Herstellern wurde bestätigt, dass keine Seltenen Erden in der Produktion eingesetzt werden. Eine Übersicht der angefragten Hersteller findet sich in Tabelle 161.

Tabelle 161: Schleifmittelhersteller ohne Verwendung Seltener Erden

Hersteller	Verwendung SE	Quelle	Anmerkung
Zische Schleifwerkzeuge	keine SE	(Zische 2012)	
Atlantic Bonn	keine SE	(Poetzsch 2012)	„keine SE bei der Herstellung von Kunstharz bzw. keramisch gebundenen Schleifwerkzeugen“
KREBS & RIEDEL	keine SE	(Niebuhr 2012)	keine SE in Schleifwerkzeugen keramischer oder mit Kunstharzbindung
Butzbacher Schleifmittel-Werke GmbH	keine SE	(Schwanzara 2012)	
Lukas Erzett Vereinigte Schleif- und Fräswerkzeugfabriken GmbH & Co. KG	keine SE	(Minkus 2012)	
DRONCO AG	keine SE	(Adasch 2012)	kunststoffgebundene, metallgebundene Schleifmittel
Treibacher Schleifmittel GmbH	SE		keine Rückmeldung
3M	SE		keine Rückmeldung
Saint Gobain	SE		keine Rückmeldung
Zirox Technologies	SE	(Singh 2012)	

Der Yttriumanteil in YSZ-Schleifkeramiken beträgt laut einer Herstellerankunft zwischen 4,9 % und 5,4 %. Der Ceranteil in CSZ Schleifkeramiken bewegt sich zwischen 17 % und 20 % (Singh 2012). Auf der Herstellerwebseite von Saint-Gobain werden deutlich abweichende Gehalte genannt. Hier liegt der Yttriumanteil im Material zwischen 0,65 % und 0,8 % (Saint-Gobain 2007a, 2007c, 2007b). Allerdings macht hier ZrO₂ auch nur 39 % des Gesamtmaterials aus, während 60 % Aluminiumoxid (Al₂O₃) sind. Von den weiteren als relevant identifizierten Herstellern 3M und Treibacher konnten keine Informationen gewonnen werden. Für den deutschen Markt gab es bei der Hersteller- und Expertenbefragung keine Hinweise auf eine besondere Relevanz von Cer

(Ausnahme Cer als Poliermittel in der optischen Industrie); lediglich auf die Verwendung von Yttrium bei den Herstellern 3M, Saint Gobain und Treibacher wurde verwiesen.

Exporte aus der Nutzungsphase

Schleifmittel werden während der Nutzung nach und nach abgetragen, bis sie schließlich durch neue ersetzt werden. Exporte aus der Nutzungsphase sind hier nicht anzunehmen.

Ergebnisse

Für ein Vorgehen über die Metallkonzentration im Produkt sowie die in Verkehr gebrachte Produktmenge unter Anwendung der Weibullverteilung waren keine entsprechenden Daten verfügbar. Daher erfolgte eine grobe Abschätzung anhand einer Herstellerabschätzung bezüglich des weltweiten Einsatzes und des Anteils Deutschlands am Weltmarkt.

Bezogen auf Europa beträgt der Marktanteil gebundener Schleifmittel, unter die die betrachteten Schleifmittel fallen, rund 26 % bei einem Marktvolumen von 3,2 Mrd. Euro (Material Technology Publications in: Winterthur Technology Group (2008)). Deutschland hat einen Marktanteil von rund 27 % (Briggs 2008), was einem Umsatz mit gebundenen Schleifmitteln von rund 225 Mio. Euro entspricht.

Das globale Marktvolumen für Schleifmittel wird für das Jahr 2012 auf rund 28 Mrd. USD beziffert. Für 2018 wird ein Marktvolumen von rund 36 Mrd. USD vorhergesagt (MarketResearch.com 2012). In Euro entspricht dies etwa 21,4 Mrd. Euro in 2012 und 27,5 Mrd. Euro in 2018. Unter der Annahme, dass der Anteil gebundener Schleifmittel in Europa sich auf die weltweite Situation übertragen lässt, ergibt dies ein weltweites Marktvolumen für gebundene Schleifmittel von rund 5,564 Mrd. Euro in 2012. Deutschland hat hieran einen Anteil von rund 4 %.

Laut einer Hersteller- bzw. Experteneinschätzung beträgt die weltweite Einsatz- bzw. Abfallmenge von YSZ in Schleifmitteln pro Jahr 75 bis 100 t (Singh 2012). Bzgl. der Y-Konzentration besteht eine größere Schwankungsbreite von 0,65 % bis 5,4 %. Entsprechend groß fällt mit 487,5 kg bis 5.400 kg auch die mögliche Bandbreite der weltweit für Schleifmittel eingesetzten Yttriummenge aus. Wendet man hierauf den Umsatzanteil Deutschlands von 4 % an, ergibt sich eine in Deutschland über Schleifmittel in Verkehr gebrachte Yttriummenge von 19,5 kg bis 216 kg.

Bezüglich der zukünftigen Entwicklung gibt es verschiedene Annahmen. So wird in Briggs (2008) ein jährliches Wachstum ab 2010 von 3 % angegeben bezogen auf Europa für Schleifmittel insgesamt. Für den weltweiten Markt wird in Dedalus Consulting (2008) ein Wachstum von jährlich 5,6 % erwartet. Speziell für SE-haltige gebundene Schleifmittel wird laut einer Herstellerankunft eine Verzehnfachung des Marktvolumens bis 2020 erwartet (Singh 2012). Entsprechend dieser Einschätzungen wurden drei Szenarien untersucht. Ein jährliches Wachstum um 3 % bis 2020, sowie 5,6 % und eine Verzehnfachung bis 2020 (rund 33 % jährliches Wachstum).

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 162 stellt die Berechnungsergebnisse dar.

Tabelle 162: Abschätzung Yttrium aus Schleifmitteln

Szenario	YSZ-Menge weltweit in 2020 [t]	YSZ-Menge in D in 2020 [t]	Y-Menge in 2020 [kg]
3%/a Wachstum	95 - 127	3,8 - 5,1	24,7 - 275,4
5,6%/a Wachstum	116 - 155	4,6 - 6,2	29,9 - 334,8
Verzehnfachung bis 2020	750 - 1.000	30 - 40	195 - 2.160

Hitzeschutzkeramiken

Hitzeschutzkeramiken, engl. thermal barrier coatings (TBC), kommen in Gasturbinen zum Einsatz, wo sie dazu dienen, die Turbinenkomponenten vor dem heißen Gasstrom zu isolieren (Battista 2007). Solche Gasturbinen werden bei Brennkammertemperaturen bis 1.400°C betrieben, weswegen die Schaufeln und Brennkammerauskleidung, die meist aus Ni-Superlegierungen bestehen, mit einer keramischen Wärmedämmschicht beschichtet werden (Schweda 2010). Als Keramikwerkstoff hat sich hier Zirkonoxid durchgesetzt, dem Yttriumoxid (Y₂O₃) zugegeben wird (Subanovic 2009). Dieses mit Yttrium stabilisierte Zirkonoxid (YSZ) stellt derzeit das Standardmaterial für Wärmedämmschichten in den Brennkammern von Gasturbinen dar und wird von nahezu allen Herstellern⁴⁴ eingesetzt (Sopka 2012).

Ein Anwendungsgebiet sind stationäre Gasturbinen. Daneben finden TBC mit Yttriumzusatz Anwendung in Flugzeug- bzw. Jet-Turbinen. Neben den Turbinen großer Hersteller wie Rolls-Royce für Passagierflugzeuge bspw. der Hersteller Airbus und Boeing betrifft dies auch militärische Flugzeuge wie die F15 Eagle und der F16 Fighting Falcon des US-amerikanischen Militärs (Lugscheider et al. o.J.; Toriz et al. 1989; Hedrick 2004; Parsons und Chatterton 2011; Rolls-Royce 2011), wobei Letztere nicht näher betrachtet werden. In (Troczynski et al. 1996) wird der Anteil der Anwendung in Flugzeugen für das Jahr 1995/1996 sogar auf 90 % des gesamten Einsatzes von TBC beziffert.

Der weltweite Gasturbinenmarkt wird auf rund 42 Mrd. USD (Stand 2010) beziffert, wovon rund 65 % auf Flugzeugturbinen und der Rest auf stationäre Gasturbinen fallen (Clarke et al. 2012).

Bei der Untersuchung von Hitzeschutzkeramiken erfolgte bzgl. der in Verkehr gebrachten Menge sowie der Verweildauer eine getrennte Betrachtung der beiden Anwendungsfelder.

Stationäre Gasturbinen

Stationäre Gasturbinen sind im Leistungsbereich von einigen wenigen Kilowatt bis hin zu über 250 MW als Bestandteil von kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozessen zu finden. Die kleineren Gasturbinen sind hingegen eher in dezentralisierten industriellen Versorgungseinrichtungen zu finden (Lechner und Seume 2010). Diese beiden prinzipiell zu unterscheidenden Arten von Gasturbinen (dezentral und zentral) weisen meist unterschiedliche Betriebsweisen auf (Zahl der Hochfahrläufe, Laständerungen, Abschaltungen), was sich in unterschiedlicher Lebensdauer der

⁴⁴ Laut einer weiteren Experteneinschätzung ist von einem Marktanteil von TBC mit SE-Anteil von mind. 90 % auszugehen (Kosowski 2012).

Beschichtung widerspiegelt (Lechner und Seume 2010). Entsprechend erfolgt die Datenerhebung und Berechnung teilweise für die beiden Arten getrennt voneinander.

Metallkonzentration im Produkt

Die Konzentration von Yttrium in der Beschichtung konnte aufgrund einer Hersteller- und Expertenbefragung sowie einer Literaturrecherche ermittelt werden. Zusätzlich wurde nach der Menge der verwendeten Beschichtung pro Turbine recherchiert, um Rückschlüssen auf die Metallkonzentration im Produkt zu erlangen.

Bzgl. des Y_2O_3 -Gehalts haben sich anhand Expertenbefragung und Literaturrecherche weitestgehend übereinstimmende Werte ergeben, wie in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 163: Y_2O_3 -Gehalte in Wärmedämmschichten

Y_2O_3 Anteil in YSZ	Datenherkunft
6-8 Gew.-%	(Batista 2007; Nelson und Orenstein 1997)
7 Gew.-%	(Subanovic 2009; Clarke et al. 2012; Vaßen et al. 2012)
7 Gew.-% ⁴⁵	(Schweda 2010)
7-8 Gew.-%	(Czech 2010; Dorfmann und Dambra 2001; Schulz 2013)
8 Gew.-%	(Sopka 2012; Bacos et al. 2011; Trunova et al. 2008)
11 Gew.-% ⁴⁶	(Schweda 2010)
3-8mol%	(Görke 2012)

Der Y_2O_3 -Gehalt im YSZ bewegt sich demnach zwischen 6 und maximal 11 Prozent, wobei meist 7 bis 8 % angegeben werden. Auch in Herstellerangaben werden 8 Gew.-% als Y_2O_3 -Gehalt genannt. Auf Basis dieser Werte ist nun die Y_2O_3 -Menge pro Megawatt zu ermitteln. Laut Auskunft der Firma Alstom haben die Wärmedämmschichten auf den inneren Wänden der Brennkammern und auf den ersten Schaufelreihen der Turbinen eine typische Dicke von 0,5 - 1,5 mm (Sopka 2012). Andere Expertenauskünfte liegen geringfügig niedriger 400-500 µm (Lemke 2013). Die beschichtete Fläche ist abhängig von der Baugröße der Maschine. Sie liegt bei großen Gasturbinen in der Größenordnung von einigen zehn Quadratmetern. Für große Turbinen, das heißt Turbinen der Leistungsklasse 150 bis 300 MW⁴⁷, ergibt sich damit ein Materialgewicht der keramischen Beschichtung von rund 400 kg und damit laut Herstellerangabe rund 40 kg Y_2O_3 pro Gasturbine (Sopka 2012). Andere Expertenangaben nennen für große stationäre Gasturbinen bis zu 200 g YSZ pro Turbinenschaufel bei etwa 100 beschichteten Schaufeln und nochmals derselben Beschichtungsmenge in der Brennkammer und bewegen sich somit in derselben Größenordnung. Legt man 7 Gew.-% bzw. 8 Gew.-% zu Grunde, ergeben sich 28 kg bzw. 32 kg Yttrium pro Turbine. Bezogen auf die Leistung ergibt dies zwischen 0,09 und 0,21 kg Y_2O_3 pro Megawatt bzw. rund 70,8 bis 165,3 g Yttrium pro Megawatt. Für die Berechnung wurde hierauf aufbauend ein mittlerer Wert

⁴⁵ Angabe für die erfahrungsgemäß längste Lebensdauer bei thermozyklischer Belastung.

⁴⁶ Maximaler Gehalt.

⁴⁷ Alstom bietet Gasturbinen der Leistungsklassen von 113 MW bis 296 MW an (Alstom 2013).

von 118 g Yttrium pro Megawatt angenommen. Der obere und untere Wert der Yttriumkonzentration wurden zusätzlich untersucht.

In Verkehr gebrachte Mengen

Daten zum Bestand an Gasturbinen stammen zum einen aus einer Statistik der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (ASUE 2006). Hier sind Turbinen der dezentralen industriellen und kommunalen Energieversorgung aufgeführt. Zum anderen wurde eine Statistik des Umweltbundesamtes zum Kraftwerksbestand herangezogen (UBA 2012).

In der ASUE Statistik sind für Ende 2005 341 Gasturbinen in 238 Anlagen der industriellen und kommunalen Energieversorgung mit einer gesamten installierten elektrischen Leistung über 7.000 MW aufgeführt. Dies entspricht einem Anstieg von 65 % gegenüber 1996 (ASUE 2006). In (UBA 2012) sind Gaskraftwerke mit einer Leistung von mehr als 100 MW aufgeführt, die Gesamtleistung der Gaskraftwerke summiert sich (Stand 2012) auf rund 24.800 MW. Daten zur zukünftigen Entwicklung des Bestands an Gaskraftwerken wurden aus (BDEW 2012) entnommen. Für die dezentralen Anlagen wurde ausgehend der historischen Bestandsentwicklung (vgl. Abbildung. 32) von einem Wachstum um 3.000 MW über 10 Jahre ausgegangen. Da sich die erhobenen Daten zur Metallkonzentration auf die Leistung in MW beziehen, genügt es auch für die Zeitreihen zur Inverkehrbringung die Leistung in MW zu betrachten. Die in Verkehr gebrachte Menge an Hitzeschutzbeschichtungen ergibt sich aus dem Bestand der installierten Leistung als der Austausch bestehender Beschichtung sowie aus der neu-installierten Leistung. Bzgl. der im Bestand vorhandenen Beschichtung sind keine Daten zur Altersstruktur vorhanden. Daher wird hier als Näherung entsprechend der durchschnittlichen Verweildauer von vier bzw. fünf Jahren (siehe Abschnitt *Verweildauer*) von einem Austausch eines Viertels bzw. eines Fünftels der im Jahr 2008 bestehenden Beschichtung ausgegangen. Die Beschichtung der ab 2009 neu-installierten Kraftwerksleistung wird zusätzlich berechnet. Die jährlich in Verkehr gebrachte Materialmenge ergibt sich als die Summe aus Austausch und Neu-Installation. In Tabelle 164 und Tabelle 165 sind die resultierenden Zeitreihen für die in Verkehr gebrachten Metallmengen im Referenzszenario (118 g/MW) dargestellt; aufgeführt sind hier die Jahre ab 2012, da diese für die Berechnung der Metallmengen bezogen auf 2012 die größte Relevanz aufweisen.

Tabelle 164: Installierte Leistung von Gaskraftwerken und resultierende Materialmengen

Jahr	Installierte Leistung [MW]	Durch Austausch der Beschichtung im Bestand von 2008 in Verkehr gebrachte Y-Menge [kg]	Durch Neu-Installation in Verkehr gebrachte Y-Menge [kg]	Gesamte in Verkehr gebrachte Y-Menge [kg]
2012	24.796	524	288	812
2013	25.077	524	189	713
2014	25.997	524	296	820
2015	26.530	524	278	802
2016	26.530	524	236	760
2017	29.030	524	542	1.067
2018	29.630	524	350	874
2019	30.830	524	142	666
2020	30.830	524	313	837

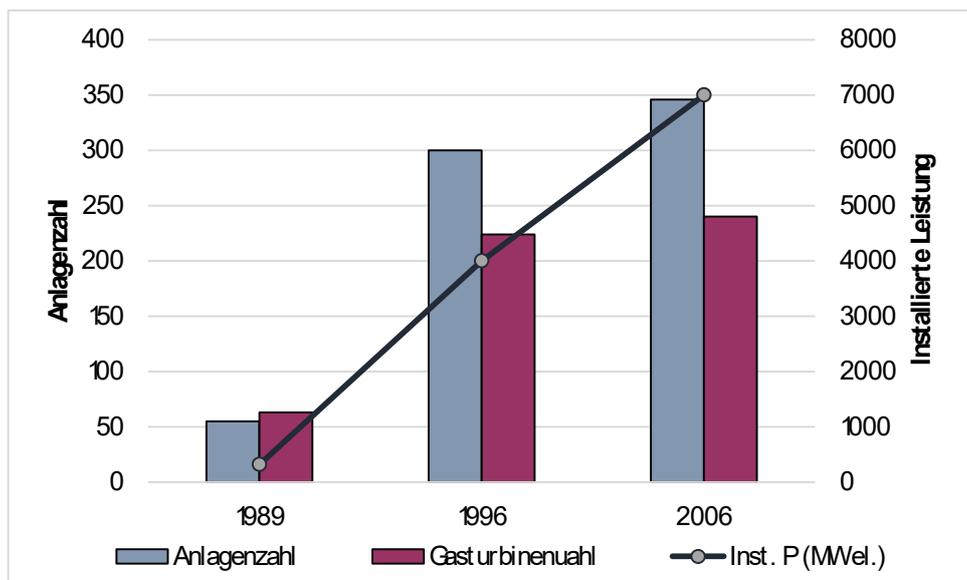
Quelle: ASUE 2006; UBA 2012; BDEW 2012 und eigene Berechnungen

Tabelle 165: Installierte Leistung dezentraler Gasturbinen und resultierende Materialmengen

Jahr	Installierte Leistung [MW]	Durch Austausch der Beschichtung im Bestand von 2008 in Verkehr gebrachte Y-Menge [kg]	Durch Neu-Installation in Verkehr gebrachte Y-Menge [kg]	Gesamte in Verkehr gebrachte Y-Menge [kg]
2012	8.800	201	38	238
2013	9.100	201	42	242
2014	9.400	201	47	248
2015	9.700	201	54	254
2016	10.000	201	61	261
2017	10.300	201	68	268
2018	10.600	201	75	275
2019	10.900	201	82	283
2020	11.200	201	89	290

Quelle: ASUE 2006 und eigene Berechnungen

Abbildung. 32: Veränderung der Anlagenzahl und Leistung



Quelle: basierend auf ASUE 2009

Verweildauer

Die keramische Hitzeschutzbeschichtung in Gasturbinen wird nach einer gewissen Anzahl von Betriebsstunden ersetzt bzw. erneuert. Die Angaben in der Literatur zur Dauer bis zum Austausch bewegen sich zwischen 24.000 und 33.000 Stunden (Subanovic 2009; Czech 2010; Nelson und Orenstein 1997; Clarke et al. 2012; Padture 2002). Dies deckt sich mit Hersteller- bzw. Expertenangaben, die sich auf 24.000 bzw. 25.000 bis 30.000 Betriebsstunden bis zum Austausch belaufen (Schulz 2013; Lemke 2013).

Für die jährlichen Betriebsstunden eines Gaskraftwerks liegen die Angaben meist zwischen 6.700 und 8.000 Stunden pro Jahr (Heinloth 2003; Wenk 2011; Stadtwerke Leipzig 2012). In Verbindung

mit den Angaben zur Lebensdauer der Wärmedämmschichten ergibt sich hieraus eine Verweildauer von TBC in Gaskraftwerken zwischen 3 und 5 bzw. durchschnittlich 4 Jahren.

Für dezentrale Gasturbinen außerhalb von Gaskraftwerken finden sich deutlich geringere Angaben zu den Betriebsstunden, da diese zum großen Teil für Spitzenlastanwendungen eingesetzt werden. Typischerweise liegt die Auslastung von solchen Spitzenlast-Maschinen im Jahr bei ca. 500 bis 2000 h bei einer Startzahl von 100 - 200 pro Jahr, d.h. ca. 5 - 10 Betriebsstunden pro Start (Lechner und Seume 2010). Hieraus ergäbe sich theoretisch eine Verweildauer der Wärmedämmschichten von 12 bis 66 Jahren. Da aber neben der reinen Betriebsstundenzahl für die Haltbarkeit der Wärmedämmschicht auch die Anzahl der Starts sowie die Betriebszeit bei Spitzenlast eine Rolle spielt, ist von einer deutlich geringeren Verweildauer auszugehen. Die äquivalenten Betriebsstunden, die neben der Betriebsdauer auch die Zahl der Starts, die Betriebsdauer bei Spitzenlast sowie die Betriebstemperatur berücksichtigen, liegen bei solchen Spitzenlastanlagen um einen Faktor von 4 - 8 (je nach Betriebsweise auch noch höher) über den Betriebsstunden (Babar 2013; Lechner und Seume 2010). Entsprechend reduziert sich die berechnete Verweildauer auf 1,5 bis 16,5 Jahre. Für die Berechnung wurde eine konservative Annahme von 5 Jahren getroffen.

Ergebnisse

In NIES (2010) findet sich für Antriebe und Turbinen („engines and turbines“) ein k-Wert von 2,03. Sonstige Literaturangaben zu den Weibullparametern inklusive des Formparameters k waren nicht verfügbar. Dies liegt insbesondere auch darin begründet, dass es sich bei der Beschichtung um eine Teilkomponente handelt, die unabhängig vom eigentlichen Produkt (der Gasturbine) entsorgt und ersetzt wird. Entsprechend wurde die Analyse für einen Wert des Formparameters k von 2 und eine Verweildauer von 4 bzw. 5 Jahren durchgeführt. Zusätzlich wurden k-Werte von 1,5 und 2,5 untersucht, um potenzielle Abweichungen aufzuzeigen. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 166 dargestellt. Es ergab sich eine zu erwartende Yttriummenge in 2020 von 969 kg im Referenzszenario bzw. bei Variation von Formparameter und Metallgehalt von 582 bis 1.396 kg.

Tabelle 166: Yttriummengen in 2020 aus stationären Gasturbinen

Produkt	k-Werte	Menge in 2020 [kg] (Referenzszenario: 118 g/MW)	Menge in 2020 [kg] (70,8 g/MW)	Menge in 2020 [kg] (165,3 g/MW)
Dezentrale Gasturbinen	2	256	154	359
	1,5	243	146	341
	2,5	268	161	376
Zentrale Gasturbinen	2	713	428	999
	1,5	685	411	959
	2,5	728	437	1.020
Gesamt	2	969	582	1.358
	1,5	928	557	1.300
	2,5	996	598	1.396

Flugzeugtriebwerke

Im Bereich der Flugzeugtriebwerke sind für die Untersuchung des Einsatzes Seltener Erden in Hitzeschutzbeschichtungen in erster Linie sogenannte Turbofantriebwerke relevant. Daneben kommen diese auch in Turbojettriebwerken von militärischen Maschinen zum Einsatz, welche aber nicht näher untersucht wurden. In Turbofantriebwerken ist der relevante Beschichtungstyp an den Turbinenschaufeln sowie in der Brennkammer zu finden.

Metallkonzentration

Im Vergleich zu stationären Gasturbinen sind bei der Hitzeschutzbeschichtung in Luft- und Raumfahrtanwendungen deutlich geringere Schichtdicken zu finden (Dorfmann und Dambra 2001). In Strangman (1985) wird die Schichtdicke mit 50 bis 250 μm angegeben (bei einem Y_2O_3 -Gehalt von 8 Gew.%), in (Nissley 1995) ist von einer Schichtdicke von 254 μm die Rede. In derselben Größenordnung bewegen sich mit 250 μm auch Angaben von Rolls-Royce (Rolls-Royce 2011). Andere Expertenangaben nennen lediglich 120 μm Schichtdicke (Lemke 2013).

Bzgl. des Y_2O_3 -Gehalts in der Wärmedämmschicht finden sich hier zwar teilweise ebenfalls Angaben von 7 bis 8 Gew.-% (Strangman 1985; Peters et al. 1997; Troczynski et al. 1996; Nissley 1995; Pature 2002), was auch von manchen Experten als realistisch eingeschätzt wird (Schulz 2013). Andere Hersteller/Experten geben jedoch einen Gehalt von rund 8 mol-% (13,7 Gew.%) (Seitz 2013) bzw. 7 bis 9 mol.-% (Sulzer Metco 2012a, 2012b) an, ein Gehalt, der als repräsentativ für den deutschen Markt einzustufen ist, da er sich speziell auf hier eingesetzte Flugzeugtriebwerke bezieht.

Die Mengenangaben zur Beschichtung in Flugzeugtriebwerken reichen von 3 - 5 g ZrO_2 pro Turbinenschaufel, über 10 g pro Schaufel (Parsons und Chatterton 2011), bis zu einigen 10 g pro Schaufel (Schulz 2013). Letztere Angabe deckt sich mit Herstellerangaben, laut denen die Mengen pro Turbinenschaufel zwischen 10 und 45 g (Seitz 2013a) bzw. 10 bis 50 g (Doebber 2013) liegen. Auf dieser Basis ergeben sich bei 80 bis 200 beschichteten Turbinenschaufeln sowie beschichteter Brennkammer zwischen 3 kg und 7 kg YSZ pro Triebwerk. Für die Berechnung wurde ein mittlerer Wert von 5 kg verwendet. Bei einem Yttriumgehalt von 8 mol.-% ergibt dies eine Yttriummenge von 685 g pro Triebwerk (bzw. 411 g bei 3 kg YSZ und 959 g bei 7 kg YSZ).

In Verkehr gebrachte Mengen

Für die Bestimmung der Inverkehrbringung von Hitzeschutzbeschichtung (TBC) in Flugzeugtriebwerken wurden der Bestand an Flugzeugen und Informationen über Flugzeugbestellungen und Prognosen zur zukünftigen Entwicklung bzw. darauf aufbauend der Bestand an Triebwerken in den relevanten Jahren 2016 - 2020 herangezogen.

Für die Bestimmung des Flugzeugbestands erfolgt eine detailliertere Betrachtung der Flugzeugflotten der fünf größten deutschen Airlines, Lufthansa German Airlines, Air Berlin, Germanwings, TUIfly und Condor Flugdienst. Gemeinsam decken diese Airlines rund 98 % der von deutschen Airlines angebotenen Flüge ab (DLR Köln). Der Flugzeugbestand dieser Airlines ist in Tabelle 167 dargestellt.

Tabelle 167: Flugzeugbestand der fünf größten deutschen Airlines

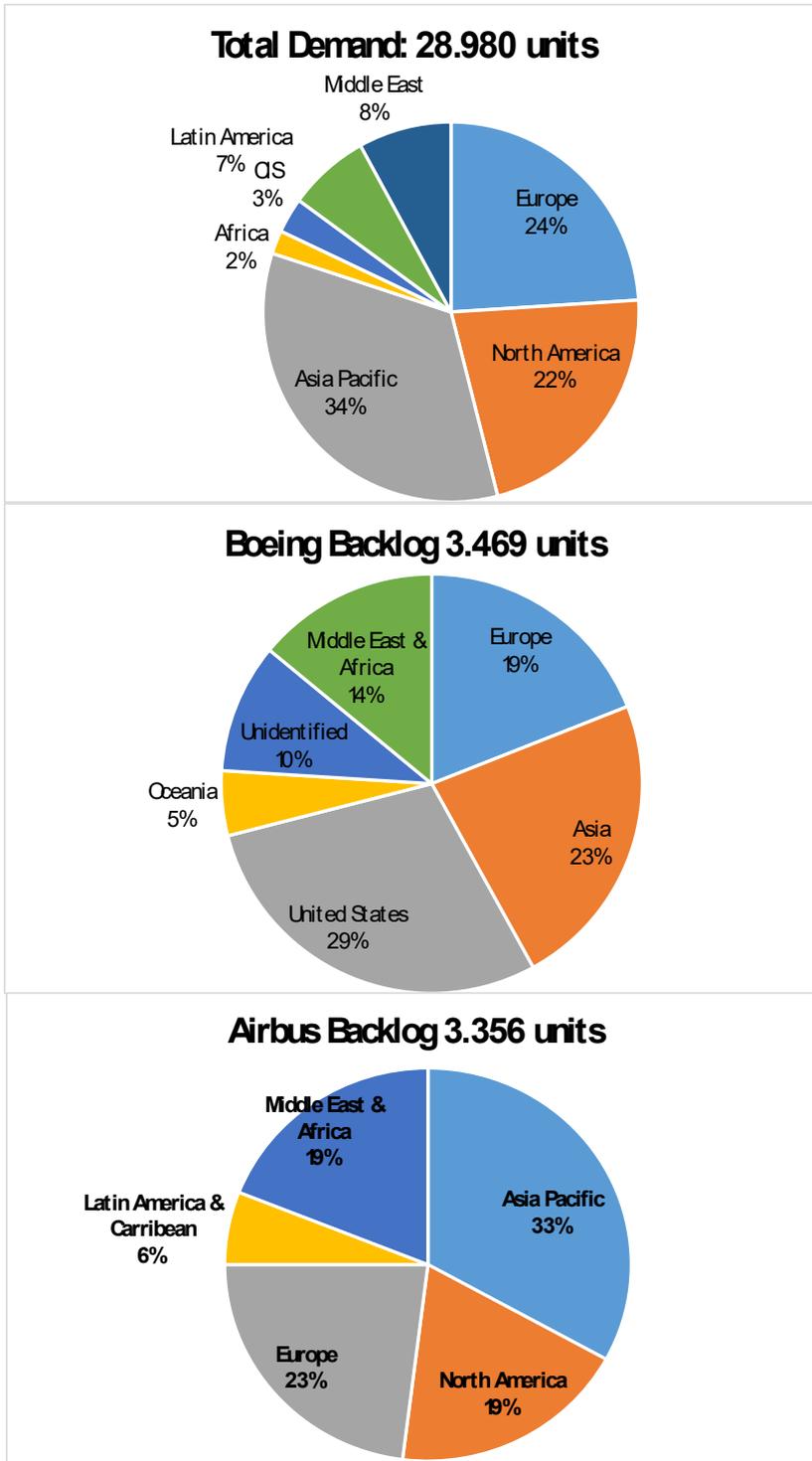
Betreiber	Hersteller	Typ	Anzahl Maschinen	Anzahl Triebwerke	Summe Triebwerke
Luft-hansa	Airbus	A380-800	10	4	40
	Boeing	747-8	4	4	16
	Boeing	747-400	25	4	100
	Airbus	A340-600	24	4	96
	Airbus	A340-300	24	4	96
	Airbus	A330-300	18	2	36
	Boeing	737-800 IGW	3	2	6
	Airbus	A321-100/200	62	2	124
	Airbus	A320-200	49	2	98
	Airbus	A319-100	35	2	70
	Boeing	737-500	30	2	60
	Boeing	737-300	43	2	86
	Embraer	ERJ-195	19	2	38
	Embraer	ERJ-190	9	2	18
	Bombardier	CRJ900	12	2	24
	Bombardier	CRJ700/200	20	2	40
	ATR	72-500	11	2	22
	Bombardier	Dash 8 Q400	14	2	28
	McDonnell Douglas/Boeing	MD-11F	18	3	54
Air Ber- lin	Airbus	A330-300	2	2	4
	Airbus	A330-200	13	2	26
	Airbus	A321-200	12	2	24
	Airbus	A320-200	27	2	54
	Airbus	A319-112	1	2	2
	Boeing	737-800	36	2	72
	Boeing	737-700	18	2	36
	Bombardier	Dash 8 Q400	10	2	20
Condor	Airbus	A320-200	12	2	24
	Airbus	A321-200	1	2	2
	Boeing	757-300	13	2	26
	Boeing	767-300ER	12	2	24
German- Wings	Airbus	A319-100	32	2	64
	TUIfly				
	Boeing	737-700	10	2	20
	Boeing	737-800	25	2	50

Quelle: Lufthansa AG 2013; AirBerlin 2013b; Condor 2013; Germanwings 2013; TUIfly 2013

Für die Zukunft ist mit einem Wachstum des Bestandes zu rechnen. Für den Airline-Verkehr wird von einer Verdopplung in den nächsten 20 Jahren ausgegangen (Clarke et al. 2012). Abbildung.

33 zeigt den Bedarf und die Auftragslage der größten Hersteller Boeing und Airbus für die Jahre 2010 bis 2029.

Abbildung. 33: Bedarf und Auftragslage von Boeing und Airbus (2010-2020)



Quelle: basierend auf clearwater 2011

Für Deutschland wurde die zukünftige Entwicklung genauer anhand der Daten zu Flugzeugbestellungen der relevanten Airlines festgemacht. Die Flugzeugbestellungen bis zum Jahr 2020 sind in Tabelle 168 aufgeführt. Aufgrund der Durchschnittsalter der Flotten (AirBerlin: 5,2 Jahre AirBerlin 2013a; Lufthansa: 12,2 Jahre; TUIfly: 7,1 Jahre; Condor: 13,1 Jahre; Germanwings: 5,3 Jahre FOCUS Online 2013) sowie des erwähnten allgemeinen Wachstumstrends im Luftverkehr lässt sich die Ausmusterung von Flugzeugen aus dem Bestand als für die Analyse vernachlässigbar einstufen. Die Flugzeugbestellungen bzw. Daten zur Auslieferung beziehen sich jeweils auf eine Zeitspanne von mehreren Jahren. Für die Produktanalyse wurde davon ausgegangen, dass sich die Auslieferung gleich über die jeweilige Zeitspanne verteilt.

Tabelle 168: Flugzeugbestellungen deutscher Airlines bis 2020

Betreiber	Hersteller	Typ	Anzahl Maschinen	Anzahl TW	Summe Triebwerke
Lufthansa	Airbus	A380-800	9	4	36
	Boeing	747-8	20	4	80
	Airbus	A330-300	4	2	8
	Airbus	A320-200	69	2	138
Air Berlin	Airbus	A319/320/321	19	2	38
	Boeing	737-700/800	75	2	150
	Boeing	787	16	2	32
Condor	Airbus	A320/321	30	2	60
German Wings	Airbus	A320-200	8	2	16
TUIFly	Boeing	737-700/800	8	2	16

Quelle: Lufthansa AG 2012; AirBerlin 2013a; TAI 2012; Condor 2012

Der Gesamtbestand an Flugzeugen und somit an Triebwerken bzw. die Zeitreihe zur Inverkehrbringung ergab sich aus Bestand und Bestellungen. Aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauer der Hitzeschutzbeschichtung wurde hierbei zwischen Kurz- und Mittel-/ Langstreckenflugzeugen unterschieden. Die Einteilung in die beiden Kategorien erfolgte dabei entsprechend dem Einsatz, für den die jeweiligen Flugzeugtypen konzipiert wurden. Bzgl. des tatsächlichen Einsatzes der Flugzeuge sind dabei Abweichungen möglich.

Es ergaben sich folgende Zeitreihen für die Kurzstrecke und Mittel-/Langstrecke (Tabelle 169).

Tabelle 169: Entwicklung des Flugzeugs- und Triebwerksbestandes

Strecke	Jahr	Flugzeuge	Triebwerke
Kurzstrecke	2012	264	528
	2013	295	590
	2014	325	650
	2015	350	700
	2016	350	700
	2017	350	700
	2018	350	700
	2019	350	700
	2020	350	700
Mittel-/Langstrecke	2012	326	844
	2013	362	936
	2014	398	1028
	2015	423	1096
	2016	453	1156
	2017	482	1214
	2018	496	1242
	2019	498	1246
	2020	498	1246

Anhang dieser Zeitreihen lässt sich die pro Jahr in Verkehr gebrachte Menge an TBC bzw. an Yttrium abschätzen. Da keine Informationen zur Altersstruktur innerhalb der im Einsatz befindlichen Beschichtung vorliegen, wird für das Jahr 2012 (als Basisjahr) angenommen, dass die vorhandene Beschichtung in etwa einer homogenen Altersverteilung entspricht. D.h. in den folgenden Jahren werden jeweils entsprechend der Verweildauern 4/9 des Bestandes der Beschichtung von 2012 bei Kurzstreckenflugzeugen und 2/11 des Bestandes von 2012 bei Mittel- und Langstreckenflugzeugen ausgetauscht. Hinzu kommt die über neue Flugzeuge in Verkehr gebrachte Menge. Die gesamte in Verkehr gebrachte Menge ergibt sich als die Summe von beidem. Es ergaben sich die folgenden Zeitreihen für die in Verkehr gebrachte Metallmenge (Tabelle 170).

Tabelle 170: Über TBC in Flugzeugtriebwerken in Verkehr gebrachte Yttriummenge

Flugzeug	Jahr	Metallmenge (M) [kg] (Referenzszenario, 685g/TW)	Metallmenge (Y) [kg] (411 g/TW)	Metallmenge (Y) [kg] (959 g/TW)
Kurzstreckenflugzeuge	2012	160,7	96,4	225,0
	2013	203,2	121,9	284,5
	2014	202,9	121,8	284,1
	2015	199,2	119,5	278,9
	2016	169,5	101,7	237,3
	2017	174,0	104,4	243,6
	2018	177,3	106,4	248,3
	2019	179,5	107,7	251,3
	2020	180,6	108,3	252,8
	2012	105,1	63,	147,2

Flugzeug	Jahr	Metallmenge (Y) [kg] (Referenzszenario, 685g/TW)	Metallmenge (Y) [kg] (411 g/TW)	Metallmenge (Y) [kg] (959 g/TW)
Mittel- & Langstreckenflugzeuge	2013	168,1	100,9	235,4
	2014	169,8	101,8	237,7
	2015	158,0	94,8	221,1
	2016	118,1	70,9	165,3
	2017	124,7	74,8	174,6
	2018	129,5	77,7	181,4
	2019	132,6	79,6	185,6
	2020	134,2	80,5	187,9

Verweildauer

Die keramische Hitzeschutzbeschichtung in Flugzeugtriebwerken wird regelmäßig im Rahmen von Wartungen ausgetauscht. Angaben hierzu reichen von 5.000 Stunden bis über 20.000 Stunden. Der untere Bereich von 8.000 bis 10.000 Stunden gilt dabei eher für auf der Kurzstrecke eingesetzte Flugzeuge. Hier unterliegt die Beschichtung aufgrund der häufigeren Starts und Landungen und des ungleichmäßigeren Betriebs höheren Belastungen. Bei Mittel- und Langstreckenflugzeuge beträgt die Dauer 20.000 bis zu 23.000 Stunden (Schulz 2013; Seitz 2013; Lemke 2013). Entsprechend dieser Unterschiede erfolgt die Betrachtung getrennt nach Kurz- und Mittel-/Langstreckenflugzeugen bzw. Triebwerken. Als Werte für die Verweildauer werden 9.000 Stunden für Kurzstreckenflugzeuge bzw. 22.000 Stunden für Mittel- und Langstreckenflugzeuge verwendet.

Für die Bestimmung der Verweildauer der keramischen Hitzeschutzbeschichtung in Jahren muss die jährliche Zahl der Flugstunden herangezogen werden. In verschiedenen Quellen finden sich hierzu Angaben zwischen 3.000 und 5.000 jährlichen Flugstunden (aero.de 2012; Pandit 2011; Aircraft-commerce.com 2005; Heermann 2011; Aviation-Broker.com 2012; de.cn 2012; Krummheuer 2008; cuxhaven.de o.J.; flugzeugforum.de o.J.b, o.J.a; Heermann 2011). Ein klarer Unterschied zwischen Kurz- und Mittel-/Langstreckenflugzeugen lässt sich anhand dieser Zahlen nicht feststellen. Für die Berechnung wird ein mittlerer Wert von 4.000 Stunden angenommen.

Aus der Verweildauer der Beschichtung und den jährlichen Flugstunden ergeben sich folglich 2,25 Jahre für Kurzstreckenflugzeuge und 5,5 Jahre für Mittel- und Langstreckenflugzeuge.

Es ist nicht auszuschließen, dass geringe Materialmengen während der Nutzungsphase dissipieren. Limitierend für die Nutzung und die Begrenzung der Lebensdauer ist aber das Auftreten von Rissen und Deformationen in der Beschichtung (Trunova et al. 2008; Beck et al. 2008). Risse wurden auch von Experten als wesentliche Ursache für den Ersatz/Austausch der Beschichtungen bestätigt (Lemke 2013; Seitz 2013b). Nach einer Expertenauskunft ist für den Einsatz der meisten Flugzeuge in/ab/nach Deutschland die Dissipation keramischer Beschichtung während der Nutzung vernachlässigbar. Dies steht im Gegensatz zu Maschinen, die überwiegend in sandigen Gebieten eingesetzt werden, wo ein Großteil der Beschichtung zwischen den Wartungsintervallen abgetragen wird (Seitz 2013b). In einer älteren Studie zum Langzeitverhalten der keramischen Beschichtung wird für YSZ ein Verlust von einem bis 3 % nach 10.000 h angegeben. Nach 10.000 h in Betrieb kann sich der Verlust beschleunigen. So zeigten manche der untersuchten Beschichtungen knapp 10 % Verlust nach 16.000 h (Toriz et al. 1989). Für die weitere Untersuchung der Materialmengen in Bezug auf 2020 wurde die Dissipation als vernachlässigbar angesehen.

Zum Ende der Verweildauer wird die Beschichtung der Turbinenschaufeln und Brennkammer per Strahlverfahren (Hochdruckwasserstrahlen, Aluminiumoxid-Strahlen) oder chemisch entfernt

(Seitz 2013b). Die Beschichtung wird dabei vollständig entfernt, die einzelnen Schaufeln werden bis zu dreimal wiederbeschichtet (Lemke 2013; Schulz 2013).

Ergebnisse

Bezüglich der Weibullparametern für Hitzeschutzbeschichtungen sind keine Angaben in der Literatur vorhanden. Analog zum Vorgehen für Hitzeschutzbeschichtungen in stationären Gasturbinen wurde in Anlehnung an Angaben aus NIES (2010) für Antriebe und Turbinen („engines and turbines“) die Berechnung für einen k-Wert von 2 als Referenzszenario durchgeführt. Zusätzlich wurden Werte von 1,5 und 2,5 untersucht. Für die durchschnittliche Verweildauer wurde ein Wert von 2,25 Jahren bei Kurzstreckenmaschinen sowie 5,5 Jahren bei Mittel- und Langstreckenmaschinen angesetzt.

Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 171 dargestellt. Es ergab sich eine Menge von 264,4 kg im Referenzszenario. Durch Variation des Formparameters k sowie des Metallgehalts ergibt sich eine Spanne von 152,3 kg bis 389,5 kg.

Tabelle 171: Yttriummengen in 2020 aus Flugzeugtriebwerken

Flugzeug	k-Werte	Menge in 2020 [kg] (Referenzszenario: 686g/Triebwerk)	Menge in 2020 [kg] (411g/Triebwerk)	Menge in 2020 [kg] (959g/Triebwerk)
Kurzstreckenmaschinen	2	150,1	90,0	210,1
	1,5	144,1	86,5	201,7
	2,5	157,7	94,6	220,9
Mittel- und Langstreckenmaschinen	2	114,3	68,6	160,0
	1,5	109,7	65,8	153,6
	2,5	120,4	72,3	168,6
Gesamt	2	264,4	158,6	370,1
	1,5	253,8	152,3	355,3
	2,5	278,1	166,9	389,5

5.3.18 Absorbermaterial, Kontrollstäbe

Die Produktgruppe Absorbermaterial und Kontrollstäbe wurde aufgrund der Anwendung von Indium und Gadolinium ausgewählt.

5.3.18.1 Produktidentifizierung

Eine weitere Differenzierung erfolgte nicht. Die zu analysierenden Produkte waren somit Absorbermaterial und Kontrollstäbe in Kernkraftwerken.

5.3.18.2 Produktanalyse

Das gadoliniumoxidhaltige Absorbermaterial wird dem Kernbrennstoff zugeführt, um die Überschussreaktivität, die sich während des Abbrandes eines Brennstabs kontinuierlich vermindert, zu kompensieren (GRS 2011). Mit den Indiumhaltigen Steuerstäben kann die Kernspaltung gesteuert werden, da diese die für die Spaltung notwendigen Neutronen einfangen (Schadow 2006).

In Verkehr gebrachte Menge

Da der Markt von Absorbermaterial und Kontrollstäben von Kernkraftwerken in Deutschland auf wenige Nutzer, namentlich die Betreiber von Kernkraftwerken, beschränkt ist, wurden deren Internetseiten (EON 2010a/b; EON 2008a/b; EON 2013; Krokodorf-akut 2013; Kernenergie.de 2013; EnBW 2006; RWE o.J.a/b/c/d; KKG o.J.; Vattenfall o.J.a/b) ausgewertet (vgl. Tabelle 172). Die Ergebnisse sind in Tabelle 173 und Tabelle 174 dokumentiert.

Tabelle 172: Kontaktierte Unternehmen, die Absorbermaterial bzw. Kontrollstäbe herstellen oder verwenden

Informationsbereich	Schriftlich kontaktierte Unternehmen	Hauptsitz in	Ergebnis
Absorbermaterial	Areva NP GmbH	Erlangen, Deutschland	Es liegen keine Daten zur in Verkehr gebrachten Produktmenge vor, da Areva nur Verwender ist, nicht Hersteller
	Pontax GmbH	Lennebstadt, Deutschland	
Kontrollstäbe	Areva NP GmbH	Erlangen, Deutschland	Es liegen keine Daten zur in Verkehr gebrachten Produktmenge vor, da Areva nur Verwender ist, nicht Hersteller
	Westinghouse Electric Company (LLC)	Mannheim, Deutschland	
Betreiber von Kernkraftwerken	EnBW AG	Karlsruhe, Deutschland	
	E.ON SE	Düsseldorf, Deutschland	
	RWE AG	Essen, Deutschland	Menge der relevanten Metalle in Brennstäben und in Steuerstäben der von RWE betriebenen AKW
	Vattenfall AB	Stockholm, Schweden	
Expertenbefragung	Sicherheitsbeauftragter Kernkraftwerk Leibstadt (CH)	Leibstadt, Schweiz	Allg. Daten zum Gehalt von relevanten Metallen in Steuer- und Brennstäben

Die in Verkehr gebrachte Menge konnte nur teilweise über die Betreiberfirmen rekonstruiert werden. Da die Absorbermaterialien bzw. Kontrollstäbe eine lange Lebensdauer haben und nach ihrem Gebrauch noch einige Zeit vor ihrem Transport in einem Zwischenlager in Abkühlbecken aufbewahrt werden, konnte so aber eine Näherung an die in Verkehr gebrachte Anzahl erreicht werden. Ausgewertet wurden hierbei die Angaben zur Anzahl von Brennelementen pro Block und zur Anzahl von Brennstäben pro Brennelement bzw. das Infomaterial auf den Internetpräsenzen der Betreiberfirmen EnBW, EON, Vattenfall und RWE sowie Angaben der Pressestelle des Betreibers RWE. In Tabelle 173 ist die ermittelte Anzahl der Brennstäbe im Bestand angegeben. Tabelle 174 zeigt die ermittelte Anzahl der Steuerstäbe.

Tabelle 173: Anzahl der Brennstäbe (mit Absorbermaterial) im Bestand Bezugsjahr 2012⁴⁸

Betreiber	Kernkraftwerk	Typ	Anzahl Brennelemente pro Block (Betreiberseiten Internet)	Anzahl Brennstäbe pro Element (Höfling 1986)	Status (Deutsches Atomforum 2012)
E.ON	Brokdorf	DWR	193	236	
E.ON	Grafenrheinfeld	DWR	193	236	
E.ON	Grohnde	DWR	193	236	
E.ON	Isar/Ohu 1	SWR	592	64	
E.ON	Isar/Ohu 2	DWR		236	
E.ON	Stade				Rückbau
E.ON	Unteres Weser	DWR	193	236	
E.ON	Würgassen				Rückbau
EnBW	Neckarwestheim 1	DWR	Keine Angaben	236	
EnBW	Neckarwestheim 2	DWR		236	
EnBW	Obrigheim				Rückbau
EnBW	Philippsburg 1	DWR	592	96	
EnBW	Philippsburg 2	DWR	193		
RWE	Biblis A	DWR	193	236	
RWE	Biblis B	DWR	193	236	
RWE	Emsland	DWR	193	236	
RWE	Grundremmingen B	SWR	784	64	
RWE	Grundremmingen C	SWR	784	64	
RWE	Mühlheim-Kärlich				Rückbau
RWE/VEW	Lingen				Sicherer Einschluss
Vattenfall	Brunsbüttel	SWR	532	64	
Vattenfall	Krömmel	SWR	840	64	
X	Greifswald 1				Rückbau
X	Greifswald 2				Rückbau
X	Greifswald 3				Rückbau
X	Greifswald 4				Rückbau
x	Greifswald 5				Rückbau
X	Großwelzheim				Vollständig beseitigt
X	Grundremmingen A				Rückbau
X	Hamm-Uentrop				Sicherer Einschluss

⁴⁸ Als Quelle dienen hierbei die Homepages der Unternehmen EON, EnBW, RWE und Vattenfall sowie das INFORUM Verlags- und Verwaltungsgesellschaft GmbH, Informationskreis Kernenergie.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Betreiber	Kernkraftwerk	Typ	Anzahl Brennelemente pro Block (Betreiberseiten-Internet)	Anzahl Brennstäbe pro Element (Höfling 1986)	Status (Deutsches Atomforum 2012)
X	Jülich				Rückbau
X	Kahl				Vollständig beseitigt
X	KNK Karlsruhe I				Rückbau
X	KNK Karlsruhe II				Rückbau
X	MZFR Karlsruhe				Rückbau
X	Niederaichbach				Vollständig beseitigt
X	Rheinsberg				Rückbau

Tabelle 174: Anzahl der Kontrollstäbe im Bestand Bezugsjahr 2012

Betreiber	Kernkraftwerk	Anzahl der vorhandenen Kontrollstäbe ⁴⁹
E.ON	Brokdorf	61
E.ON	Grafenrheinfeld	193
E.ON	Grohnde	61
E.ON	Isar/Ohu 1	145
E.ON	Isar/Ohu 2	61
E.ON	Stade	Rückbau
E.ON	Unterweser	61
E.ON	Würgassen	Rückbau
EnBW	Neckarwestheim 1	Keine Angaben
EnBW	Neckarwestheim 2	Keine Angaben
EnBW	Obrigheim	Rückbau
EnBW	Philippsburg 1	145
EnBW	Philippsburg 2	61
RWE	Biblis A	69
RWE	Biblis B	61
RWE	Emsland	Keine Angaben
RWE	Grundremmingen B	193
RWE	Grundremmingen C	
RWE	Mühlheim-Kärlich	
RWE/VEW	Lingen	Sicherer Einschluss
Vattenfall	Brunsbüttel	129
Vattenfall	Krümmel	205

⁴⁹ Entnommen aus dem Informationsmaterial der Betreiberfirmen.

Von den kontaktierten Unternehmen gab allein RWE konkrete Mengen an Indium- und Gadoliniumhaltigen Kontrollstäben und Brennelementen für die in den von ihnen betriebenen AKW an. Die Ergebnisse sind in Tabelle 175 aufgeführt.

Tabelle 175: Anzahl relevanter Brennelemente und –Stäbe sowie Steuerelemente laut RWE⁵⁰ Bezugsjahr 2012?

Kraftwerk	Anzahl Gd-haltiger Brennelemente	Anzahl Gd-haltiger Brennstäbe	Anzahl In-haltiger Steuerelemente
Biblis	800	3400	260
Emsland	400	4900	190
Gundremmingen	8300	90.000	0

Metallkonzentration im Produkt

Absorbermaterial

Laut Expertenauskunft beträgt der Gehalt des Gadoliniums in einem Uran-Brennelement 0,6 % (in einigen Fällen 2,8 %) (Hecker 2013). In einem Mischoxid-Brennelement beträgt der Gehalt 0,1 % (in einigen Fällen 1,3 %) (Hecker 2013).

Höfling (1986) gibt das Gewicht für 236 Brennstäbe in einem Brennelement mit 830 kg an. Aus diesen Angaben wird geschätzt, dass ein einzelner Brennstab 3,52 kg wiegt. Mit diesen in Tabelle 176 zusammenfassend dargestellten Angaben kann nun die Menge an Gd im Bestand abgeschätzt werden. Allerdings ist nicht bekannt, wie groß der Anteil von reinen Uran-Brennelementen und Mischoxidbrennelementen an den Brennstäben ist. Die Menge an Gd wurde berechnet unter der Annahme, dass entweder 100 % der Brennstäbe Uran-BE oder 100 % der Brennstäbe Mischoxid BE sind, um die gesamte mögliche Spannweite der Ergebnisse abzudecken.

Tabelle 176: Abschätzung der Menge an Gd im Bestand in Brennelementen in deutschen AKW (2012)

Betreiber	Kraftwerk	Anzahl BE	Anzahl Brennstab pro Brennelement	Anzahl Brennstäbe	Gewicht der Brennelemente	Gd in Uranbrennelement (obere Abschätzung)	Gd in Mischoxid-Brennelement (untere Abschätzung)
					kg	kg	kg
E.ON	Brokdorf	193	236	45.548	830,72	4,98	0,83
E.ON	Grafenrheinfeld	193	236	45.548	830,72	4,98	0,83
E.ON	Grohnde	193	236	45.548	830,72	4,98	0,83
E.ON	Isar/Ohu 1	592	64	37.888	225,28	1,35	0,23
E.ON	Isar/Ohu 2		236	0	830,72	4,98	0,83
E.ON	Unterweser	193	236	45.548	830,72	4,98	0,83

⁵⁰ Auskunft der Betreiberfirma.

Betreiber	Kraftwerk	Anzahl BE	Anzahl Brennstab pro Brennelement	Anzahl Brennstäbe	Gewicht der Brennelemente	Gd in Uranbrennelement (obere Abschätzung)	Gd in Mischoxid-Brennelement (untere Abschätzung)
EnBW	Neckarwestheim 1		236		830,72	4,98	0,83
EnBW	Neckarwestheim 2		236		830,72	4,98	0,83
EnBW	Philippsburg 1	592	96	56.832	337,92	2,03	0,34
EnBW	Philippsburg 2	193					
RWE	Biblis A	193	236	45.548	830,72	4,98	0,83
RWE	Biblis B	193	236	45.548	830,72	4,98	0,83
RWE	Emsland	193	236	45.548	830,72	4,98	0,83
RWE	Grundremmingen B	784	64	50.176	225,28	1,35	0,23
RWE	Grundremmingen C	784	64	50.176	225,28	1,35	0,23
Vattenfall	Brunsbüttel	532	64	34.048	225,28	1,35	0,23
Vattenfall	Krömmel	840	72	60.480	253,44	1,52	0,25
SUMME		5.668	2784	608.436	9.799,68	58,80	9,80

In Summe ergibt sich eine Menge von ca. 59 kg Gd in Uran-Brennelementen (obere Abschätzung) bzw. 9,8 kg in Mischoxidbrennelementen (untere Abschätzung) im Bestand.

Steuerstäbe

Der neutronenabsorbierende Teil von Steuerstäben besteht aus einer AgInCd Legierung in einer Edelstahlhülle. Das Gewicht der absorbierenden Masse pro Steuerstab beträgt ca. 3 kg (Anspach 1999). Die relevanten Steuerstäbe bestehen zu 80 % aus Silber, zu 15 % aus Indium und zu 5 % aus Cadmium. (TVO 2010). Damit enthält jeder Steuerstab ca. 0,45 kg Indium.

Um die Menge an Indium im Bestand abzuschätzen, wurde angenommen, dass alle der in Tabelle 177 erwähnten Steuerstäbe 3 kg wiegen. Die Abschätzung ergab folgendes Ergebnis:

Tabelle 177: Abschätzung der Menge an In im Bestand in Steuerstäben in deutschen AKW (Bezugsjahr 2012, Angaben in kg)

Betreiber	Kernkraftwerk	Anzahl der vorhandenen Kontrollstäbe	Gewicht Silber	Gewicht Indium	Gewicht Cadmium
E.ON	Brokdorf	61	155,55	27,45	9,15
E.ON	Grafenrheinfeld	193	492,15	86,85	28,95
E.ON	Grohnde	61	155,55	27,45	9,15
E.ON	Isar/Ohu 1	145	369,75	65,25	21,75
E.ON	Isar/Ohu 2	61	155,55	27,45	9,15
E.ON	Stade				
E.ON	Unterweser	61	155,55	27,45	9,15

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Betreiber	Kernkraftwerk	Anzahl der vorhandenen Kontrollstäbe	Gewicht Silber	Gewicht Indium	Gewicht Cadmium
E.ON	Würgassen				
EnBW	Neckarwestheim 1				
EnBW	Neckarwestheim 2				
EnBW	Obrigheim				
EnBW	Philippsburg 1	145	369,75	65,25	21,75
EnBW	Philippsburg 2	61	155,55	27,45	9,15
RWE	Biblis A	69	175,95	31,05	10,35
RWE	Biblis B	61	155,55	27,45	9,15
RWE	Emsland				
RWE	Grundremmingen B	193	492,15	86,85	28,95
RWE	Grundremmingen C		0,00	0,00	0,00
RWE	Mühlheim-Kärlich		0,00	0,00	0,00
RWE/VEW	Lingen				
Vattenfall	Brunsbüttel	129	328,95	58,05	19,35
Vattenfall	Krümmel	205	522,75	92,25	30,75
Summe		1445	3.684,75	650,25	216,75

Somit ergab sich eine Menge von ca. 650 kg Indium im derzeitigen Bestand an Steuerstäben in AKW. RWE gibt für die Mengen an Indium in seinen Kernkraftwerken am gesamten Standort (Betrieb + Zwischenlager) folgende Mengen an:

Tabelle 178: Menge an Indium in den von RWE betriebenen Kernkraftwerken 2012 (Menge zum Zeitpunkt der Anlieferung)

Kraftwerk	Menge in (kg)
Biblis	2.100
Emsland	1.500
Gundremmingen	0

Verweildauer in der Nutzungsphase

Absorbermaterial

Die Brennelemente werden ca. 5 Jahre verwendet. Nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer werden sie in betriebsinternen Becken auf ca. 200 °C abgekühlt. Anschließend werden sie in Castorbehälter verladen und in ein Zwischenlager gebracht (Hecker 2013).

Steuerstäbe

Die Steuerstäbe, mit denen die Kernspaltung gesteuert werden kann, werden 25 Jahre verwendet. Nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer werden sie in betriebsinternen Becken auf ca. 200°C abgekühlt. Anschließend werden sie in Castorbehälter verladen und in ein Zwischenlager gebracht (Hecker 2013).

Exporte aus der Nutzungsphase

In Deutschland schreibt das Atomgesetz vor, dass die aus dem Reaktor entladenen abgebrannten Brennelemente am Standort der Kernkraftwerke zwischengelagert werden müssen. Transporte zu Wiederaufarbeitungsanlagen, die bis zuletzt von vielen Kernkraftwerken durchgeführt wurden, sind seit dem 1. Juli 2005 nicht mehr zugelassen.

Ergebnisse

Aufgrund der Radioaktivität der Brenn- und Steuerstäbe sind eine abfalltechnische Aufbereitung und eine Rückgewinnung der enthaltenen strategischen Metalle derzeit ausgeschlossen. Bei gadoliniumhaltigem Abfall aus Kernkraftwerken kann eine Radioaktivität nach über 50 Jahren noch gemessen werden (Corrice 2011). Daher stellen die hier untersuchten Absorbermaterialien und Kontrollstäbe keinen Abfallstrom dar, auf den im Jahr 2020 zugegriffen werden kann.

Um die Größenordnung der Materialmenge, die entsprechend nicht für ein Recycling zur Verfügung steht, einzuschätzen, kann die Menge im Bestand (2012) herangezogen werden. Die Menge an Gadolinium in Absorbermaterial beträgt im momentanen Bestand rund 70 kg. Die Menge an Indium im momentanen Bestand beträgt rund 650 kg.

5.3.19 Hochtemperatursupraleiter

Die Produktgruppe Hochtemperatursupraleiter wurde aufgrund der Anwendung von Yttrium ausgewählt.

5.3.19.1 Produktidentifizierung

Unterteilt wird die Produktgruppe in folgende Anwendungen:

- Kabel
- Generatoren
- Motoren
- Transformatoren
- Magnetic Resonance Imaging (MRI) in der medizinischen Diagnostik
- Als Kurzschlussstrombegrenzer in der Energiewirtschaft
- Magnetschwebbahntechnologie

- Mobilfunkfilter für das Hochfrequenzband
- Supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDS) u.a. für Magnetenzephalographie oder Werkstoffprüfung, Lagersysteme, Hochenergiepartikelbeschleuniger und supraleitende Mikrochips in Petaflop-Computern.

Die Anwendung von Hochtemperatursupraleitern in diesen Produktgruppen wurde in der Produktanalyse untersucht.

5.3.19.2 Produktanalyse

1911 entdeckte der Niederländer Heike Kamerlingh Onnes, dass nahe des absoluten Nullpunktes (-269°C) in Quecksilber der elektrische Widerstand plötzlich verschwindet und verlustfreie Stromleitung möglich wird. Die Temperatur, ab der dieser Effekt eintritt, wird als Sprungtemperatur bezeichnet. In den nächsten Jahren wurden mehrere Materialien entdeckt, die bei Abkühlung auf Temperaturen unter etwa -250°C supraleitend wurden. Mehrere Jahrzehnte wurde davon ausgegangen, dass die niedrige Temperatur der ausschlaggebende Faktor ist und dass höhere Sprungtemperaturen nicht erreicht werden können. Wegen des großen Bedarfs an Kältemitteln blieben die Anwendungen auf den Labormaßstab beschränkt (Radons 2012). 1986 entdeckten die Physiker Alex Müller und Georg Bednorz vom IBM Forschungsinstitut in Zürich, dass Lanthanbariumkupferoxid bereits supraleitende Eigenschaften unterhalb einer Sprungtemperatur von -238°C aufweist. Auch sie erhielten für ihre Entdeckung den Nobelpreis. 1987 wurde entdeckt, dass Yttriumbariumkupferoxid (YBCO), eine Keramik, eine Sprungtemperatur von -180°C besitzt, die auch mit flüssigem Stickstoff (Siedetemperatur -196°C) erreicht werden kann (Wu 1987, Radons 2012). Mittlerweile sind keramische Materialien bekannt, deren Sprungtemperaturen bei etwa -116°C liegen. Da diese Temperatur 150°C über dem absoluten Nullpunkt liegt, werden die Materialien als „Hochtemperatursupraleiter“ (HTS) bezeichnet (Radons 2012).

HTS sind bei Raumtemperatur elektrisch leitfähig, weisen aber einen deutlichen elektrischen Widerstand auf, der unterhalb der Sprungtemperatur verschwindet. Die besonderen Eigenschaften der HTS lassen sich durch den molekularen Aufbau erklären. Dabei sind ebene Schichten aus Kupferoxid in Schichten mit andersartigem Aufbau eingebettet (Perowskitstruktur). Wird das Material auf Temperaturen unterhalb der Sprungtemperatur abgekühlt, bilden sich ebene Leitungsbahnen, in denen sich Elektronen gut bewegen können. Allerdings tritt die Supraleitfähigkeit nur innerhalb der Ebenen auf, senkrecht dazu beträgt die Leitfähigkeit nur einen Bruchteil der Leitfähigkeit innerhalb der Ebenen. Im Material YBCO sind pyramidenförmige Polyeder von Kupfer und Sauerstoff durch ebene Lagen von Yttrium und Barium voneinander getrennt. Die chemische Formel von YBCO ist $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Wird aus jeder Elementarzelle hierbei ein Sauerstoffatom reduziert, wird das Material zum Isolator, da sich die Rauten im molekularen Aufbau zu Stäben umformen, wodurch keine Elektronen mehr für die Stromleitung zur Verfügung stehen (Radons 2012).

Zunächst sah die Wissenschaft in den HTS großes Potenzial, allerdings stellt die großtechnische Herstellung noch immer eine große Herausforderung dar:

- HTS sind sehr spröde und lassen sich nur schlecht formen.
- Manche HTS enthalten giftige Metalle wie Thallium und Quecksilber, deren Verarbeitung zu Umweltproblemen führen kann.
- Damit die Werkstoffe supraleitend sein können, müssen die Kristalle über weite Strecken homogen sein. Etwaige bei der Herstellung auftretende Korngrenzen unterbrechen die Leitungsebenen und werden zu Barrieren für die supraleitenden Elektronen.

- Für die Anwendung in der Energietechnik muss der Strom verlustfrei und mit hoher Dichte über weite Strecken geleitet werden. Um die erforderlichen hohen Stromdichten zu erreichen, muss das Material praktisch einkristallin (Körner sehr gut zueinander ausgerichtet) vorliegen. Die erforderlichen Verfahren zur Herstellung orientierter HTS - Schichten auf flexiblen Metallfolien (HTS - Bandleiter) wurden in den letzten 10 Jahren entwickelt und werden derzeit bei vielen Herstellern weltweit in die Produktion überführt. Hohe Stromdichten erreicht man heute über Stücklängen von einigen hundert Metern.

Wie bereits ausgeführt, ist Yttrium in dem keramischen Werkstoff YBCO zu finden, der allerdings in verschiedenen Bauformen verwendet werden kann, z.B. als Bandleiter oder massiv.

In Verkehr gebrachte Menge

Zur Abschätzung der in Verkehr gebrachten Mengen wurden die Hersteller von HTS-YBCO in Deutschland ermittelt. Diese Hersteller wurden schriftlich befragt zu der mengenmäßigen Zusammensetzung ihrer Werkstoffe und der in Verkehr gebrachten Produktmenge ihrer Werkstoffe für Deutschland. Bis auf einen Hersteller (Theva), der sehr ausführlich zu den o. g. Fragen antwortete, gab es keine weiteren Rückmeldungen.

Tabelle 179: Kontaktierte Unternehmen, die HTS herstellen

Schriftlich kontaktierte Unternehmen	Hauptsitz in
ABB	(Baden), Schweiz
amsc	Kempen, Deutschland
BASF Future , Business GmbH	Ludwigshafen, Deutschland
deutsche nanoschicht	Rheinbach, Deutschland
Theva	Ismaning, Deutschland
Ivsupra	Hürth, Deutschland
Nexans	Mönchengladbach, Deutschland
Siemens	Erlangen, Deutschland

Die in Verkehr gebrachte Menge lässt sich aufgrund fehlender Statistiken und fehlender Angaben von Herstellern nicht berechnen. Aufgrund der Probleme bei der Herstellung bestehen die in den Handel gebrachten HTS oft aus einer keramischen nichtleitenden Trägerschicht, auf die die Supraleiter in Form eines relativ dünnen Films aufgedampft sind. Diese finden dann Verwendung in hoch empfindlichen Magnetfeldsensoren oder Squids (superconducting quantum interference device) (Radons 2012). Tabelle 180 stellt mögliche Einsatzgebiete von HTS (Angerer et al. 2009) dar, sortiert nach ihrer Relevanz:

Tabelle 180: Einschätzung zur Relevanz von HTS (Theva)

Anwendung	Einschätzung zur Relevanz
Kabel	Relevant
Generatoren	Relevant
Motoren	Relevant
Transformatoren	Relevant
MRT	-
Kurzschlussstrombegrenzer	Kommerzielle Systeme bereits erhältlich
Magnetschwebbahn	Für 2 Personen als großes Modell in Betrieb, im Nahverkehr eher visionär Schwebesysteme für den berührungslosen Transport von Bauteilen oder Gütern etc. in Fabriken, wo mit Gefahrgut (Radioaktivität, Gifte) umgegangen wird oder besonders hohe Anforderungen an Hygiene oder Sauberkeit gestellt werden (Reinraum, Medizinprodukte, Abfüllanlagen) sind hochinteressant und in der Entwicklung (Festo, evico, ATZ)
Mobilfunkfilter	Kommerzielle Systeme bereits erhältlich
SQUIDS	-

Dabei haben Kabel und Generatoren zusammen einen Anteil von 70 %, Mobilfunkfilter und SQUIDS stellen eher Nullmengen dar.

Nach einer Schätzung des Verbandes wird die Menge in Deutschland auf bislang weniger als einige hundert bis maximal 1000 kg HTS pro Jahr beziffert (Theva 2013). Hierbei dominieren massive HTS, da Bandleiter HTS nur in geringer Menge beinhalten.

Metallkonzentration im Produkt

Die Materialien, die HTS-Eigenschaften zeigen, werden als „1-2-3-Verbindungen“ bezeichnet, aufgrund des mengenmäßigen Verhältnisses der Elemente zueinander, in diesem Fall Y: Ba: Cu.

In Bandleitern liegt der Gewichtsanteil von Y (oder ersatzweise anderer geeigneter Seltenen Erden wie Gd oder Dy⁵¹) bei 14 % in der aktiven HTS-Schicht. Bei einem HTS Bandleiter von ca. 100 µm Dicke macht das Substrat bzw. die Ummantelung 97 % der Dicke aus, lediglich 3 % bestehen aus HTS-Material, das als dünne Schicht vorliegt. Der Gewichtsanteil von Y bezogen auf das Gesamtgewicht beträgt also 0,42 %. Die übrigen 97 % bestehen aus Substrat (NiCr-Legierung oder Edelstahl) (Theva).

Angerer (2009) gibt an, dass die eigentliche HTS-Schicht aus YCBO in 1-5 µm Dicke abgeschieden wird, mit einer Dichte von 6 g/cm. Heute können kontinuierlich Stücklängen von über 1 km Länge hergestellt werden.

Theva (2013) gibt als Beispiel an, dass in einem Windkraftgenerator mit HTS der Materialeinsatz an HTS Bandleiter ca. 50 km/MW beträgt, was umgerechnet 4,2 kg HTS bzw. 0,6 kg Y pro MW be-

⁵¹ Bei Gd und Dy ist die genaue prozentuale Zusammensetzung nicht bekannt.

deutet. Bei einem Hochleistungskabel werden pro km Kabellänge mit 300 km HTS Bandleiter gerechnet (je nach Übertragungsleistung), was einer Menge von 1,2 - 1,8 kg pro Kabelkilometer entspricht. Bei der Herstellung wird bis zu 10-mal mehr Material eingesetzt, dieses kann jedoch recycelt werden.

Verweildauer in der Nutzungsphase

Theva (2013) gibt die Verweildauer in der Nutzungsphase wie folgt an:

- Kabel > 40 Jahre
- Generatoren > 20 Jahre
- Untergrenze allgemein: 10 - 15 Jahre

Da der Werkstoff noch neu ist, liegen lediglich diese Schätzungen des Herstellers vor.

Exporte aus der Nutzungsphase

Nach Einschätzung von Theva (2013b) wird es in den nächsten Jahren noch nicht zu einem Export von gebrauchten Geräten kommen. Da der Werkstoff noch neu ist, liegen keine Erkenntnisse über Exporte aus der Nutzungsphase vor. Theva (2013) geht allerdings davon aus, dass die HTS aufgrund ihrer langen Lebensdauer bis zum Ende des Lebenszyklus im Produkt verbleiben.

Ergebnisse

Die schlechte Datenverfügbarkeit erlaubte es nicht, anhand der einzelnen Parameter (in Verkehr gebrachte Menge, Metallkonzentration, Verweildauer) eine Berechnung der zu erwartenden Menge in 2020 vorzunehmen. Stattdessen erfolgte eine grobe Abschätzung der in 2020 anfallenden Menge anhand der jährlichen in Verkehr gebrachten Menge, die auf einige hundert bis 1000 kg HTS pro Jahr in Deutschland geschätzt wurde. Nimmt man eine Menge von 300 kg bis 1000 kg an, entspricht dies einer Yttriummenge von 42 bis 140 kg pro Jahr. Etwa 70 % hiervon kommen in Kabeln und Generatoren zum Einsatz, für die die Lebensdauer auf über 20 bzw. über 40 Jahre geschätzt wird. Aufgrund dieser vergleichsweise langen Lebensdauer ist die in 2020 zu erwartende Abfallmenge als gering (\ll 42 kg) einzuschätzen. Ausgehend von einer konstanten Inverkehrbringung kann die jährliche Einsatzmenge von 42 bis 140 kg Yttrium längerfristig als Anhaltspunkt für die Größenordnung der zu erwartenden Abfallmenge aus HTS angesehen werden.

5.3.20 Rechenzentren

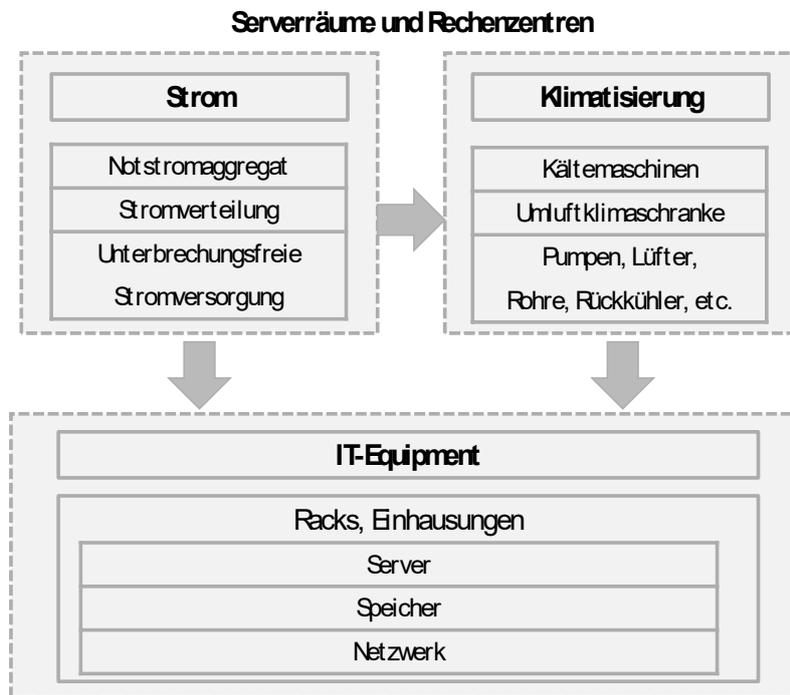
5.3.20.1 Produktidentifizierung

Rechenzentren wurden als ein mögliches mengenrelevantes Einsatzgebiet von Palladium identifiziert. Des Weiteren wurde der Einsatz von Gold und Platin mit untersucht. Gold kommt hauptsächlich auf Leiterplatten zum Einsatz. In Drahtbonds dient es zur Kontaktierung von Halbleiterelementen. Daneben wird es zur Beschichtung bspw. von Steckkontakten eingesetzt. Palladium wird in erster Linie in keramischen Vielschichtkondensatoren sowie als hochwertiges Kontaktmaterial und in geringem Umfang in Festplatten eingesetzt. Platin wird ebenfalls als Beschichtungselement und in Festplatten eingesetzt.

Neben diesen Metallen finden auch weitere strategische Metalle wie Gallium oder Germanium Anwendung in Rechenzentren, wobei bisher näheren Daten vorliegen, anhand derer sich eine genaue Quantifizierung vornehmen ließe (vgl. hierzu auch Hintemann und Fichter 2010). Eine nähere Untersuchung dieser Metalle erfolgte hier nicht.

Eine allgemein gültige Definition, was unter dem Begriff Rechenzentrum zu verstehen ist, existiert bislang nicht. Hier werden in Anlehnung an Hintemann und Fichter (2010) unter „Rechenzentren“ Räumlichkeiten verstanden, in denen die zentrale Rechentechnik (Server sowie Infrastruktur) einer oder mehrerer Organisationen oder Firmen untergebracht sind. Hierzu zählen auch einzelne Serverschränke, was sich methodisch dadurch begründen lässt, dass in den Serverschränken eine Infrastruktur und Materialien wie Rack, Stromversorgung, Klimatisierung und Ähnlichem vorhanden sind bzw. sein können (Hintemann und Fichter 2010). Abbildung. 34 zeigt die grundsätzliche Struktur eines Rechenzentrums. Da sich die Analyse im Wesentlichen auf eine bestehende Analyse stützt (Hintemann und Fichter 2010) ist eine weitere Unterteilung in einzelne Produkte nicht notwendig.

Abbildung. 34: Struktur eines Rechenzentrums



Quelle: nach Hintemann und Fichter 2010

5.3.20.2 Produktanalyse

Die Analyse der Materialmengen aus Rechenzentren stützt sich im Wesentlichen auf eine in 2010 veröffentlichte Studie, die ebenfalls im Auftrag des Umweltbundesamtes vom Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH durchgeführt wurde (Hintemann und Fichter 2010). Die Analyse in der Studie umfasst Rechenzentren nach der oben dargestellten Definition, wobei hierunter auch einzelne Serverschränke fallen. Die in der Studie angewandte Typologie von Rechenzentren sowie deren mengenmäßige Bedeutung ist in Tabelle 181 dargestellt.

Tabelle 181: Typologie und Anzahl von Rechenzentren in 2008

Rechenzentrums- typ	Serverzahl	Ø An- schluss- leistung	Ø Fläche	Insgesamt in- stallierte Server	Anzahl Re- chenzen- tren	Anteil an allen Rechenzentren
Serverschrank	3-10 (Ø 4,8)	1,5 kW	5 m ²	160.000	33.000	62,1%
Serverraum	11-100 (Ø 19)	6 kW	20 m ²	340.000	18.000	33,9%
Kleines Rechen- zentrum	101-500 (Ø 150)	50 kW	150 m ²	360.000	1.750	3,3%
Mittleres Rechen- zentrum	501-5.000 (Ø 600)	240 kW	500 m ²	220.000	370	0,7%
Großes Rechen- zentrum	Über 5.000 (Ø 6.000)	2.5000 kW	6.000 m ²	300.000	50	0,1%
Gesamt				1.380.000	53.170	100,0%

Quelle: Hintemann und Fichter 2010

Die Gesamtzahl der Server in Deutschland wird für das Jahr 2008 mit ca. 1.380.000 angegeben. Prozentual machen einzelne Serverschränke mit 62,1 % den größten Anteil aus, gefolgt von Serverräumen mit 33,9 %. Betrachtet man hingegen die Anzahl der installierten Server in den verschiedenen Typen, ergibt sich ein ausgeglicheneres Bild mit zwischen 160.000 und 360.000 Servern, wobei den kleinen Rechenzentren hier mengenmäßig die größte Bedeutung zukommt (Hintemann und Fichter 2010).

Wie eingangs beschrieben werden von den in diesem Vorhaben relevanten Metallen Palladium, Gold und Platin betrachtet. Darüber hinaus betrachtet die Studie von Hintemann und Fichter (2010) Kunststoffe (Epoxy, PVC, sonstige), Glas, Keramiken und Inertstoffe (E-Glas, SiO, Keramik, Silicium) sowie verschiedene Metalle (Eisen, Kupfer, Aluminium, Nickel, Strontium, Zink, Blei, Silber, Ruthenium). In der Studie werden die Materialgerüste der verschiedenen Rechenzentrumstypen sowie im Bestand angegeben. Aus den ebenfalls beschriebenen möglichen Entwicklungsszenarien (siehe Abschnitt In Verkehr gebrachte Mengen) sind Daten zu den Metallmengen im Bestand verfügbar. Entsprechend ist es nicht notwendig, die Metallkonzentration im Produkt mit den in Verkehr gebrachten Produktmengen zu multiplizieren.

Für die verschiedenen Rechenzentrumstypen entsprechend der beschriebenen Typologie ergeben sich unterschiedliche Materialgerüste aufgrund ihrer Größe und Komponentenzusammensetzung. Folgende Tabelle zeigt beispielhaft die Materialzusammensetzung von Tower-Server Rechenzentren.

Tabelle 182: Materialzusammensetzung Tower-Server Referenzeinheit in Rechenzentren

Materialgruppe	Material	Pro Einheit [kg]	Materialbestand, gesamt [kg]
Kunststoffe	Epoxy	280,1	54.000
	PVC	440	85.000
	sonstige Kunststoffe	1.004,4	193.000
Glas/ Keramik/ Inertstoffe	E-Glas	467,3	90.000
	SiO	98,9	19.000
	Keramik	343,9	66.000
	Silicium	6,02	1.200
Metall	Fe	5.744,2	1.100.000
	Cu	1.216,5	230.000
	Al	849,3	163.000
	Ni	27,95	5.400
	Sn	42,5	8.200
	Zn	12,3	2.400
	Pb	32,02	6.100
Edelmetalle	Au	0,34	65
	Pt	0	0
	Pd	0,15	28
	Ag	1,43	275
	Ru	0	0,5
	Sonstige	0,87	170
	Summe	10.568	2.030.000

Quelle: Hintemann und Fichter 2010

In Verkehr gebrachte Mengen

Aus der eingangs beschriebenen Zahl von Rechenzentren ergeben sich die in Verkehr gebrachten Materialmengen, die im Folgenden dargestellt werden. Tabelle 183 zeigt den Materialbestand in Rechenzentren. Getrennt hiervon ist in Tabelle 184 der Materialbestand aufgeführt, der sich für die notwendige unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ergibt.

Tabelle 183: Materialbestand in Rechenzentren in Deutschland 2008

Materialgruppe	Material	Materialbestand [kg]
Kunststoffe	Epoxy	1.213.000
	PVC	1.117.000
	sonstige Kunststoffe	4.161.000
Glas/ Keramik/ Inertstoffe	E-Glas	1.880.000
	SiO	407.000
	Keramik	1.635.000
	Silicium	30.600
Metall	Fe	16.560.000
	Cu	4.405.000
	Al	5.586.000

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Materialgruppe	Material	Materialbestand [kg]
	Ni	119.400
	Sn	221.800
	Zn	53.500
	Pb	139.200
Edelmetalle	Au	1.804
	Pt	17
	Pd	790
	Ag	7.503
	Ru	18
Sonstige		4.696
Summe		37.463.000

Quelle: Hintemann und Fichter 2010

Tabelle 184: Materialbestand USV-Leitplatten 2008

Materialgruppe	Material	Materialbestand [kg]
Kunststoffe	Epoxy	8.900
	PVC	1.250
	sonstige Kunststoffe	19.000
Glas/ Keramik/ Inertstoffe	E-Glas	19.000
	SiO	3.800
	Keramik	6.300
	Silicium	51
Metall	Fe	5.100
	Cu	17.700
	Al	11.400
	Ni	890
	Sn	250
	Zn	380
	Pb	1.010
Edelmetalle	Au	2,53
	Pt	0,00
	Pd	0,00
	Ag	6,33
	Ru	0,00
Sonstige		0,00
Summe		94.900

Quelle: Hintemann und Fichter 2010

Bzgl. der USV zeigt sich, dass diese von deutlich geringerer Mengenrelevanz bezogen auf die hier untersuchten Metalle ist (2,53 kg Gold). Der Materialbestand in der eigentlichen Rechenzentrums-IT fällt mit 1.804 kg Gold, 17 kg Platin und 790 kg Palladium deutlich höher aus.

Für die Entwicklung des Materialbestandes der Jahre 2009 bis 2020 wurde für die USV ein konstanter Bestand angenommen. Aufgrund der geringen Mengenrelevanz wird diese Annahme als hinreichend genau angesehen. Bezüglich der IT der Rechenzentren wurden zwei Szenarien aus Hintemann und Fichter (2010) herangezogen, für die der Materialbestand in 2015 dargestellt wird. Neben einem „business as usual“-Szenario wurde ein „Green IT“-Szenario untersucht, welches von einer breiten Anwendung bester verfügbarer Technologie sowie von Lösungen zur Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz ausgeht. Die Materialbestände, die sich für die beiden Szenarien ergeben, sind in Tabelle 185 und

Tabelle 186 dargestellt.

Tabelle 185: Materialbestand in Rechenzentren 2015 (Szenario Business-as-usual)

Materialgruppe	Material	Materialbestand [kg]
Kunststoffe	Epoxy	1.980.000
	PVC	2.040.000
	sonstige Kunststoffe	7.170.000
Glas/ Keramik/ Inertstoffe	E-Glas	3.070.000
	SiO	650.000
	Keramik	2.670.000
	Silicium	60.600
Metalle	Fe	27.750.000
	Cu	7.610.000
	Al	9.160.000
	Ni	218.400
	Sn	405.100
	Zn	89.000
	Pb	23.300
Edelmetalle	Au	2.948
	Pt	32
	Pd	1.811
	Ag	20.623
	Ru	32
Sonstige		4.645
Summe		62.940.000

Quelle: Hintemann und Fichter 2010

Tabelle 186: Materialbestand in Rechenzentren 2015 (Szenario Green IT)

Materialgruppe	Material	Materialbestand [kg]
Kunststoffe	Epoxy	1.560.000
	PVC	1.630.000
	sonstige Kunststoffe	5.640.000
Glas/ Keramik/ Inertstoffe	E-Glas	2.420.000
	SiO	520.000
	Keramik	2.090.000
	Silicium	47.900
Metall	Fe	21.930.000
	Cu	6.020.000
	Al	7.340.000
	Ni	172.400
	Sn	319.700
	Zn	70.100
	Pb	18.600
Edelmetalle	Au	2.327
	Pt	26
	Pd	1.428
	Ag	16.260
	Ru	26
	Sonstige	3.669
	Summe	49.830.000

Quelle: Hintemann und Fichter 2010

Basierend auf den dargestellten Daten bzgl. der Materialbestände in 2008 und 2015 wurden die in Verkehr gebrachten Mengen für die relevanten Jahre (2011 bis 2020) ermittelt, wobei ein exponentielles Wachstum des Bestandes angenommen wird. Da Angaben zur Altersverteilung des Bestandes fehlen, geschah dies basierend auf einer durchschnittlichen Lebensdauer von 5,5 Jahren (Hintemann und Fichter 2010). Hierzu wurden zunächst für beide Szenarien die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten für jedes Metall ermittelt und auf dieser Basis die jährlichen Materialbestände berechnet.

Tabelle 187: Materialbestand in Rechenzentren 2008-2020, Szenario Business-as-usual (Angaben in kg)

Jahr bzw. Veränderung	Au	Pt	Pd
2008	1.807	17	790
2009	1.938	19	889
2010	2.078	20	1.001
2011	2.229	22	1.127
2012	2.391	24	1.269
2013	2.564	27	1.429
2014	2.751	29	1.609
2015	2.951	32	1.811

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Jahr bzw. Veränderung	Au	Pt	Pd
2016	3.165	35	2.039
2017	3.394	38	2.295
2018	3.641	42	2.584
2019	3.905	46	2.909
2020	4.188	50	3.275
Ø Wachstumsrate	1,073	1,095	1,126

Tabelle 188: Materialbestand in Rechenzentren 2008-2020, Szenario Green-IT (Angaben in kg)

Jahr bzw. Veränderung	Au	Pt	Pd
2008	1.807	17	790
2009	1.873	18	860
2010	1.943	19	936
2011	2.015	20	1.018
2012	2.089	22	1.108
2013	2.166	23	1.206
2014	2.246	24	1.312
2015	2.330	26	1.428
2016	2.416	28	1.554
2017	2.505	29	1.691
2018	2.598	31	1.840
2019	2.694	33	2.003
2020	2.793	35	2.180
Ø Wachstumsrate	1,037	1,063	1,089

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Hintemann und Fichter 2010

Anhand der Zeitreihe des Materialbestands wurde die jährliche in Verkehr gebrachte Menge ermittelt. Diese ergibt sich aus dem Zuwachs des Materialbestandes und dem Ersatz von Bestand am Lebensende. Hierfür wurden vereinfachend eine 5,5-jährige durchschnittliche Lebensdauer und eine konstante Altersverteilung des Bestandes von 2008 angenommen. Anhand dieses Vorgehens ergaben sich für einen Formparameter von $k = 1,73$ (basierend auf Nomura 2005; NIES 2010; siehe Ausführungen in Abschnitt „Ergebnisse“) die in

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 189 dargestellten Zeitreihen für die Inverkehrbringung in den beiden Szenarien.

Tabelle 189: Inverkehrbringung strategischer Metalle in Rechenzentren 2011-2020 (kg)

Sze- nario	Ele- ment	2011	201 2	201 3	201 4	201 5	201 6	2017	201 8	201 9	202 0
Business- as-usual	Au	504,2	535,3	571,0	610,8	654,5	701,1	751,5	805,5	863,4	925,3
	Pt	5,5	5,9	6,4	7,0	7,6	8,3	9,1	9,9	10,8	11,8
	Pd	288,9	321,0	359,0	402,9	452,9	509,5	573,2	644,9	725,5	816,2
Green-IT	Au	413,0	425,4	439,6	455,0	471,3	488,5	506,3	524,7	543,8	563,5
	Pt	4,6	4,9	5,1	5,4	5,8	6,1	6,5	6,9	7,3	7,7
	Pd	239,6	257,7	278,8	302,5	328,7	357,4	388,7	422,7	459,7	499,8

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Hintemann und Fichter 2010

Verweildauer

Wie beschrieben geben Hintemann und Fichter (2010) eine durchschnittliche Nutzungsdauer von fünf bis sechs Jahren, an, wobei hier wie beschrieben mit dem durchschnittlichen Wert von 5,5 Jahren als Verweildauer gerechnet wird.

Ergebnisse

Die Weibullparameter zur Berechnung der Materialmenge in 2020 liegen in der Literatur für Großrechner und Server vor und wurden hier für die Rechenzentren herangezogen. Diese Werte liegen zwischen 1,57 (Nomura 2005) und 1,88 (NIES 2010). Im selben Bereich liegen mit 1,77 auch die zu findenden Werte für Arbeitsplatzrechner (NIES 2010). Für die Berechnung der Metallmenge in 2020 wurde ein mittlerer k-Wert von 1,73 verwendet, die Werte von 1,57 und 1,88 wurden zusätzlich als obere und untere Grenze herangezogen. Die Ergebnisse der Berechnung finden sich in Tabelle 190. Für das Referenzszenario (k = 1,73) ergaben sich zu erwartende Mengen von Gold von 518,9 kg im business-as-usual Szenario und 421,3 kg im Green IT Szenario bzw. im Mittel von 470,1 kg. Für Platin betragen die Mengen 5,8 bzw. 4,9 kg (ø5,4 kg), für Palladium 346,4 bzw. 284,3 kg (ø315,4 kg). Die Schwankungen aus der Variation des Formparameters fallen insgesamt gering aus.

Tabelle 190: Strategische Metalle aus Rechenzentren in 2020, Angaben in kg

Szenario	k-Werte	Gold	Platin	Palladium
Business-as-usual	1,73	518,9	5,8	346,4
	1,57	516,9	5,8	348,5
	1,88	521,2	5,8	345,3
Green-IT	1,73	421,3	4,9	284,3
	1,57	417,7	4,9	284,3
	1,88	424,3	4,9	284,5

5.3.21 Ergebnisse Produktidentifizierung und -analyse

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.

Tabelle 191: 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 Katalysatoren der Salpetersäureherstellung Katalysatoren der Blausäureherstellung Fest- und Wirbelbettkatalysatoren. Pulverkatalysatoren Polymerisationskatalysatoren
Autokatalysatoren	Pd, Pt, Rh, Ce, La	Pd, Pt, Rh, Ce, La	Autokatalysatoren entsprechend der untersuchten Fahrzeuge
Automobile	Gd, (Tb), Dy	Gd, Tb, Dy	PKW (3 Größenklassen) 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-Faseranwendungen	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, (Pr)	Elektrofahrräder Nabendynamos Raumklimaanlagen
Keramiken	Y, (Ce)	Y	Schleifkeramiken keramische Hitzeschutzbesch.

Produktgruppe	Metallvorauswahl aus Produktgruppenidentifizierung	Relevante Metalle nach Produktanalyse	Analysierte Produkte
Absorbermaterial in Kernreaktoren Kontrollstäbe in Kernreaktoren	In, Gd	In, Gd	Absorbermaterial in Kernreaktoren Kontrollstäbe in Kernreaktoren
Hochtemperatursupraleiter	Y	Y	SQUIDs
Rechenzentren	(Pd)	Pt, Pd, Au	Rechenzentren

Metalle, deren Relevanz für die Produktgruppe nach der Produktgruppenidentifizierung noch unklar war, sind in Klammern dargestellt.

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

5.4 Metallgehalte in gewerblichen und kommunalen Abfällen

Auf Basis der Abfallanalysendatenbank ABANDA des Landesumweltamtes (LANUV) Nordrhein-Westfalen (NRW) wurden relevante Abfallarten mit den Gehalten der für das Vorhaben relevanten Metalle entsprechend dem in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Vorgehen identifiziert. Es handelt sich hierbei um eine - neben der Produktanalyse - ergänzende Betrachtung zu Anteilen an strategischen Metallen in verschiedenen Abfallarten. Diese Werte flossen aufgrund der geringen Belastbarkeit für eine Hochrechnung nicht in die Prognosen ein.

5.4.1 Zur Datenquelle ABANDA

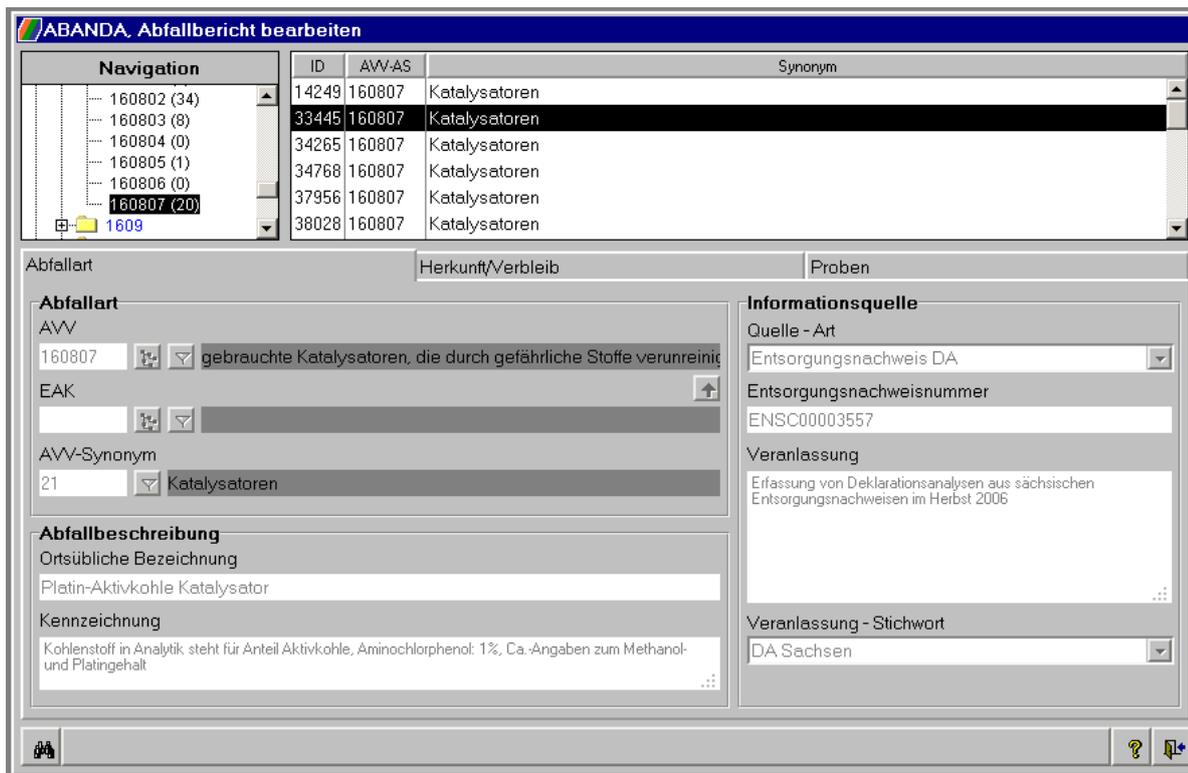
Bereits im Jahr 1993 wurde die Abfallanalysendatenbank (ABANDA) des Landes NRW als ein Instrument zur Abfallbewertung für die Abfallbehörden des Landes aufgebaut. Seitdem wurde der Datenbestand ergänzt und im Rahmen eines Forschungsvorhabens des BMBF so weit ausgebaut, dass auch andere Bundesländer die Datenbank nutzen können.

In Abfallberichten können die Nutzer (zumeist Behörden) Daten aus Abfalluntersuchungen, wie Angaben zur chemisch-physikalischen Beschaffenheit, wesentliche Informationen zur Abfallprobe und die Informationsquelle, in der Datenbank ablegen. Für ca. 63 % der in ABANDA abgespeicherten Abfallproben sind die Deklarationsanalysen der Entsorgungsnachweise aus dem Nachweisverfahren für besonders überwachungsbedürftige Abfälle die Informationsquelle (Stand Mai 2005). Weitere Datenquellen sind Aktenmaterial der Behörden in NRW, Gutachten aus dem Abfallbereich zu speziellen Fragestellungen, Labordaten aus der Umweltverwaltung NRW, Zulassungs- und Genehmigungsverfahren, Literaturrecherchen, Erhebungen zu Entsorgungsanlagen und sonstige Quellen.

Zu den ermittelten Parametern ist jeweils mit vermerkt, ob die Analysen an der Originalsubstanz oder an einem Eluat durchgeführt wurden. Die Vorschläge zur Umschlüsselung von Abfallarten der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) auf Abfallarten nach Europäischem Abfallartenkatalog (EAK) und weiterhin auf Abfallarten der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) wurden dem Umsteigekatalog des LANUV NRW entnommen.

Die Datenbank wird weiterhin gepflegt, auch Analysen aus den letzten Jahren konnten durch die Lesefunktion über einen Gastaccount eingesehen werden. Folgende Grafik zeigt den systematischen Aufbau der Datensätze zu den einzelnen Abfallanalysen.

Abbildung. 35: Aufbau der Datensätze zu den einzelnen Abfallanalysen



5.4.2 Ergebnis der relevanten Metallgehalte im Abfall

Bei der Bewertung der Ergebnisse der Recherche nach den relevanten Gehalten in den einzelnen Abfallarten ist Folgendes zu berücksichtigen:

Vollumfängliche Untersuchungen zu den Gehalten der hier zu betrachtenden relevanten Metalle in den einzelnen Abfallarten liegen nicht vor. So kann kein Abgleich gemacht werden, welche Abfallart die höchsten Gehalte aufweist. Die Abfallschlüsselnummern, von denen hohe Gehalte erwartet wurden, wurden genauer betrachtet.

Die Datenlage ist hier eher schwach. Die ABANDA-Daten bieten Anhaltspunkte durch die aufgelisteten Ergebnisse von Abfalluntersuchungen. Da hier allerdings eher das Kriterium der Einstufung der Gefährlichkeit der Abfälle entscheidend ist, liegen Untersuchungsergebnisse zum Gehalt Seltener Erden und der anderen in diesem Projekt als relevant eingestuft Metalle eher in geringem Umfang vor.

Bei der Arbeit mit der Datenbank ist aufgefallen, dass die Anzahl der Analysen für die hier relevanten Metalle allerdings in der kurzen Betrachtungszeit zugenommen hat. Die Auswertung der Datenbankeinträge sollte entsprechend weiter verfolgt werden. Für ein relevantes Metall, Indium, wurden keine Analyseergebnisse durch ABANDA angegeben. Viele der durch ABANDA angegebenen Metallgehalte beruhen nur auf einer Analyse. Liegen mehrere Analysen für denselben Parameter für eine Abfallschlüsselnummer vor, so schwanken die Einzelwerte mitunter bis zum Faktor 10. Aus diesem Grund sind die über die ABANDA-Daten ermittelten Metallgehalte in den einzelnen Abfallarten eher als grobe Anhaltswerte zu betrachten.

Auch generell ist eine Quantifizierung von Gehalten solcher Metalle, die in einzelnen Geräten bereits nur in nicht signifikanten Mengen auftreten, über Abfallschlüsselnummern schwer möglich. Über die meisten Abfallschlüsselnummern werden Abfälle unterschiedlichster Herkunft gemeinsam erfasst. So unterscheiden sich die Gehalte der einzelnen Abfallprodukte zumeist erheblich. Für eine aussagekräftige Analyse der relevanten Metallgehalte für eine Abfallart müssten entsprechende Gehalte für alle über diese Abfallschlüsselnummer deklarierten Abfälle sowie deren Anteile bestimmt werden.

Restabfall und die Gelbe Tonne wurden im Rahmen von Sortieranalysen hinsichtlich der ReStra-Metalle untersucht. Da die Ergebnisse aber gezeigt haben, dass nur Elektroaltgeräte relevant für den Beitrag der ReStra-Metalle sind, sind diese hier nicht extra mit aufgeführt, sondern im Schwesterprojekt „RePro“⁵² zu finden.

In Tabelle 192 sind die betrachteten Abfallarten mit quantifizierbaren Gehalten der relevanten Metalle sowie deren Abfallmengen aus dem Jahr 2010 zusammengefasst. Weiterhin sind die Ergebnisse einer Sortieranalyse von Restabfall und der Gelben Tonne aufgeführt. Für diese Abfallarten stehen in ABANDA keine geeigneten Angaben zur Verfügung, so dass eigene Analysen der INTECUS GmbH herangezogen wurden.

Tabelle 192: Abfallarten, von denen der Gehalt relevanter Metalle erwartet wird, sowie deren Abfallmenge im Jahr 2010

Abfallschlüsselnummern (und kurze Beschreibung der Abfallart)	Abfallmenge 2010 [Mg]20F	Relevante Metalle und deren Gehalte [g/Mg]	Metallpotenzial [Mg/a]
06 03 15* (Metalloxide, die Schwermetalle enthalten) und 06 03 16 (Metalloxide mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 03 15 fallen) (06 03 Abfälle aus HZVA von Salzen, Salzlösungen und Metalloxiden)	91.200	Cer 15.400 Lanthan 23.300	1.404 2.125
06 04 05* (Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten) (06 04 Metallhaltige Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 03 fallen)	49.800	Cer 237.200 Gold 50 Palladium 50 Platin 50 Rhodium 50	11.813 2 2 2 2
10 02 07* (feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten) und 10 02 08 (feste Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 02 07 fallen) (10 02 Abfälle aus der Eisen- und Stahlindustrie)	821.700	Gallium 22 Yttrium 21	18 17
10 11 09* (Gemengeabfall mit gefährlichen Stoffen vor dem Schmelzen) und 10 11 10 (Gemengeabfall vor dem Schmelzen mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 11 09 fällt) (10 11 Abfälle aus der Herstellung von Glas und Glaserzeugnissen)	4.700	Cer 150 Lanthan 110 Yttrium 16,5 Gallium 5	1 1 0,08 0,02

⁵² Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro), UBA-Forschungsvorhaben, Forschungskennzahl (UFOPLAN) FKZ 3711 95 318.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Abfallschlüsselnummern (und kurze Beschreibung der Abfallart)	Abfallmenge 2010 [Mg]20F	Relevante Metalle und deren Gehalte [g/Mg]	Metallpotenzial [Mg/a]
10 11 13* (Glaspolier- und Glasschleifschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten) und 10 11 14 (Glaspolier- und Glasschleifschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 11 13 fallen) (10 11 Abfälle aus der Herstellung von Glas und Glaserzeugnissen)	6.800	Cer ~19.400 Lanthan ~800	132 5
11 01 05* (saure Beizlösungen) (11 01 Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung und Beschichtung von Metallen und anderen Werkstoffen (z. B. Galvanik, Verzinkung, Beizen, Ätzen, Phosphatieren, alkalisches Entfetten und Anodisierung)	118.900	Cer 630 Gallium 6,9 Lanthan 2 Yttrium 1,1	75 1 0,24 0,13
11 01 08* (Phosphatierschlämme)	11.300	Cer 132 Lanthan 43 Yttrium 7,8 Gallium 2,8	1 0,49 0,09 0,03
11 01 09* (Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten) und 11 01 10 (Schlämme und Filterkuchen mit Ausnahme derjenigen, die unter 11 01 09 fallen)	682.300	Palladium 50 Gold 0,8 Platin 0,7	34 1 0,48
11 01 98* (andere Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten)	13.700	Yttrium 10.500	144
12 01 14* (Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten) und 12 01 15 (Bearbeitungsschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 14 fallen) (12 01 Abfälle aus Prozessen der mechanischen Formgebung sowie der physikalischen und mechanischen Oberflächenbearbeitung von Metallen und Kunststoffen)	27.300	Gold 10 Palladium 10 Platin 10	0,27 0,27 0,27
12 01 16* (Strahlmittelabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten) und 12 01 17 (Strahlmittelabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 16 fallen)	142.900	Neodym 30 Gallium 20 Yttrium 20 Cer 20 Lanthan 7 Dysprosium 6 Gadolinium 6 Samarium 6 Gold 5 Palladium 5 Platin 5 Erbium 5 Rhodium 2 Europium 2 Terbium 2	4 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 0,29 0,29 0,29
12 01 18* (ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme))	55.700	Neodym 53.450 Samarium 42.450 Dysprosium 100	2.977 2.364 6
15 02 02* (Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich Ölfilter a. n. g.), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind) und 15 02 03 (Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung mit Ausnahme derjenigen, die unter 15 02 02 fallen) (15 02 Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung)	160.500	Palladium 15.000 Platin 500	2.408 80
16 01 04* (Altfahrzeuge)	530.600	Seltene Erden 22,92	12

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Abfallschlüsselnummern (und kurze Beschreibung der Abfallart)	Abfallmenge 2010 [Mg]20F	Relevante Metalle und deren Gehalte [g/Mg]	Metallpotenzial [Mg/a]
(16 01 Altfahrzeuge verschiedener Verkehrsträger (einschließlich mobiler Maschinen) und Abfälle aus der Demontage von Altfahrzeugen sowie der Fahrzeugwartung (außer 13, 14, 16 06 und 16 08))		Dysprosium 1,15 Gadolinium 0,41 Terbium 0,04	1 0,22 0,02
16 01 06 (Altfahrzeuge, die weder Flüssigkeiten noch andere gefährliche Bestandteile enthalten)	586.900	Seltene Erden 33,11 Dysprosium 1,45 Gadolinium 0,58 Terbium 0,06	19 1 0,34 0,04
16 06 05 (andere Batterien und Akkumulatoren) (16 06 Batterien und Akkumulatoren)	5.700	Ca. 21 % NiMH-Batterien, davon 8-10 % SE Lanthan Cer Neodym	
16 08 01 (gebrauchte Katalysatoren, die Gold, Silber, Rhenium, Rhodium, Palladium, Iridium oder Platin enthalten (außer 16 08 07)) (16 08 Gebrauchte Katalysatoren)	10.900	Platin ~700 Palladium ~700 Rhodium ~300 Cer ~23.780 Lanthan ~1.450	8 8 3 259 16
16 08 02* (gebrauchte Katalysatoren, die gefährliche Übergangsmetalle oder deren Verbindungen enthalten)	12.500	Gold 50 Palladium, 50 Platin 50 Rhodium 50	1 1 1 1
16 08 04 (gebrauchte Katalysatoren von Crackprozessen (außer 16 08 07)) und 16 08 07* (gebrauchte Katalysatoren, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind)	12.000	Rhodium 41.672 Palladium 20.000 Platin 4.000	500 240 48
19 01 11* (Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten) und 19 01 12 (Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen) (19 01 Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen)	7.666.000	Seltene Erden insgesamt	192
20 01 34 (Batterien und Akkumulatoren mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 33 fallen) (20 01 getrennt gesammelte Fraktionen (außer 15 01))	3.600	Ca. 21 % NiMH-Batterien, davon 8-10 % SE Lanthan Cer Neodym	
Restabfall (Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt) (20 03 01 und weitere)	14.358.00024F*	diverse SE und Edelmetalle 4,1**	59
Gelber Sack/Gelbe Tonne (Leichtverpackungen/Kunststoffe, getrennt gesammelte Fraktionen) (15 01 06 und weitere)	5.141.000	diverse SE und Edelmetalle 4,7***	24

Anmerkungen: Abfallmenge 2010: Sofern keine anderen Angaben, Daten der Fachserie 19 Reihe 1, Statistisches Bundesamt 2010;
Relevante Metalle und deren Gehalte: Sofern keine anderen Angaben, basieren die Daten auf Angaben der ABANDA-Datenbank
*Statistisches Bundesamt: Umwelt – Abfallbilanz 2010; Wiesbaden 2012
**Werte ermittelt über Abfallanalyse der INTECUS GmbH
***Werte ermittelt über Abfallanalyse der INTECUS GmbH

Wie einleitend bereits beschrieben, basieren die in Tabelle 192 dargestellten und daraus berechneten Daten überwiegend auf der ABANDA-Datenbank. Die darin angegebenen Werte basieren überwiegend nur auf jeweils einer Analyse. Die berechneten Werte können somit nur als grobe

Richtwerte betrachtet werden. Erst mit einer umfassenderen Datenbasis könnten belastbarere Potenziale berechnet werden.

Stellt man das Recyclingpotenzial einzelner Metalle den entsprechenden Importmengen gegenüber, so ergibt sich das in Tabelle 193 dargestellte Bild.

Tabelle 193: Gegenüberstellung des Recyclingpotenzials und der importierten Mengen ausgewählter kritischer Metalle (2010)

Element	Im Abfall 2010 enthalten	2010 nach Deutschland importiert (DERA 2012)
	[Mg/a]	[Mg/a]
Ce	13.688	1.023
Au	5	171
Pd	2.693	49
Pt	140	34
Rh	507	5
SE	223	465

Die Importmengen werden jährlich durch die Deutsche Rohstoffagentur in der Rohstoffinformation (DERA 2012) veröffentlicht. Separate Mengenangaben zu den anderen in Tabelle 192 betrachteten kritischen Metallen sind darin jedoch nicht verfügbar.

Bei den Seltenen Erden sowie beim Gold sind die Importmengen höher als das gegebene Rohstoffpotenzial. Alle anderen in Tabelle 193 betrachteten Metalle haben ein höheres Rohstoffpotenzial im Vergleich zur Importmenge. Dieses Ergebnis kann darauf zurückgeführt werden, dass der überwiegende Teil der kritischen Metalle als Bestandteil von Produkten bzw. Waren und weniger als reines Metall nach Deutschland eingeführt werden und dort zu gegebener Zeit als Abfall anfallen. In der Bewertung der Ergebnisse sollte jedoch auch die vergleichsweise dünnen Datenbasis zur Ermittlung des Rohstoffpotenzials nicht außer Acht gelassen werden.

5.5 Mengenzufluss auf Basis der Produktanalyse

In der Produktanalyse wurden die Mengen strategischer Metalle, die im Jahr 2020 aus den untersuchten Produkten zu erwarten sind, bestimmt. Im Folgenden werden die hierbei gewonnenen Erkenntnisse zusammengetragen und nach Metallen gegliedert aufbereitet. In den Fällen, in denen die Produktanalyse Spannbreiten für die Metallmengen in 2020 geliefert hat, wurde dabei mit den Mittelwerten gerechnet. Bei den Produkten, für die ein Referenzszenario definiert wurde, wurde mit diesem Wert gerechnet.

Die folgende Tabelle fasst übersichtsartig die aus den verschiedenen Produktgruppen zu erwartenden Mengen strategischer Metalle zusammen.

Tabelle 194: Zusammenfassung der zu erwartenden Mengen strategischer Metalle aus den im Jahr 2020 als Abfall anfallenden betrachteten Produkten im Jahr 2020

Produktgruppe	Betrachtete Produkte	Metall	Mittel-/Referenzwert [kg]	Unterer Wert	Oberer Wert
Industriekatalysatoren		Pt	3.305	3.228	3.382
		Pd	8.127	7.695	8.558
		Rh	872	832	912

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Produktgruppe	Betrachtete Produkte	Metall	Mittel-/Referenzwert [kg]	Unterer Wert	Oberer Wert
	PGM-haltige Katalysatoren, SE-haltige (FCC-) Katalysatoren, Polymerisationskatalysatoren	La	171.500	125.000	218.000
		Ce	83.000	60.000	106.000
		Nd	2.050	1.500	2.600
		Pr	1.550	1.100	2.000
		Ge	(1.299)	(837)	(1.835)
Optische Faseranwendungen	Glasfaserkabel-Infrastruktur, Glasfaserkabel-Rechenzentren, Optische Verstärker	Ge	2,3	1,2	3,4
		Er	-	-	-
Keramiken	Schleifkeramiken, Hitzeschutzkeramiken (Flugzeugtriebwerke, stationäre Gasturbinen)	Y	2.326	734	3.946
Photovoltaikzellen	CIGS, CdTe, a-Si	In	120	41	347
		Ga	13	1,0	62,7
Batterien	NiMH-Batterien	SE, un-spez.	247.000	157.000	303.000
Medizintechnische Geräte	MRTs, CTs	Nd	666	645	3.429
		Pr	228	221	1.176
		Dy	48	46	245
		Tb	9	9	49
		Gd	24	24	25
Brennstoffzellen	SOFC	Y	63.014	50.186	78.152
		La	38.517	30.676	47.770
Absorbermaterial und Kontrollstäbe in AKW	Absorbermaterial, Kontrollstäbe in AKW	Gd	-	-	-
		In	-	-	-
Windenergieanlagen	DA-PM, IA-PM	Nd	2.889	1.308	4.470
		Dy	264	119	409
		Tb	7	3	11
Hochtemperatursupraleiter		Y	91	42	140
Automobile	PKW <1,4l; PKW 1,4l-2l; PKW >2l; Nutzfahrzeuge	Dy	2.288	2.259	2.317
		Gd	905	900	910
		Tb	91	90	92
		SE-un-spez.	52.153	51.853	52.452
Autokatalysatoren	Katalysatoren für Fahrzeuge gemäß betrachteter Automobile	Pt	3.377	3.285	3.468
		Pd	3.578	3.578	3.578
		Rh	2.381	2.358	2.404
		Ce	126.593	125.870	127.316
		La	8.252	8.208	8.295
Lasieranwendungen	Nd:YAG Laser in industriellen Anwendungen, Er:YAG Laser in med. Anwendungen	Er	14	14	14
		Y	8	8	8
		Nd	-	-	-
Mischmetall		Ce	119.500	106.000	133.000

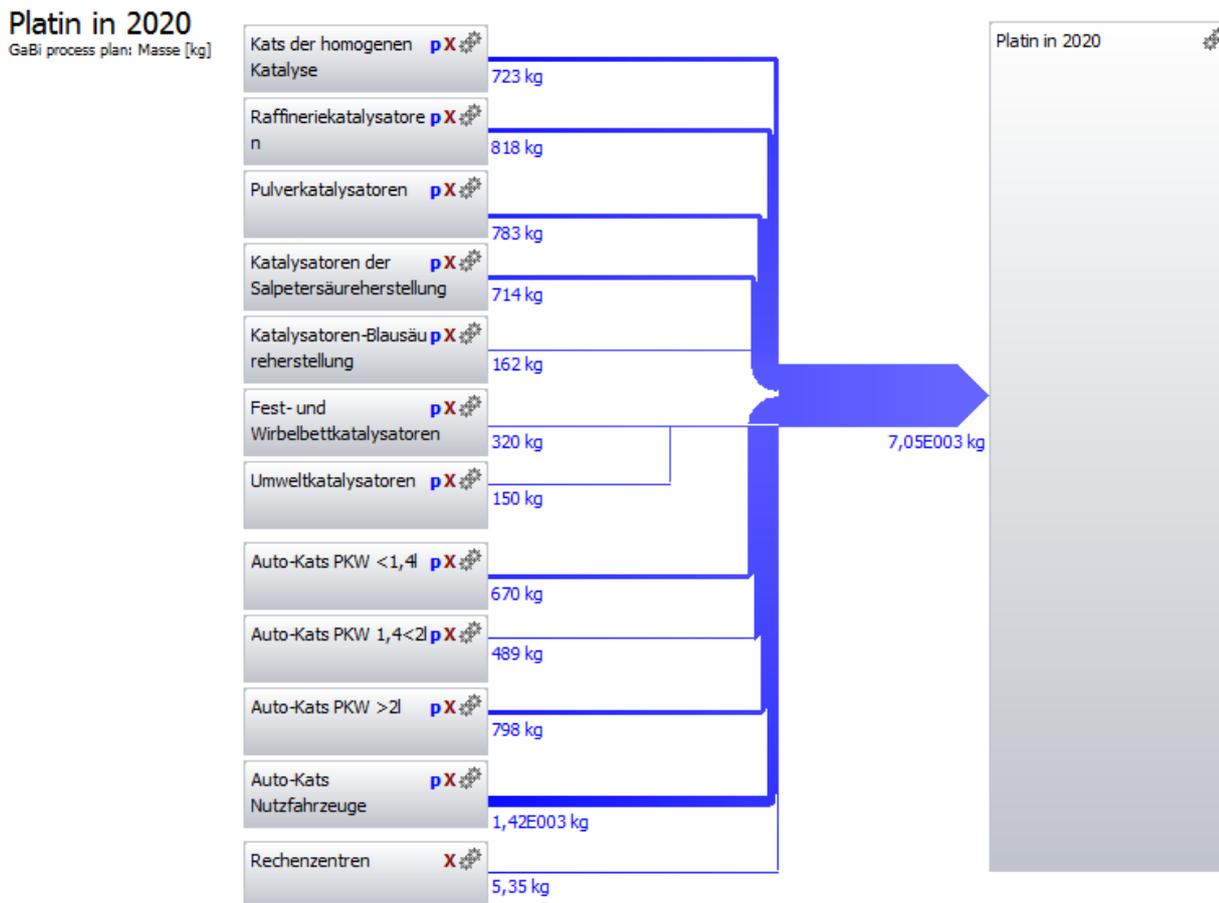
Produktgruppe	Betrachtete Produkte	Metall	Mittel-/Referenzwert [kg]	Unterer Wert	Oberer Wert
	Anwendungen von Mischmetall	La	52.000	46.000	58.000
Anwendungen der optischen Industrie	Poliermittel, (Spezialgläser)	Ce	85.920	70.040	101.800
		La	3.350	1.220	5.480
LEDs	LED-Anzeigetafeln	Ga	0,14	0,14	0,14
		In	0,11	0,11	0,11
		Ce	0,03	0,03	0,03
		Y	0,96	0,96	0,96
		Au	3,14	3,12	3,15
Haushaltsanwendungen	Elektrofahrräder, Nabendynamos, Raumklimaanlagen	Nd	9.073	8.176	9.978
		Dy	1.918	1.701	2.134
		Tb	384	340	427
Rechenzentren	Rechenzentren	Pt	5	5	6
		Pd	316	284	349
		Au	469	418	521

Im Folgenden wird für jedes Metall die gemäß der Produktanalyse gesamte in 2020 zu erwartende Menge aus den einzelnen Produkten bestimmt.

5.5.1 Platin

Aus den analysierten Produkten ergibt sich anhand der Referenz- bzw. Mittelwerte eine insgesamt zu erwartende Platinmenge von 7.052 kg in 2020. Die Spannbreite der ermittelten Menge beträgt 6.883 bis 7.221 kg. Die größten Mengen sind mit 3.670 kg aus Industriekatalysatoren und mit 3.377 kg aus Automobilkatalysatoren zu erwarten. Rechenzentren tragen nur geringfügig bei.

Abbildung. 36: Zusammensetzung der Stoffströme - Platin in 2020

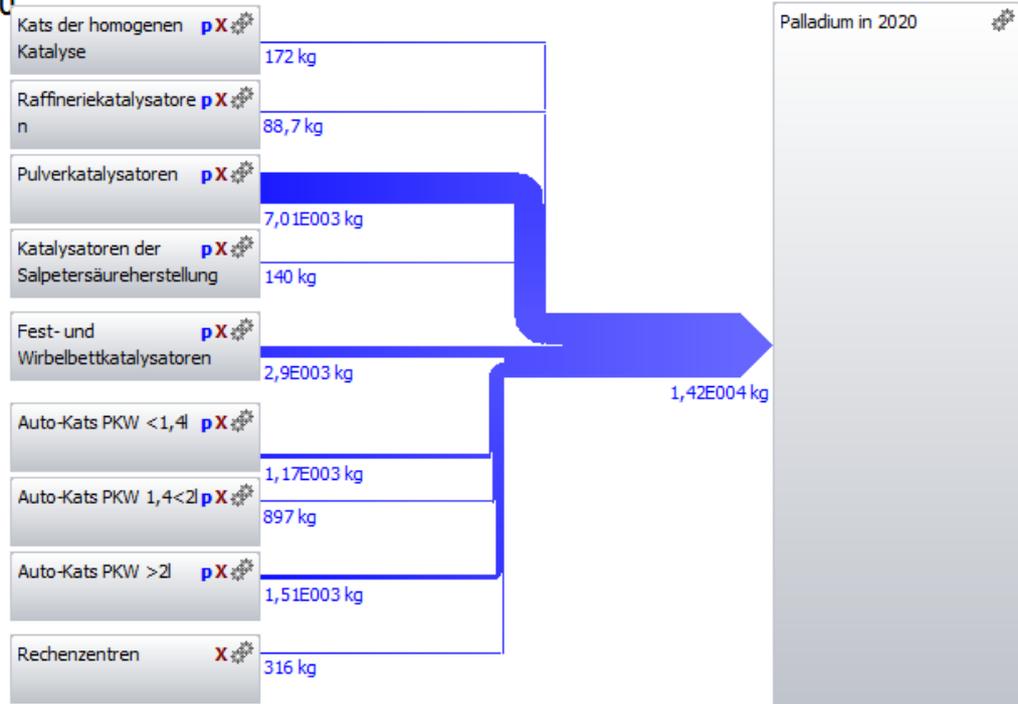


5.5.2 Palladium

Aus den analysierten Produkten ergibt sich anhand der Referenz- bzw. Mittelwerte eine insgesamt zu erwartende Palladiummenge von 14.201 kg in 2020. Die Spannweite der ermittelten Menge reicht von 13.737 bis 14.664 kg. Die größten Beiträge kommen mit 10.307 kg aus Industriekatalysatoren gefolgt von Autokatalysatoren mit 3.578 kg. Rechenzentren tragen mit rund 316 kg nur geringfügig bei.

Abbildung. 37: Zusammensetzung der Stoffströme - Palladium in 2020

Palladium in 2020



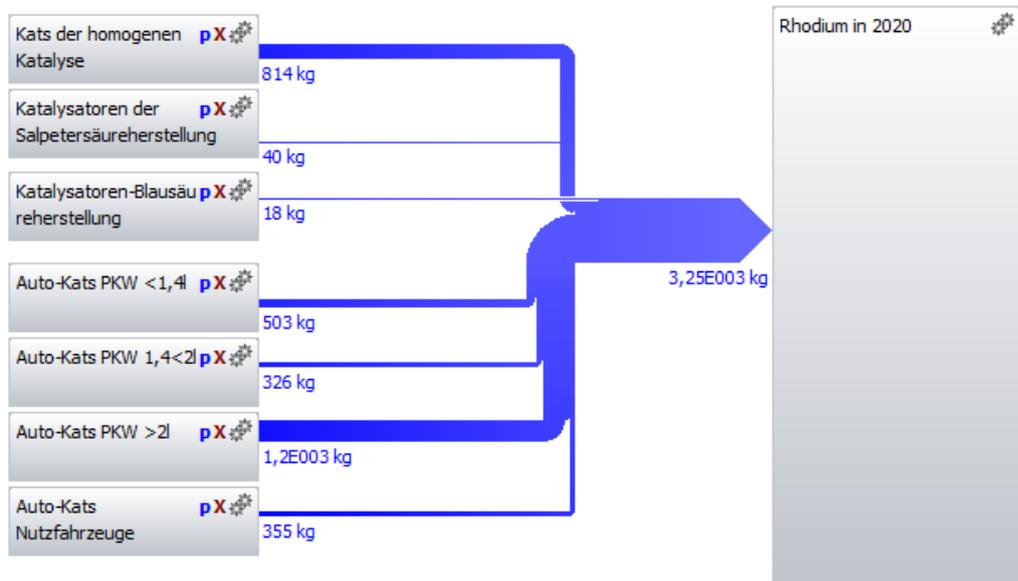
5.5.3 Rhodium

Die gesamte zu erwartende Rhodiummenge aus den analysierten Produkten ergibt sich aus den Referenz- bzw. Mittelwerten zu 3.253 kg in 2020. Die Spannweite der ermittelten Menge beträgt 3.190 bis 3.316 kg. Autokatalysatoren leisten mit 2.381 kg den größten Beitrag, gefolgt von Industriekatalysatoren mit 872 kg.

Abbildung. 38: Zusammensetzung der Stoffströme - Rhodium in 2020

Rhodium in 2020

GaBi process plan: Masse [kg]

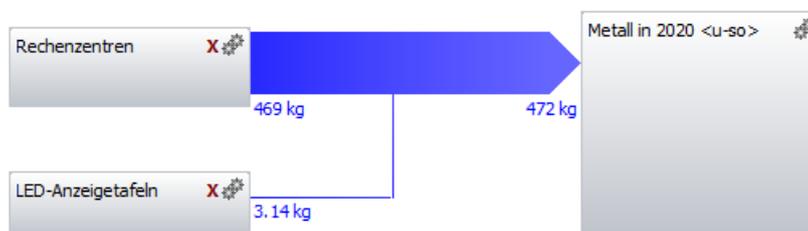


5.5.4 Gold

Aus den analysierten Produkten hat sich eine in 2020 zu erwartende Menge von 473 kg ergeben, die Spannweite reicht hierbei von 421 bis 524 kg. Hierzu tragen mit 469 kg aus Rechenzentren und 3.14 kg aus LEDs (LED-Anzeigetafeln) nur zwei Produkte bzw. Produktgruppen bei.

Abbildung. 39: Zusammensetzung der Stoffströme - Gold in 2020

Gold in 2020

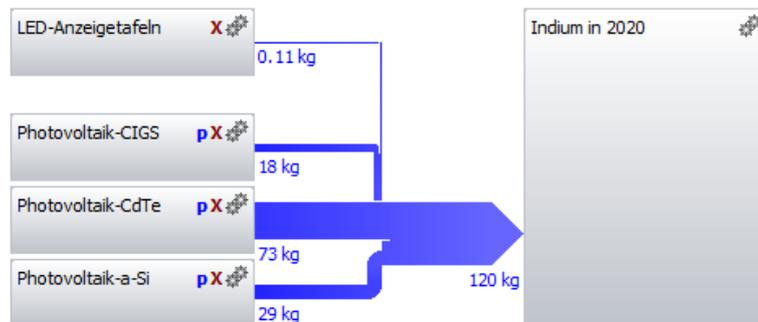


5.5.5 Indium

Die Gesamtmenge an Indium in 2020 aus der Produktanalyse beläuft sich auf 121 kg, die Spannweite reicht von 41 kg bis 347 kg. Keine Berücksichtigung findet hierbei Indium aus Kontrollstäben aus AKW, da diese der atomaren Zwischen- bzw. Endlagerung zugeführt werden und somit nicht für eine Rückgewinnung bzw. Recycling zur Verfügung stehen. Den größten Beitrag leisten die verschiedenen Dünnschicht-Photovoltaikzellen-Technologien mit insgesamt 120 kg. LEDs tragen lediglich 0.1 kg bei.

Abbildung. 40: Zusammensetzung der Stoffströme - Indium in 2020

Indium in 2020

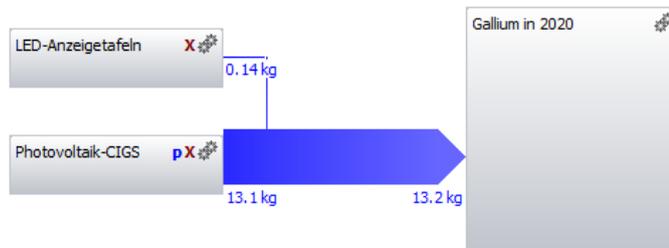


5.5.6 Gallium

Aus den analysierten Produkten hat sich eine zu erwartende Galliummenge von rund 13,3 kg in 2020 ergeben. Die Spannweite reicht von 1,14 bis 62,84 kg. CIGS-Photovoltaikzellen mit 13,1 kg dazu bei; LED Anzeigetafeln lediglich mit 0,14 kg.

Abbildung. 41: Zusammensetzung der Stoffströme - Gallium in 2020

Gallium in 2020



5.5.7 Germanium

Die Produktanalyse eine Germaniummenge von 2,3 kg (1,3 bis 3,4 kg) ergeben. Diese Menge kommt komplett aus Glasfaserkabeln. Nicht berücksichtigt ist hierbei Germanium, das in Polymerisationskatalysatoren eingesetzt wird und vollständig dissipativ ins Produkt (PET-Flaschen) übergeht. Die entsprechende Menge beträgt 1.299 kg im Referenzszenario bzw. reicht von 837 bis 1.835 kg.

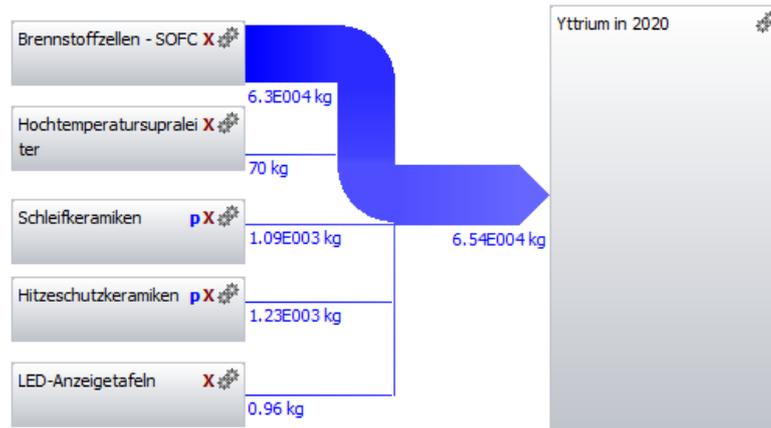
5.5.8 Yttrium

Aus den analysierten Produkten ergibt sich anhand der Referenz- bzw. Mittelwerte eine insgesamt zu erwartende Yttriummenge von 65.440 kg in 2020. Die Spannweite der ermittelten Menge reicht von 50.971 bis 82.246 kg. Den größten Beitrag leisten SOFC Brennstoffzellen mit einer zu erwartenden Menge von 63.014 kg (50.186 kg bis 78.152 kg). Aus Schleifkeramiken ist

eine Menge von 1.092 kg (24,7 bis 2.160 kg) zu erwarten, wobei hier die relativ große Datenunsicherheit sowie die dissipative Natur des Abfallstroms zu beachten ist. Aus keramischen Hitzeschutzbeschichtungen sind rund 1.233 kg zu erwarten, wovon 969 kg aus stationären Gasturbinen und 264 kg aus Flugzeugtriebwerken kommen. LED-Anzeigetafeln tragen rund 1 kg bei.

Abbildung. 42: Zusammensetzung der Stoffströme - Yttrium in 2020

Yttrium in 2020

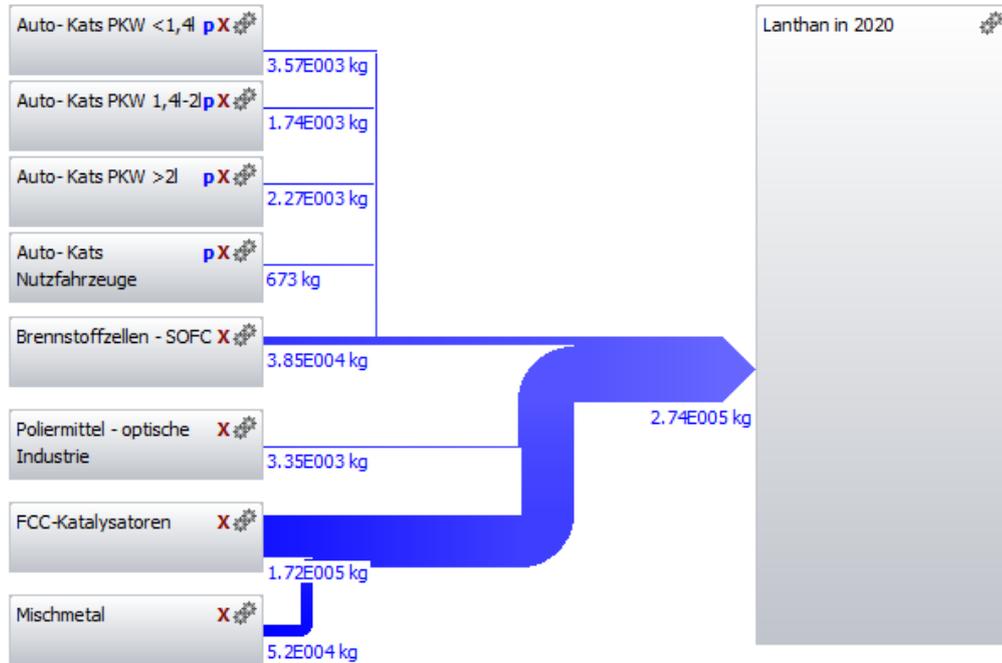


5.5.9 Lanthan

Die Produktanalyse hat eine in 2020 zu erwartende Lanthanmenge von insgesamt 273.619 kg ergeben. Die Spannweite reicht von 211.104 kg bis 337.545 kg. Den größten Beitrag leisten hier FCC-Katalysatoren mit 171.500 kg. Aus Anwendungen von Mischmetall ergibt sich eine Menge von 52.000 kg. Hierbei sind die in der Produktanalyse dargestellten Einschränkungen bzgl. Datenunsicherheit und Unklarheit der eigentlichen Endprodukte zu berücksichtigen. Für SOFC Brennstoffzellen hat die Analyse eine zu erwartende Lanthanmenge von 38.517 kg (Spannweite von 30.676 bis 47.770 kg) in 2020 ergeben. Polierschlämme der optischen Industrie tragen mit rund 3.350 kg bei. Aus Auto-Katalysatoren sind etwa 8.251 kg zu erwarten.

Abbildung. 43: Zusammensetzung der Stoffströme - Lanthan in 2020

Lanthan in 2020

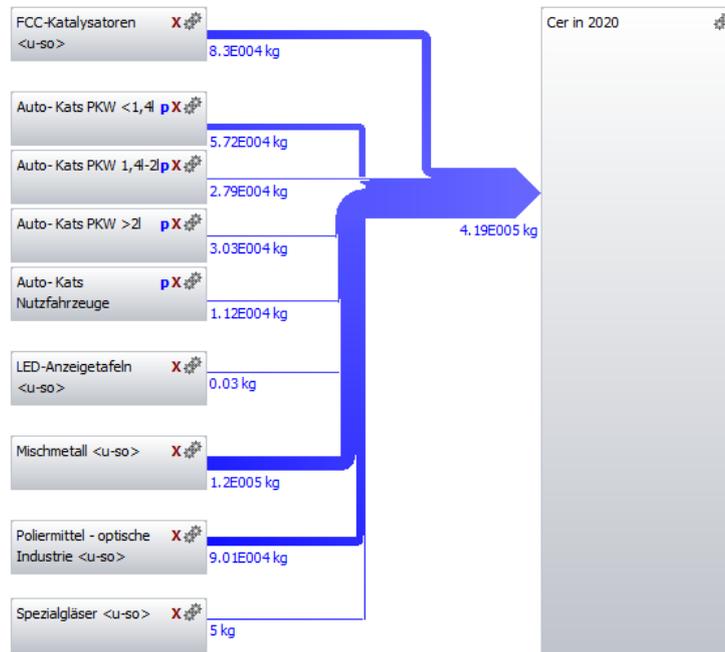


5.5.10 Cer

Die Produktanalyse hat eine Cermenge von 419.213 kg (365.310 bis 473.116 kg) ergeben. Der größte Beitrag kommt von Automobilkatalysatoren (PKW und Nutzfahrzeuge gemeinsam) mit 126.593 kg, der zweitgrößte Beitrag kommt mit einer Menge von 119.500 kg aus den Anwendungen von Mischmetall. Hierbei sind die in der Produktanalyse dargestellten Einschränkungen bzgl. Datenunsicherheit und Unklarheit der eigentlichen Endprodukte zu berücksichtigen. Es folgen Polierschlämme der optischen Industrie mit 90.120 kg. Die anderen analysierten Produkte der optischen Industrie sind hingegen vernachlässigbar, ebenso wie der Beitrag aus LED-Anzeigetafeln. Aus FCC-Katalysatoren ergibt sich eine Menge von rund 83.000 kg.

Abbildung. 44: Zusammensetzung der Stoffströme - Cer in 2020

Cer in 2020

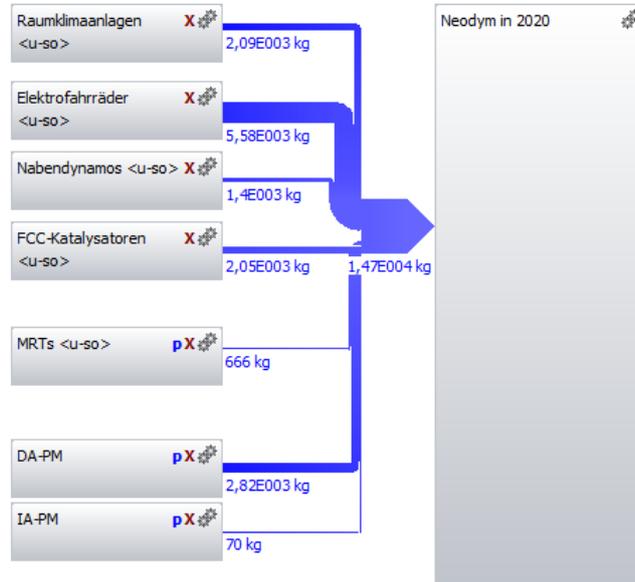


5.5.11 Neodym

Die gesamte Neodymmenge aus den analysierten Produkten beläuft sich auf rund 14.677 kg. Die Spannweite reicht hierbei von 11.629 bis 20.468 kg. Den größten Beitrag hierzu leisten mit 5.584 kg Elektrofahrräder gefolgt von Windenergieanlagen mit 2.889 kg und Raumklimaanlagen mit 2.086 kg. Geringere Beiträge kommen von FCC-Katalysatoren mit 2.050 kg, Nabendynamos mit 1.404 kg und MRTs mit rund 666 kg. Hierbei ist anzumerken, dass Windenergieanlagen in den folgenden Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit an Bedeutung gewinnen werden und auf längere Frist (2030, 2050) von einer Dominanz bzgl. der zu erwartenden Neodymmengen auszugehen ist. Dies liegt darin begründet, dass es sich bei direkt angetriebenen Windenergieanlagen mit Permanentmagneten um eine sehr junge Technologie mit gleichzeitig hoher Lebensdauer (durchschnittlich 20 Jahre) handelt, für die in den kommenden Jahren von hohen Wachstumsraten auszugehen ist.

Abbildung. 45: Zusammensetzung der Stoffströme - Neodym in 2020

Neodym in 2020



5.5.12 Gadolinium

Die nach der Produktanalyse insgesamt im Jahr 2020 zu erwartende Menge an Gadolinium beläuft sich auf rund 929 kg. Den größten Beitrag hierzu leisten mit 905 kg Automobile. Vergleichsweise geringfügig ist der Beitrag von Röntgengeräten/CTs mit 24,4 kg.

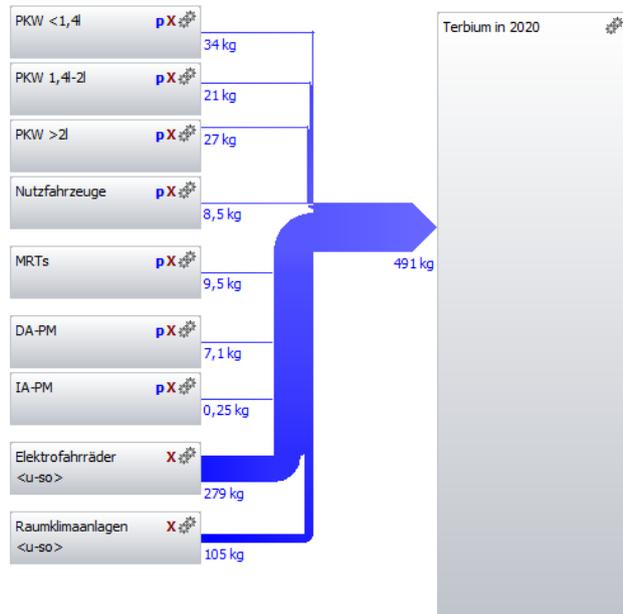
Absorbermaterial aus Kernkraftwerken ist hier nicht weiter berücksichtigt, da es der atomaren Zwischen- bzw. Endlagerung zugeführt wird.

5.5.13 Terbium

Die Gesamtmenge an Terbium aus der Produktanalyse beläuft sich auf rund 491 kg (442 bis 579 kg). Den größten Beitrag hierzu leisten mit 279 kg Elektrofahräder vor Raumklimaanlagen mit 105 kg und Automobilen mit 91 kg. Geringe Beiträge kommen von MRTs und Windenergieanlagen.

Abbildung. 46: Zusammensetzung der Stoffströme - Terbium in 2020

Terbium in 2020
 GaBi process plant: Masse [kg]

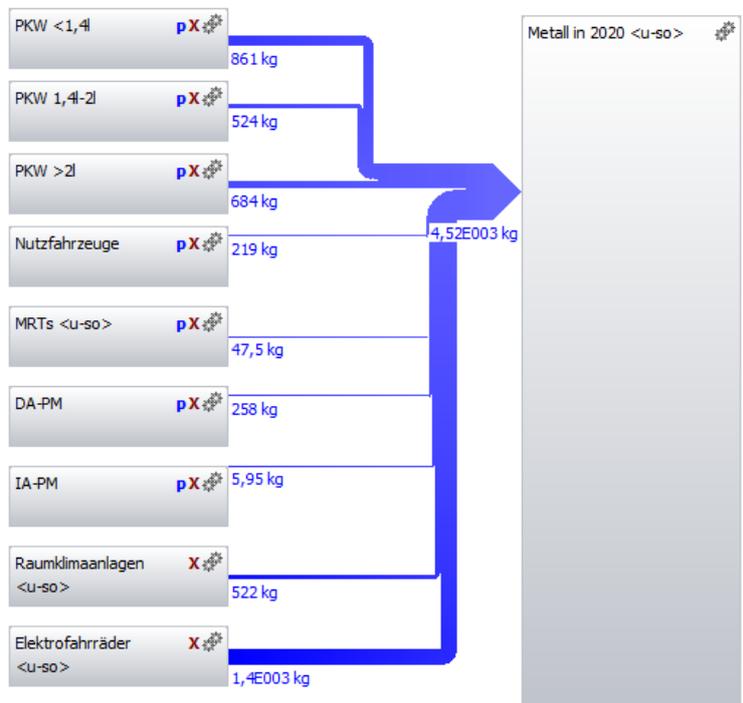


5.5.14 Dysprosium

Die Gesamtmenge an im Jahr 2020 aus den analysierten Produkten zu erwartendem Dysprosium beläuft sich auf rund 4.517 kg (4.126 - 5.105 kg). Automobile (PKW und Nutzfahrzeuge) tragen mit 2.288 kg am meisten bei, gefolgt von Elektrofahrädern mit 1.396 kg. Geringe Beiträge kommen von Windenergieanlagen mit 264 kg und MRTs mit 48 kg.

Abbildung. 47: Zusammensetzung der Stoffströme - Dysprosium in 2020

Dysprosium in 2020
GaBi process plan: Masse [kg]

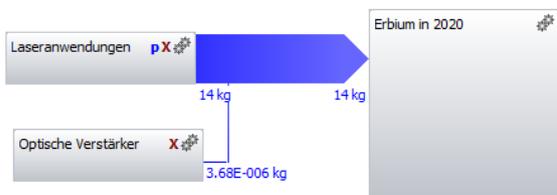


5.5.15 Erbium

Die Produktanalyse hat nur geringe Mengen von insgesamt 14 kg an Erbium aufgezeigt. Diese Menge kommt fast ausschließlich aus Laseranwendungen, zu vernachlässigen ist hierbei der Beitrag aus optischen Verstärkern.

Abbildung. 48: Zusammensetzung der Stoffströme - Erbium in 2020

Erbium in 2020



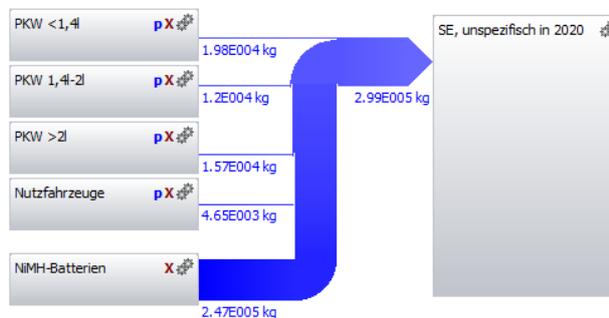
5.5.16 Seltene Erden, unspezifisch

Neben den einzeln aufgeführten Seltenen Erden war bei einigen Produkten keine Zerlegung der anfallenden Menge an Seltenen Erden in einzelne Elemente möglich. Diese werden hier zusammen aufgeführt.

Insgesamt beträgt die in 2020 zu erwartende Menge an Seltenen Erden, die nicht weiter zerlegt werden konnten, auf 299.153 kg (208.853 bis 355.452 kg). Diese kommen mit 247.000 kg im Wesentlichen aus Batterien, gefolgt von 52.152 kg aus Automobilen (PKW und Nutzfahrzeugen).

Abbildung. 49: Zusammensetzung der Stoffströme - SE, unspezifisch in 2020

SE, unspezifisch



5.5.17 Mengenzuflussbilanzierung – Zusammenfassung

In folgender Tabelle sind die 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. Bzgl. der Unsicherheiten bei einzelnen Metallen bzw. Produkten sind die Darlegungen in den Abschnitten zu den einzelnen Metallen zu beachten. Zur besseren Einordnung werden die ermittelten Mengen zusätzlich zur globalen Primärproduktion in Relation gesetzt. Hierbei wird soweit möglich auf Daten des U.S. Geological Survey für das Jahr 2012 zurückgegriffen. Für Rhodium sowie die einzelnen Seltenen Erdmetalle sind jedoch keine Daten vom USGS verfügbar, weshalb andere Quellen herangezogen wurden. Bei Rhodium wurden Angaben von Bell (2013), bei den Seltenen Erden von Du und Graedel (2011b) verwendet. Hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Du und Graedel keine (primären) Produktionsmengen, sondern Flüsse in die Nutzungsphase angeben und das Bezugsjahr 2007 ist. Da es bei den Seltenen Erden jedoch nahezu keine Recyclingaktivitäten gibt, können die beiden Mengen (Flüsse in die Nutzungsphase und Primärproduktion) als vergleichbar angenommen werden. Dennoch muss darauf hingewiesen werden, dass die von Du und Graedel (2011b) für alle Seltenen Erden angegebene Menge von 89.800 t deutlich unterhalb der vom USGS für alle Seltenen Erden angegebenen Produktionsmenge von 124.000 t liegt. Die Angaben zu den SE sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Tabelle 195: 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

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Element	Menge in 2020 [kg]	Globale (Primär-) Produktion [kg]	Anteil an globaler Produktion [%]
Dy	4.517	1.700.000	0,266
Er	14	900.000	0,002
SE, un-spez.	299.152		

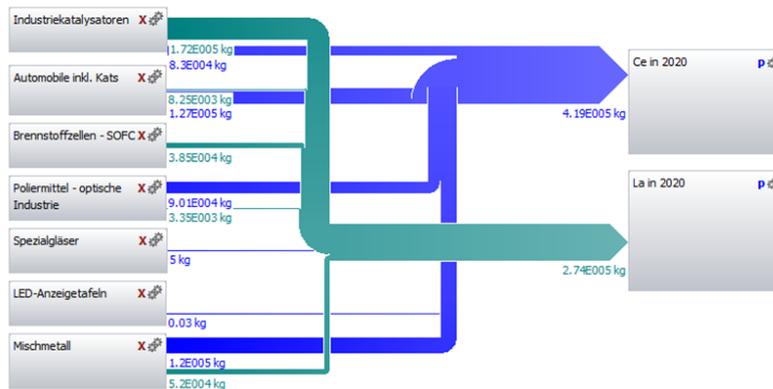
Quellen: USGS; Bell 2013; Du und Graedel 2011b. Daten für Pt, Pd, Au, In, Ga, Ge stammen vom U.S. Geological Survey und beziehen sich auf 2012, Daten zu Rh stammen von Bell (2013) ohne Jahresangabe, die Daten zu Seltenen Erden stammen von Du und Graedel (2011) und beziehen sich auf 2007.

5.5.18 Gruppierung der Mengenströme in 2020 in vier Größenklassen

In Abbildung 50, Abbildung 51, Abbildung 52 und Abbildung 53 sind die Stoffflüsse nach Produktgruppen unterteilt in vier Größenklassen dargestellt.

Abbildung 50: Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 – La, Ce

Strategische Metalle in 2020 - La, Ce



Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Abbildung 51: Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 – Pt, Pd, Rh, Y, Dy, Nd

Strategische Metalle in 2020 - Pt, Pd, Rh, Y, Dy, Nd

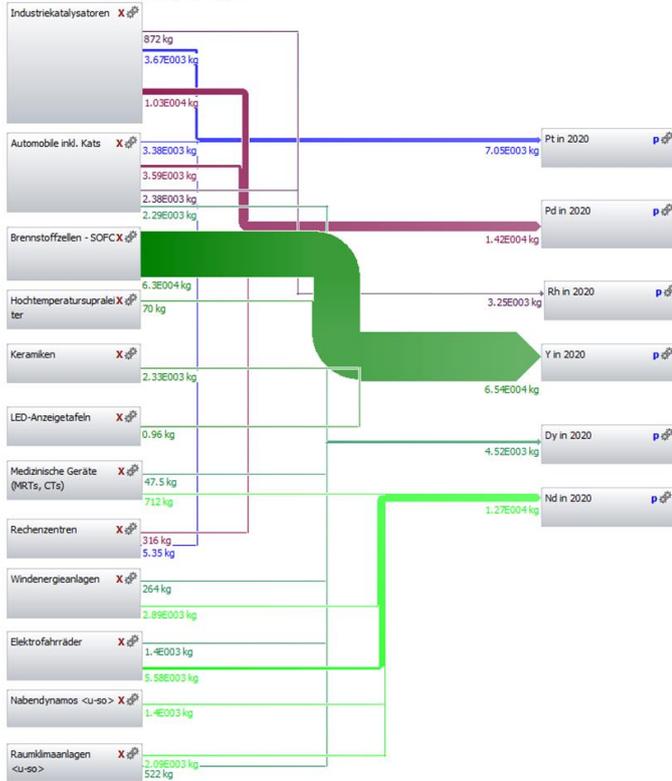
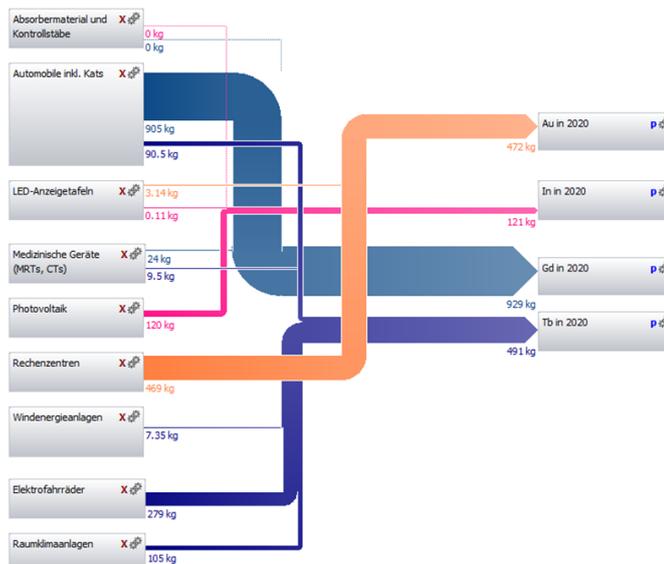


Abbildung 52: Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 – Au, In, Gd, Tb

Strategische Metalle in 2020 - Au, In, Gd, Tb



Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Abbildung 53: Stoffflüsse zu erwartender Mengen strategischer Metalle in 2020 – Ga, Ge, Er

Strategische Metalle in 2020 - Ga, Ge, Er



Stoffflüsse von Lanthan und Cer Platin, Palladium, Rhodium, Yttrium, Dysprosium und Neodym Gold, Indium, Gadolinium und Terbium Gallium, Germanium und Erbium

6 Metallverluste der Entsorgungsketten

Im Zentrum der folgenden Kapitel stehen die Fragen, welche Erfassungssysteme sowie Technologien zur Aufbereitung und zum Recycling strategischer Metalle der identifizierten 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.

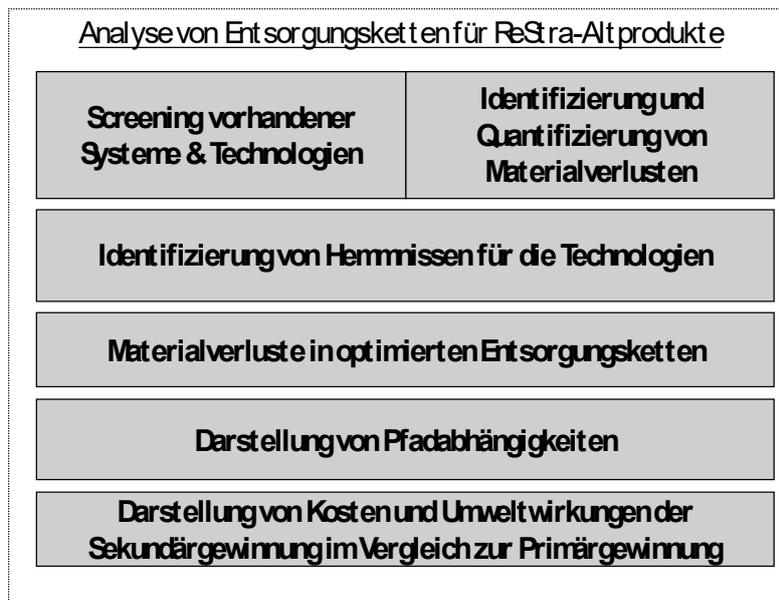
Im Technologiescreening wurden in Bezug auf die untersuchten Metalle und Produkte relevante Erfassungssysteme, Aufbereitungs- und Recyclingtechnologien identifiziert, wobei auch Technologien in Labor- und Pilotmaßstab einbezogen wurden. Dem schließt sich eine Analyse der in den derzeit in Deutschland bestehenden Entsorgungsketten auftretenden Verluste strategischer Metalle an. Aufbauend auf dieser Ist-Situation werden - soweit möglich - im Hinblick auf die Rückgewinnung strategischer Metalle optimierte Entsorgungsketten für die untersuchten Produkte skizziert.

Für die untersuchten strategischen Metalle und Produkte werden Hemmnisse und Pfadabhängigkeiten dargestellt, worunter Faktoren fallen, die die Rückgewinnung strategischer Metalle auf verschiedenen Aggregationsebenen beeinflussen. Hemmnisse beziehen sich auf die einzelnen Technologien und Sammelsysteme beziehungsweise auf deren Marktdurchdringung und wurden für die im Technologiescreening identifizierten Technologien untersucht. Auf Ebene des Gesamtsystems wurden Pfadabhängigkeiten betrachtet. Unter Pfadabhängigkeiten ist die Bevorzugung bestimmter Systeme gegenüber anderen zu verstehen, die sich durch in der Vergangenheit liegende Entscheidungen über Erfassungssysteme, Marktanreize und andere strukturelle Maßnahmen ergeben.

Ergänzend werden abschließend Kosten und Umweltbelastung der Sekundärmaterialgewinnung im Vergleich zur Primärerzeugung diskutiert. Im Zentrum steht hierbei die Frage, inwieweit sich die sekundäre Gewinnung strategischer Metalle in Bezug auf ökologische und ökonomische Kriterien vorteilhaft gegenüber der Primärgewinnung darstellt.

Die Struktur des Arbeitspakets, die sich aus den einzelnen Arbeitsschritten ergibt, ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

Abbildung 54: Struktur von Arbeitspaket 3



Im Zentrum der Betrachtung stehen die in Kapitel 4 vor dem Projekthintergrund als relevant identifizierten strategischen Metalle.

6.1 Screening vorhandener Systeme und Technologien im Entsorgungsbereich

Das Ziel des Technologiescreenings war die Identifizierung der relevanten Systeme zur Erfassung der untersuchten Altprodukte sowie von Technologien zum Recycling der ausgewählten Metalle. Neben sich bereits im Einsatz befindlichen Technologien wurden auch Technologien im Labor- und Pilotmaßstab berücksichtigt und entsprechend kategorisiert. Der geografische Untersuchungsrahmen ist global.

Die gewonnenen Daten basieren auf aktuellen Studien zur Thematik, Meldungen der Fachpresse, Angaben aus Patentdatenbanken (DEPATIS), Internetauftritten der durchführenden Unternehmen und deren Vorstellung auf Fachtagungen. Ergänzend dazu wurden Erfahrungen und Kontakte der Projektpartner aus dem ReStra-Projekt eingepflegt. Mit dem parallel laufenden RePro-Projekt wurden Informationen zu Verwertungsverfahren abgeglichen. Auch mit anderen Forschungsgruppen (z. B. TU Berlin, Fraunhofer ICT) ist ein Erfahrungsaustausch auf diesem Gebiet erfolgt.

6.1.1 Erfassungs- und Rücknahmesysteme

Rückgewinnungsverfahren sind in der Regel selektiv, d. h. sie gewinnen ausgewählte Elemente oder Verbindungen zurück und verschieben andere in Outputfraktionen, aus denen sie nicht zurück gewonnen werden. Die vorgeschalteten Schritte der Entsorgungsketten müssen dementsprechend so gestaltet sein, dass ReStra-Zielmetalle, die „verloren“ gehen würden, bereits vorher separiert werden. Hier kann neben der Vorbehandlung auch die (getrennte) Erfassung von Abfällen bzw. Altprodukten eine wesentliche Rolle spielen. Solange keine rechtlichen Rahmenbedingungen entsprechende Vorgaben machen, erfolgt die Kommunikation von der Rückgewinnung über die Vorbehandlung zur Sammlung über ökonomische Impulse. Diese von den Rückgewinnungsanlagen ausgehenden Impulse werden mit jeder Stufe in der Entsorgungskette abgeschwächt. Gerade bei komplexen Ketten, die eine Vielzahl von „Endpunkten“ mit ggf. auch di-

vergierenden und/oder widersprüchlichen ökonomischen Signalen haben, sind die Steuerungsimpulse bei der Sammlung bereits so schwach, dass keine für den Akteur gewinnbringenden ökonomischen Treiber mehr wirken. Daher hat die rechtliche Steuerung der Sammlung bzw. der getrennten Erfassung von Abfällen einen besonderen Stellenwert. Oftmals sind für die betrachteten Produktgruppen keine speziellen technischen Erfassungssysteme vorgegeben. Es werden die im Rahmen der Abfallwirtschaft standardisierten Behältnisse (Müllgroßbehälter, Container, Gitterboxen) bzw. auch andere Behältnisse (Kartons, Fässer) je nach deren Eignung zur Erfassung der betrachteten Produktgruppen genutzt.

Spezifisch im Rahmen der erweiterten Produktverantwortung nach KrWG ist die Rücknahme der folgenden betrachteten ReStra-Produkte geregelt:

- gemäß AltfahrzeugV: Altfahrzeuge, Fahrzeugkatalysatoren
- gemäß BattG: NiMH-Batterien
- gemäß ElektroG2: Laseranwendungen, Brennstoffzellen (soweit nicht Bestandteil ortsfester Großanlagen), optische Faseranwendungen, Photovoltaik, LED-Anzeigetafeln, Haushaltsanwendungen (Elektrofahrräder, Raumklimaanlagen), Hochtemperatursupraleiter (SQUIDs), Photovoltaikmodule

Alle anderen Produktgruppen (mit Ausnahme der im Abfallrecht nicht geregelten Absorbentmaterialien und Kontrollstäbe in Kernreaktoren) sind entsprechend den allgemeinen Anforderungen des KrWG zu entsorgen.

Die Ergebnisse des System- und Technologiescreenings für Erfassungssysteme werden in den jeweiligen Kapiteln zu den Altprodukten dargestellt (siehe Kapitel 6.2.3).

Da mehrere Altprodukte in den Geltungsbereich des ElektroG2 fallen, werden die übergeordneten Anforderungen dieses Gesetzes bereits in diesem Kapitel zusammenfassend dargestellt.

Die Erfassung von Altgeräten aus privaten Haushalten und vergleichbaren Anfallstellen (z. B. Kleingewerbe) erfolgt entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 durch öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (öRE) sowie Hersteller und Vertreiber (ElektroG2 § 12). Dies trifft für die ReStra-Produkte Photovoltaikmodule (dual use-Geräte⁵³), Elektrofahrräder, Raumklimaanlagen und ggf. kleine Rechenzentren zu.

Die Anzahl der Sammelstellen der öRE wird auf 4.000 bis 5.000 geschätzt. Die durchschnittliche Öffnungszeit der Sammelstellen lag bei 19 Stunden pro Woche, die Öffnungszeiten lagen oftmals zu Zeiten, die für berufstätige Verbraucher kaum nutzbar waren (z. B. wochentags zwischen 10 und 17 Uhr) und die Sammelstellen waren oftmals schwer erreichbar (Sander 2015). Dieses unkomfortable Erfassungssystem wurde durch das ElektroG2 erweitert, indem nun auch der Handel

⁵³ Für Geräte, die sowohl in privaten Haushalten als auch im gewerblichen Kontext genutzt werden (dual use Geräte), erfolgt die Sammlung auch durch die öffentlich-rechtlichen Entsorger. Gewerbliche Großanlagen werden durch das Herstellerrücknahmesystem erfasst, da es sich nicht um Mengen handelt, die mit den in Haushalten anfallenden Mengen vergleichbar sind (ElektroG2 § 3 Abs. 5).

unter bestimmten Bedingungen zur Sammlung verpflichtet wurde (Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte muss größer 400 m² sein, ElektroG2 § 17 Abs. 1).⁵⁴

Die durch die öRE gesammelten Geräte werden von den Herstellern zur weiteren Entsorgung übernommen, es sei denn, die öRE behalten die gesammelten Altgeräte entsprechend ElektroG2 § 14 Abs. 5 in der eigenen Verantwortung („Optierung“).

Die Behältnisse zur Abholung der von den öRE gesammelten Altgeräte müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Sie müssen abgedeckt sein.
- Sie müssen für die Abholung durch herkömmliche Abholfahrzeuge geeignet sein.
- Die Behältnisse für Informations- und Telekommunikationsgeräte (also auch Geräten aus Rechenzentren) müssen eine separate und bruchsichere Erfassung der Bildschirmgeräte gewährleisten.

Laut stiftung ear (2014) wurden mit Stand April 2014 insgesamt 1.686 Übergabe- bzw. Abholstellen durch die 494 öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger betrieben.

Des Weiteren haben die Hersteller für Altgeräte anderer Nutzer als privater Haushalte (b2b-Geräte), die als Neugeräte nach dem 13. August 2005 in Verkehr gebracht wurden, eine zumutbare Möglichkeit zur Rückgabe zu schaffen. Abweichende Regelungen, bspw., dass der Nutzer die Entsorgungspflichten des Herstellers nach §§ 11 u. 12 selbst übernimmt, können vertraglich vereinbart werden. Dies trifft für die ReStra-Produkte Laseranwendungen, Brennstoffzellen (so weit nicht Bestandteil ortsfester Großanlagen), optische Faseranwendungen, LED-Anzeigetafeln und Hochtemperatursupraleiter und große Rechenzentren zu.

Darüber hinaus haben die Hersteller die Möglichkeit, auf freiwilliger Basis individuelle oder kollektive Rücknahmesysteme für die unentgeltliche Rückgabe von Altgeräten aus privaten Haushalten einzurichten und zu betreiben. Dies wird z. B. bei Photovoltaikmodulen und Medizingeräten (MRT, Röntgengeräte) genutzt.

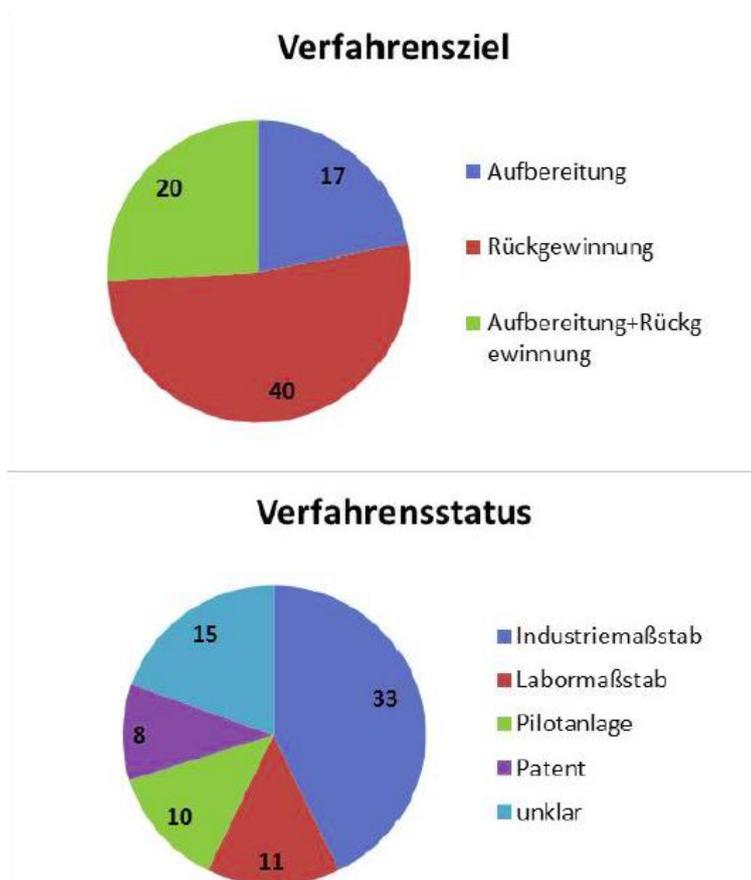
6.1.2 Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren

Zu den Rückgewinnungsverfahren wurden 105 Verfahren recherchiert, von denen 77 als relevant in Bezug auf die hier untersuchten Metalle identifiziert wurden. Identifizierte Technologien zur Rückgewinnung dieser Metalle sind differenziert in einer tabellarischen Aufstellung im Anhang

⁵⁴ Anzumerken ist, dass das ElektroG2 damit hinter den Mindestanforderungen der Europäischen WEEE-Richtlinie zurückbleibt, die eine Rücknahmepflicht für alle Vertreiber unabhängig von der Größe der EEE-Verkaufsfläche vorsieht, wenn ein vergleichbares neues Gerät gekauft wird (1:1-Rücknahme). Ein Abweichen von den Mindestanforderungen ist laut WEEE-Richtlinie erlaubt, wenn sichergestellt ist, „dass die Rückgabe der Elektro- und Elektronik-Altgeräte für den Endnutzer hierdurch nicht erschwert wird“ (WEEE-RL Art. 5 Abs. 2(b)). Ein Rücknahmesystem, das diese Anforderung erfüllt, ist nach Ansicht der Autoren nicht etabliert (Sander 2015).

dieses Berichtes zusammengefasst (siehe Anhang 9.6). Dabei wurden Technologien unterschiedlichster Reifegrade entlang der gesamten Prozesskette der Metallrückgewinnung berücksichtigt. Die folgende Grafik fasst die Verfahrensziele sowie den Verfahrensstatus zusammen.

Abbildung 55: Überblick Ziel und Status von Rückgewinnungsverfahren (Anzahl)



Versuche, vorhandene Technologien miteinander zu verknüpfen laufen in der Praxis in verschiedenen Forschungsvorhaben wie z. B. des „Recycling-Cluster wirtschaftsstrategische Metalle Niedersachsen“ (REWIMET) an. REWIMET stellt ein Netzwerk von Unternehmen, wissenschaftlich arbeitenden Institutionen, Gebietskörperschaften und wissenschaftliche Einrichtungen dar, welches es sich zum Ziel gemacht hat Lücken in der Wertschöpfungskette zu schließen, wie beispielsweise in den Bereichen:

- Steuerung und Nutzung von Abfällen aus Produktionsprozessen,
- Sammlung und Rückführung von Abfällen aus dem Konsumbereich in die Verwertungskette (Erhöhung von Sammelquoten),
- Spezifische Aufbereitungstechnologien zur Erzeugung von Sekundärrohstoffen aus Abfällen,
- Verwertungsprozesse zur Verarbeitung von Sekundärrohstoffen zu marktfähigen Sekundärwerkstoffen,
- Rückgewinnung von Wertstoffen aus anthropogenen Lagerstätten (Deponien, Halden, Bergeteichen).

Zielmetalle sind dabei u. a. Indium, Platin, Gallium und Germanium.

Auch in Bayern haben sich 14 bayerische Hersteller von Recycling-Technologien in einem Netzwerk unter der Dachmarke „Recycling Technologies Bayern“ (RTB) zusammengeschlossen. So verfügt das Netzwerk über unterschiedliche Schlüsseltechnologien. Das Leistungsspektrum umfasst Anlagentechnik aus den Bereichen trocken- und nassmechanische sowie thermische Aufbereitungstechnologie und automatische Sortier- und Zerkleinerungstechnik. Für Inputmaterial wie Elektroaltgeräte, Leiterplatten, Shredderleicht- und -schwerfraktion sollen im Rahmen von Demonstrationsprojekten Verfahren im Prozessmaßstab aufgebaut, Aggregate verknüpft und die Prozessführung optimiert werden. Besonderer Forschungsschwerpunkt liegt in der Rückgewinnung von Metallen aus der Staubfraktion (< 500 µm), dafür sollen mechanische Verfahren entwickelt werden und begleitend wird die Anwendung einer im Netzwerk vorhandenen spezialisierten Pyrolysetechnologie vorangetrieben.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die identifizierten Aufbereitungs- und Rückgewinnungstechnologien für ReStra-Altprodukte bzw. Abfallfraktionen, die bei der Aufbereitung von ReStra-Altprodukten anfallen (können).

Tabelle 196: Legende zur Tabelle 197: Implementierungsmaßstäbe

Etabliert ...	Großtechnisch	Demonstrationsanlage	< Demonstrationsanlage
für ReStra-Altprodukt	1a	2a	3a
für andere Abfälle	1b	2b	3b

Liegen unterschiedliche Entwicklungsstände vor, wird jeweils der am weitesten entwickelte dargestellt.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 197: Überblick der Ergebnisse aus dem Technologiescreening

ReStra-Produkt	Au	Ce	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	In	La	Nd	Pd	Pr	Pt	Rh	Sm	Tb	Y	SE
Raffineriekat.												1a		1a					
Salpetersäureproduktion												1a		1a					
Blausäureproduktion												1a		1a					
Pulverkat.												1a		1a					
Fest- und Wirbelbettkat.												1a		1a					
Homogene Katalyse												1a		1a	1a				
Umweltkat.														1a					
FCC Kat.		1b								1b									
Polymerisationskat.								1b											
Autokat.														1a	1a				1b
Andere Automobilkomponenten																			2a
Strahlenschutzgläser		3b																	
Lasergläser		3b																	
PV CdTe									1b										
PV a-Si									1b										
PV CIGS						1b			1b										
Hitzeschutzkeramiken																			1b
Mischmetall in der Metallurgie		3b								3b									
Batterien																			1a
Poliermittel		1b								1b									
Lasieranwendungen				3b															3b
Windenergie			2a								2a						2a		
MRTs											2a								
Röntgengeräte							1b												
Brennstoffzellen										1b									3b

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

ReStra-Produkt	Au	Ce	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	In	La	Nd	Pd	Pr	Pt	Rh	Sm	Tb	Y	SE
EDFA				3b															
Glasfaserkabel								3b											
LEDs	1a	1b				1b			1b										1b
Elektrofahrräder (Pedelects)			2a								2a							2a	
Nabendynamos											2a		2a						
Raumklimaanlagen			2a								2a							2a	
Schleifkeramiken																			1b
Absorbermaterial Kontrollstäbe							1b		1b										
Hochtemperatursupraleiter																			3b
Rechenzentren	1a											1a		1a					

6.2 Identifizierung und Quantifizierung von Materialverlusten entlang der Entsorgungskette

Im Rahmen der folgenden Kapitel erfolgt eine Abschätzung der Materialverluste, die in der Entsorgungskette der ReStra-Altprodukte auftreten. Diese Aufnahme der Ist-Situation ist eng mit dem Technologiescreening in Kapitel 6.1 verknüpft. Ausgehend von der Ist-Situation der Entsorgungsketten wurden jeweils optimierte Recyclingketten entworfen, die auch Recyclingtechnologien im Labor- und Pilotmaßstab berücksichtigen. Wo aufgrund identifizierter Zielkonflikte oder sonstiger Hindernisse (siehe jeweilige Kapitel zu den Altprodukten) keine in Bezug auf die Rückgewinnung strategischer Metalle optimierte Entsorgungskette skizziert werden kann, wurde dies entsprechend kenntlich gemacht.

Es ist zu beachten, dass die entlang der Entsorgungskette auftretenden Verluste strategischer Metalle nicht allein von den angewandten Recyclingverfahren abhängen, sondern sich aus aufeinanderfolgenden Prozessschritten - von der Sammlung der Altprodukte über Sortierung und Aufbereitung bis zur eigentlichen Metallrückgewinnung am Ende dieser Kette - ergeben. Es wurden also sowohl die Verluste in den einzelnen Schritten sowie auch Gesamtverluste entlang der Entsorgungskette ermittelt.

Während im letzten Schritt der Entsorgungskette die Metalle bspw. durch pyro- oder hydrometallurgische Verfahren zurückgewonnen werden, sind die vorgeschalteten Schritte entscheidend dafür, ob die Fraktionen, die strategischen Metalle enthalten, einer Verwertung zugeführt werden können, die deren Rückgewinnung erlaubt. Zur Reduzierung der Materialverluste am Produktlebensende ist es daher von höchster Wichtigkeit sicherzustellen, dass die Altprodukte in einem Abfallstrom landen, der in geeigneter Weise verwertet wird, was ein gutes Verständnis und Management der Produktflüsse erfordert (vgl. bspw. Hagelüken und Meskers 2009). Neben der effizienten Sammlung ist auch eine geeignete Sortierung und Aufbereitung insbesondere komplexer Produkte von großer Wichtigkeit.

Zudem lässt sich vorangestellt sagen, dass aufgrund des zunehmend dissipativen Einsatzes von strategischen Metallen in Produkten sowie thermodynamischer Grenzen selbst bei einer verlustfreien Sammlung keine 100-prozentige Kreislaufführung (siehe Kapitel 6.6.2) erreichbar sein wird (Hagelüken und Meskers 2009). Gerade vor diesem Hintergrund ist eine funktionierende Sammlung mit anschließendem Einsatz effizienter Aufbereitungs- und Recyclingtechnologien umso wichtiger.

6.2.1 Methodische Herangehensweise

Zur Bestimmung der Verlustraten entlang der Entsorgungskette wurde für jedes Produkt bzw. die in Bezug auf die untersuchten strategischen Metalle relevanten Produktkomponenten der Entsorgungsweg aus Sammlung, Sortierung, Vorbehandlung und Rückgewinnung betrachtet (siehe Abbildung 56). Die Untersuchung richtete sich hierbei zunächst auf die gegenwärtige Situation bevor in einem zweiten Schritt - soweit möglich - eine optimierte Recyclingkette entworfen wurde.

Ähnliche Vorgehensweisen in Bezug auf die Ist-Situation findet sich in anderen Untersuchungen der Materialverluste entlang der Entsorgungskette von Produkten wie bspw. bei Hagelüken (2010b) für die Betrachtung der Prozesskette der Edelmetallentsorgung oder für verschiedene Elektronikaltgeräte in Buchert et al. (2012), Chancerel (2010), Chancerel et al. (2009) sowie Chancerel und Rotter (2009a).

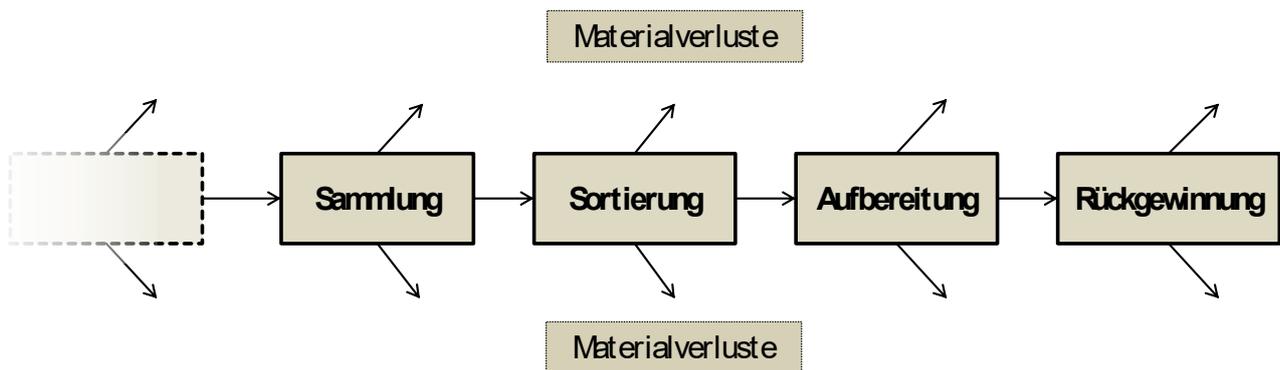
Zwar findet die eigentliche Metallrückgewinnung erst im letzten Schritt dieser Kette statt, die vorhergehenden Schritte sind aber ausschlaggebend dafür, ob die Metalle der Rückgewinnung zugeführt werden oder bereits in den vorherigen Schritten „verloren gehen“⁵⁵. Auch wenn beispielsweise gerade für Edelmetalle eine Rückgewinnungsrate von über 95 % durchaus erreichbar ist, liegen die Materialverluste entlang der Entsorgungskette bei den meisten Konsumgütern oberhalb von 50 % (Hagelüken 2010b). Hierbei ist jedoch anzumerken, dass bei den meisten industriell genutzten Produkten im Gegensatz zu privat genutzten Produkten weitgehend geschlossene Kreisläufe vorherrschen, die zumindest für Edelmetalle meist hohe Gesamtrückgewinnungsraten ermöglichen (Hagelüken et al. 2005a) (siehe auch Abschnitt 6.2.2).

Als räumliche Systemgrenze für das Projekt ReStra wurde die Bundesrepublik Deutschland festgelegt. So wurden beispielsweise im vorherigen Arbeitspaket nur die in Deutschland zu erwartenden Abfallmengen bestimmt, während Produkte, die innerhalb ihrer Nutzungsphase exportiert werden, in der Berechnung ausgenommen wurden. Für die Bestimmung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette hingegen bietet sich eine weniger strikte Anwendung der Systemgrenzen an. So sind Exporte von strategischen Metallen in Abfällen nicht zwingend als Verlust zu verstehen, da auch außerhalb der Systemgrenzen eine Rückgewinnung möglich ist. Entsprechend wird in Fällen, wo bekannt ist, dass unabhängig vom Ort der Aufbereitung und Rückgewinnung eine weitreichende Kreislaufführung der in Deutschland eingesetzten Metalle stattfindet, auf eine entsprechende Unterscheidung (zwischen Rückgewinnung innerhalb und außerhalb der Systemgrenzen) ggf. verzichtet. Dasselbe gilt für Produkte bzw. Produktgruppen, für die noch keinerlei Recyclingsysteme existieren, sodass ein Verlassen der Systemgrenzen keinen Einfluss auf die Kreislaufführung hat. Eine tatsächliche Relevanz der Systemgrenzen ergibt sich hingegen in solchen Fällen, in denen sich durch das Verlassen der Systemgrenzen Konsequenzen für die Rückgewinnungs- und Verlustquoten ergeben können. In solchen Fällen wird dies in der Analyse entsprechend berücksichtigt.

Zur Quantifizierung der Materialverluste erfolgte unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Technologiescreening entlang der Entsorgungskette eine Literaturrecherche und eine Befragung von projektinternen und externen Experten bzgl. der Materialverluste in jedem Schritt. So wurden für jedes Produkt die Materialverluste entlang der skizzierten optimierten Entsorgungskette ermittelt.

⁵⁵ Wobei hier „verloren gehen“ im Sinne der Nicht-Rückführung der Metalle in den Wirtschaftskreislauf gemeint ist; physisch gehen die Metalle nicht verloren.

Abbildung 56: Typische Entsorgungskette



Sonderfälle ergeben sich bei solchen Produkten, die bisher nicht in relevantem Maßstab als Abfall anfallen. Entsprechend findet hier zwar keine Rückgewinnung der enthaltenen strategischen Metalle statt, es treten aber auch keine Verluste auf. Solche Fälle wurden entsprechend gekennzeichnet. Anhand der Recyclingsituation für das jeweils betroffene Metall lassen sich zudem allgemeine Aussagen zur Ist-Recyclingsituation treffen.

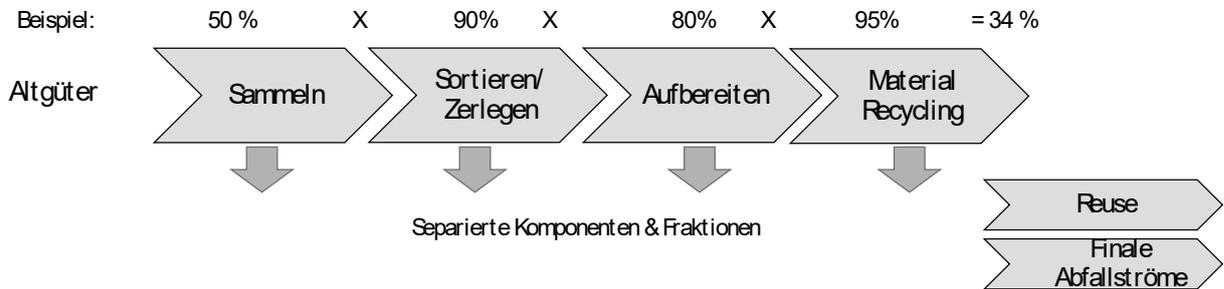
Für einen großen Teil der untersuchten Metalle ist bereits bekannt, dass die end-of-life Recyclingraten, also der Recyclinganteil am Lebensende von Produkten, unter einem Prozent liegen und die Materialverluste sich entsprechend über 99 Prozent bewegen. Dies gilt für die untersuchten Seltenen Erden (Yttrium, Lanthan, Cer, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Erbium und Neodym) sowie für Indium, Gallium und Germanium (vgl. Graedel et al. 2011b; Graedel et al. 2011a). In diesen Fällen konzentriert sich die Analyse schwerpunktmäßig darauf, die „Hotspots“ innerhalb der Entsorgungskette zu identifizieren und technische, ökonomische oder sonstige Bedingungen, die für die hohen Verlustraten ursächlich sind, zu beleuchten.

Für die Skizzierung der optimierten Recyclingketten kann bezüglich der Schritte Sortierung, Aufbereitung und Rückgewinnung zum einen über Verfahren eine Abschätzung vorgenommen werden, die bereits im Labor- oder Pilotmaßstab existieren und die aus dem Technologiescreening in Abschnitt 6.1 bekannt sind, oder zum anderen über Verfahren, die sich bereits für vergleichbare Produkte im Einsatz befinden und sich voraussichtlich auf das untersuchte Produkt übertragen lassen. Ein ähnliches Vorgehen bietet sich auch für die Sammlung an. Hier wurde geprüft, inwieweit sich die Sammelsysteme von vergleichbaren Produkten für eine näherungsweise Grobabschätzung heranziehen lassen. Soweit sich Zielkonflikte bezüglich der Realisierung der optimierten Recyclingketten identifizieren lassen, wurden diese benannt. Die Materialverluste, die durch die skizzierten optimierten Recyclingketten vermieden werden können, stellen zunächst technische Recyclingpotenziale dar; zusätzlich werden in Kapitel 6.6 ökonomische und ökologische Grenzen bzw. Hemmnisse diskutiert, die schließlich bei der Ableitung der Handlungsempfehlungen (siehe Kapitel 7) berücksichtigt wurden.

Der gewählte Ansatz wird in Abbildung 57 beispielhaft an der Ist-Entsorgungskette von Konsumelektronikprodukten, in Abbildung 58 für Gold aus PC, jeweils mit Betrachtung der Rückgewinnungsraten an Stelle der Verlustraten, illustriert.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

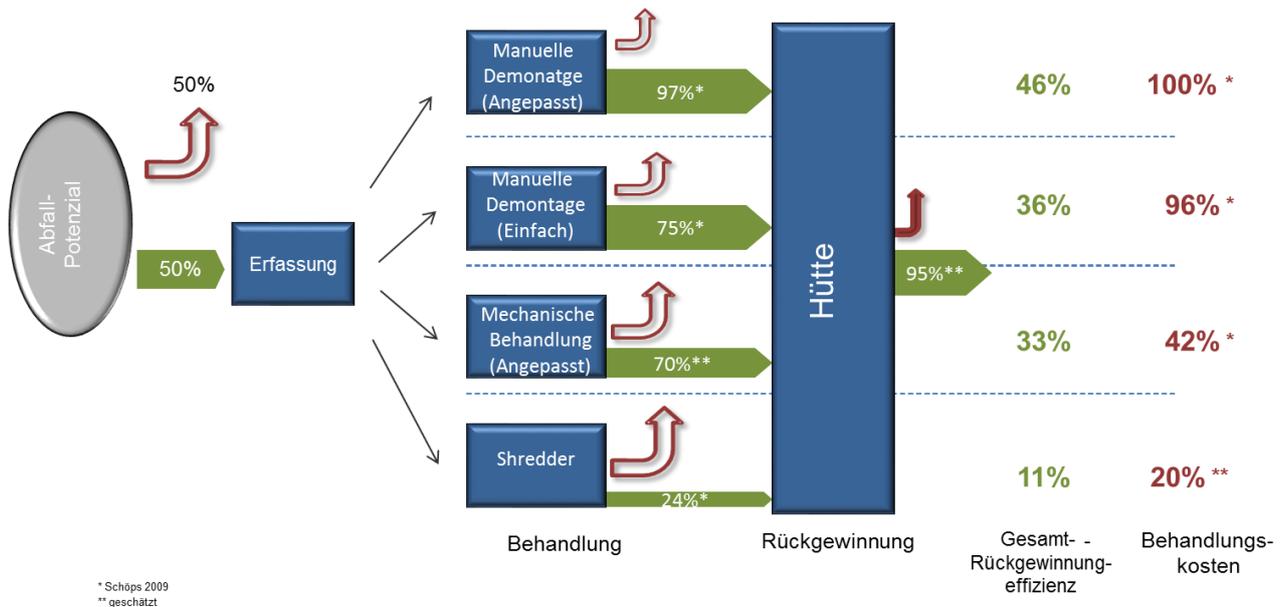
Abbildung 57: Beispielhafte Entsorgungskette



Metallausbeuten entlang der Kette beziehen sich auf ein bestimmtes Metall (bspw. Gold) in einem bestimmten Produkt (bspw. Elektronik)

Quelle: nach Hagelüken 2010b

Abbildung 58: Rückgewinnungsraten für Gold aus PC bei verschiedenen Behandlungsarten



Quelle: Sander 2012

Ergänzend zur Quantifizierung der relativen Materialverluste entlang der Ist-Entsorgungsketten⁵⁶ sowie der optimierten Entsorgungsketten erfolgt abschließend zu jeder Produktbetrachtung eine Verknüpfung mit den in 2020 in EoL-Produkten zu erwartenden Mengen strategischer Metalle. Durch den Bezug der in 2020 zu erwartenden Materialmengen auf die Ist-Entsorgungskette sowie die optimierte Entsorgungskette wird verdeutlicht, wie sich die Materialverluste in 2020 verhalten

⁵⁶ Bezugsgröße ist der Input der einzelnen Schritte der Entsorgungskette.

würden, wenn die heutigen Entsorgungsketten unverändert bestehen würden bzw. wie sich diese reduzieren ließen.

6.2.2 Grundsätzliche Anforderungen an Entsorgungsketten

Wie bereits in Abschnitt 6.2.1 beschrieben, ergeben sich die Verluste strategischer Metalle aus den Verlusten in den einzelnen Schritten der Entsorgungskette, in Sammlung, Sortierung, Aufbereitung und Rückgewinnung. Für eine erfolgreiche Rückgewinnung strategischer Metalle muss die Entsorgungskette so gestaltet sein, dass die strategischen Metalle schließlich in Prozesse gelangen, die deren Rückgewinnung und Kreislaufführung ermöglichen. Häufig sind Entsorgungsketten unter gegebenen gesetzlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen auf eine Rückgewinnung bestimmter Massenmetalle optimiert. Diese Massenmetalle dienen dabei oft als Trägermetalle auch für die Rückgewinnung von weniger häufigen Metallen, insbesondere solcher die in diesem Projekt im Mittelpunkt stehen. Bestehende Primärmetallrouten für diese Trägermetalle wurden über einen langen Zeitraum optimiert und der derzeit beste verfügbare Stand der jeweiligen Technologien wurde in Dokumenten zur Besten Verfügbaren Technologie (BVT, engl.: BAT) festgehalten (European Commission 2001)⁵⁷. Die metallurgischen Zusammenhänge in den pyrometallurgischen Hauptprozessrouten der Primärmetallerzeugung (BAT Routen in Abbildung 59) gelten prinzipiell auch für die Metallrückgewinnung und werden durch das Metallrad nach Reuter schematisch dargestellt (vgl. Abbildung 59, Reuter et al. 2005). Diese Zusammenhänge sind vor allem durch die thermodynamischen Einschränkungen der jeweiligen Metallurgie vorgegeben und diktiert damit auch ideale Zusammensetzungen für Sekundärmaterialien, bzw. die Anforderungen an die Entsorgungsketten, die im Idealfall die Metalle in solche Fraktionen separieren, bei denen eine maximale Rückgewinnung möglich ist. Im Zentrum des „Metallrades“ stehen die sogenannten Trägermetalle, bezüglich deren Rückgewinnung die Verwertungsrouten optimiert sind: Eisen, Aluminium, Titan, Magnesium, Lithium, Seltene Erden, Zinn, Kupfer, Nickel, Blei, Zink, Chrom und Mangan. In den Rückgewinnungsrouten dieser Trägermetalle können einige andere Metalle ebenfalls zurückgewonnen werden, andere hingegen gehen verloren. Die farblich gekennzeichneten Ringe (von innen nach außen: hellblau, weiß und grün) geben zudem Auskunft über das Zielmedium der neben dem Trägermetall enthaltenen Metalle. Der hellblaue Ring kennzeichnet Metalle, die sich im Trägermetall lösen, der weiße Ring kennzeichnet Metalle, die in Schlacke, Stäube oder Schlämme übergehen. Das Zielmedium alleine sagt noch nichts über die (technische) Rückgewinnbarkeit aus. Oftmals sind Fragen des ökonomischen und energetischen Aufwands ausschlaggebend für die Entscheidung der Rückgewinnung.

Metalle und Verbindungen, die in der jeweiligen Prozessroute rentabel zurückgewonnen werden können, sind im Metallrad grün dargestellt. So können beispielsweise Edelmetalle wie Gold, Platin, Palladium oder Silber in der Kupferroute zurückgewonnen werden. Dasselbe gilt für Gallium

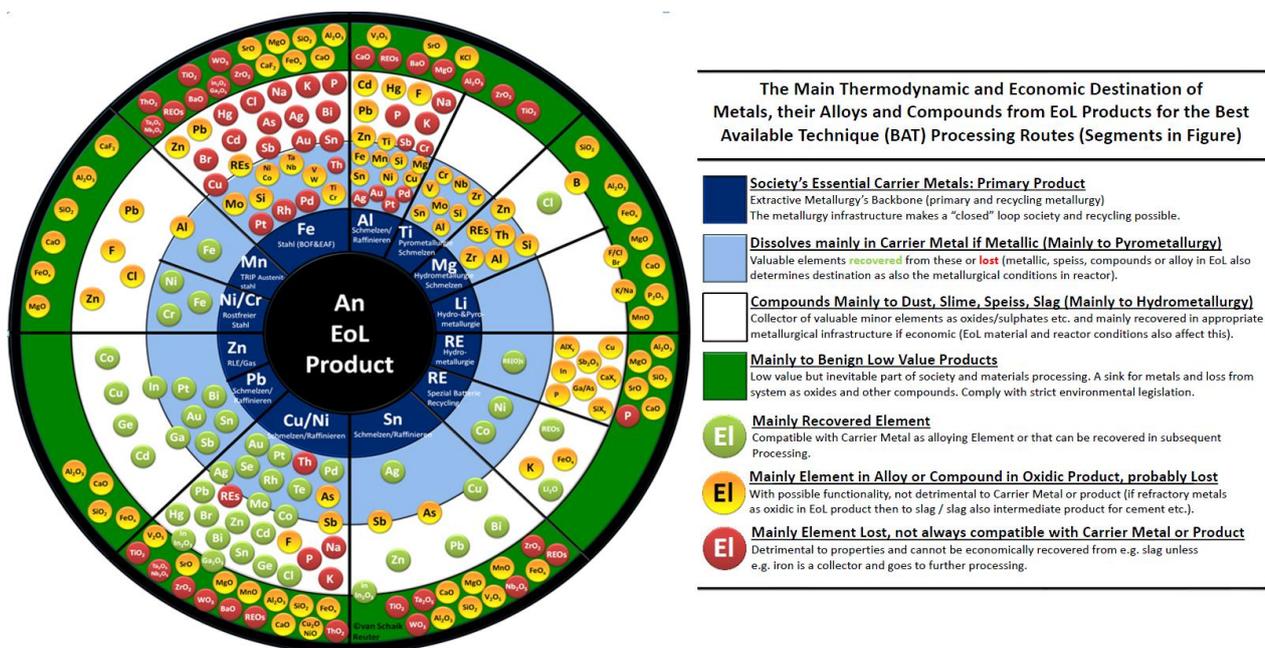
⁵⁷ Ein BVT-Dokument, das sich auf die Separation strategischer Rohstoffe und deren Rückgewinnung bezieht, besteht derzeit nicht. Auf der Ebene von Standards/Normen werden derzeit Behandlungsstandards im Bereich der Elektroaltgeräte und deren Komponenten bzw. NE-Metallfraktionen aus der Behandlung von post-consumer-Abfällen entwickelt (z. B. CENELEC, EERA-Standards).

oder Indium in der Blei- und Zinkroute, Indium in der Zinnroute. Seltene Erden können üblicherweise nur in speziell auf die SE Rückgewinnung ausgerichteten Prozessrouten zurückgewonnen werden.

Metalle, die in der jeweiligen Route üblicherweise nicht zurückgewonnen werden, sind gelb bzw. rot gekennzeichnet. Die rot gekennzeichneten Metalle haben zudem negative Auswirkungen auf die Eigenschaften des Trägermetalls und können nicht rentabel zurückgewonnen werden. So sind beispielsweise Seltene Erden in der Stahl-, Kupfer- und Nickelroute sowie in der Zinnroute nicht zurückzugewinnen. In der Stahlroute wird keins der betrachteten strategischen Metalle zurückgewonnen.

Um eine Rückgewinnung strategischer Metalle zu erreichen, muss entsprechend sichergestellt werden, dass diese Prozessrouten zugeführt werden, die deren Rückgewinnung erlauben. Dies erfordert eine darauf ausgerichtete Sammlung, Separierung und Aufbereitung der betroffenen Komponenten und schließlich Zuführung zu den geeigneten Verfahren. Für die einzelnen Schritte wiederum ergeben sich weitere Anforderungen. Zunächst müssen Verfahren, die eine Rückgewinnung der jeweiligen Metalle erlauben, verfügbar sein. Als nächstes muss die Rentabilität der Verfahren gewährleistet sein. Umgekehrt wird fehlende Wirtschaftlichkeit häufig als Grund für nicht-stattfindende Rückgewinnung verschiedener Metalle genannt (Hagelüken 2014a). Aus Umweltsicht muss die Rückgewinnung zudem ökologisch vorteilhaft gegenüber der Primärgewinnung sein. Für die ersten Schritte der idealtypischen Entsorgungskette, Sammlung und Sortierung, ist das Vorhandensein effektiver Sammelsysteme notwendig. Neben einer funktionierenden Infrastruktur spielt die Motivation der Konsumenten (einschließlich industrieller Verbraucher) eine Rolle. Gerade im Bereich der industriell genutzten Güter kann eine Vernetzung von Verbrauchern und Sammlern sowie Recyclern deutlich zum Erfolg der Entsorgungskette beitragen. Ferner ist die Zugänglichkeit der relevanten Komponenten maßgeblich für die Durchführung einer Entnahme bzw. deren Wirtschaftlichkeit (Hagelüken 2014a).

Abbildung 59: Metal Wheel



Bereitstellung durch M. Reuter; basierend auf van Schaik und Reuter (2013). „Best Available Technique“ (dt.: Beste Verfügbare Technologie) bezieht sich hier auf die etablierten Primärrouten zur Metallgewinnung.

6.2.3 Produktbetrachtungen

6.2.3.1 Industriekatalysatoren

Die Betrachtung von Industriekatalysatoren erfolgt separat für Platingruppenmetalle (PGM)-haltige Katalysatoren, FCC-Katalysatoren (SE-haltige Industriekatalysatoren für das Fluid Catalytic Cracking) und Polymerisationskatalysatoren (Ge-haltige Katalysatoren). Zum einen wird so analog zur Produktanalyse der Industriekatalysatoren (siehe Kapitel 5.3) vorgegangen, zum anderen stellt sich die Situation der Materialverluste entlang der Entsorgungskette grundlegend unterschiedlich für diese drei Katalysatorarten dar. So lässt sich zwar feststellen, dass sich Entsorgung und Recycling von edelmetallhaltigen Industriekatalysatoren auf einem vergleichsweise hohen Niveau bewegen. Dies bezieht sich aber fast ausschließlich auf die Rückgewinnung von Edelmetallen wie PGM (Hagelüken et al. 2005a), während eine Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Katalysatoren nahezu gar nicht stattfindet. Eine Rückgewinnung von Germanium aus Polymerisationskatalysatoren findet ebenfalls nicht statt, da das Germanium in der Nutzung komplett dissipiert und im Produkt verbleibt.

Erste Untersuchungen des Potenzials für Rohstoffeinsparungen durch eine Kreislaufführung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie wurden bereits 2001 in einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt (Hassan 2001). Es wurde festgestellt, dass edelmetallhaltige Katalysatoren regelmäßig zurückgewonnen und einer Verwertung zugeführt werden. Verluste von Edelmetallen werden hier auf unter 3 % beziffert (Hassan 2001). Sowohl für Edel- als auch Nichtedelmetallkatalysatoren wurde festgestellt, dass meistens ausgereifte Verfahren für die Wiederaufbereitung zur Verfügung stehen, zumeist hydrometallurgische Verfahren (Hassan 2001). 2003 wurde in einer erneuten Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes der Stand der Verwertung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie sowie von Einflussfaktoren zur Verbesserung der Kreislaufführung untersucht (Hassan 2003). Hierbei wurden die Verwertungs Kapazitäten für verbrauchte Katalysatoren in Deutschland und die zugehörigen logistischen Strukturen näher betrachtet. Es wurde festgestellt, dass Recyclingkapazitäten für Metallkatalysatoren in Deutschland bzw. im europäischen Ausland in ausreichendem Maße vorhanden sind (Hassan 2003). Das weitgehende Recycling von edelmetallhaltigen Katalysatoren insbesondere von PGM wird hier bestätigt. So wird festgestellt, dass „die Wiederaufbereitung von Katalysatoren [...] so alt [ist] wie ihr Einsatz in der chemischen Industrie“ (S. 82, Hassan 2001). Seltene Erden in Katalysatoren werden in den vorhandenen Studien jedoch nicht explizit erwähnt.

PGM-haltige Industriekatalysatoren

Wie eingangs bereits erwähnt werden PGM aus PGM-haltigen Industriekatalysatoren weitgehend zurückgewonnen (Hagelüken 2013; Zimmer 2012; Graedel et al. 2011b; Hagelüken et al. 2005a; Hassan 2001). Die hohe Recyclingrate ist - neben der Verfügbarkeit entsprechender Technologien und Prozesse - auf verschiedene Faktoren zurückzuführen. So decken PGM-haltige Industriekatalysatoren zwar eine große Bandbreite von Metallgehalten ab, von reinen Pt/Pd-Katalysatornetzen bei der Salpetersäureherstellung bis zu Recyclingmaterial mit weniger als 0,1 % PGM, bspw. aus der chemischen Industrie (Hagelüken et al. 2005a). Im Vergleich zum mittleren Gehalt in der Erdkruste bei PGM von zusammen 0,05 ppm ($5 \cdot 10^{-6}$ %) und einem Gehalt in den heute abgebauten Lagerstätten unterhalb von 10 g/t (0,001 %) (Hagelüken et al. 2005a) wird aber deutlich, dass auch die Industriekatalysatoren mit vergleichsweise geringem PGM-Gehalt gegenüber der Primärgewinnung äußerst attraktive Rohstoffquellen - insbesondere unter Berücksichtigung der hohen PGM-Preise - darstellen.

Diese Voraussetzungen gehen zudem einher mit einem gut organisierten Sammlungs- und Verwertungssystem, welches ebenfalls seinen Beitrag zur hohen Recyclingrate leistet, allerdings auch eine Folge der zuvor skizzierten Gegebenheiten darstellt. Es sind direkte und vertraglich geregelte Akteurskooperationen zwischen Herstellern der Katalysatoren, Nutzern und den Entsorgern vorhanden, die Verwertungswege sind über viele Jahre eingespielt, bei gleichzeitig transparentem Ablauf (Hagelüken et al. 2005a). Die Be- und Entladung des Katalysators, Transport und Regenerierung sowie Edelmetallabscheidung werden i.d.R. von erfahrenen und professionell arbeitenden Firmen ausgeführt (Hagelüken et al. 2005a).

Eine detaillierte Untersuchung der Stoffströme von PGM in Industriekatalysatoren und anderen Anwendungen wurde von Hagelüken und Kollegen vorgenommen (Hagelüken et al. 2005a). In der Studie finden sich Quantifizierungen der Materialverluste für die verschiedenen Katalysatortypen in der Nutzung, der Sammlung sowie im Recycling, wobei Sortierung und Aufbereitung hier unter dem Punkt Recycling zusammengefasst sind. Bis auf eine Ausnahme (Umweltkatalysatoren), wo weitergehende Verluste auftreten, und palladiumhaltige Katalysatoren der homogenen Katalyse, wo die Verluste in der Sammlung etwa 50 % betragen, funktioniert die Sammlung entsprechend der oben geschilderten Gegebenheiten nahezu reibungslos und ohne nennenswerte Materialverluste. Für Raffineriekatalysatoren werden die PGM-Verluste über den gesamten Lebenszyklus auf rund 3 % beziffert, wobei 1,5 % dabei in die Nutzungsphase fallen. Aufgrund der hohen Katalysatormengen funktioniert die Kreislaufführung dieser Katalysatoren besonders gut (Hagelüken et al. 2005a). Bei Katalysatoren der Salpetersäureproduktion werden neben den Katalysatoren selbst die sogenannten Getternetze, welche der Rückgewinnung von Metallverschleppungen dienen, sowie der sogenannte Getterschlamm dem Recycling zugeführt (Hagelüken et al. 2005a). Aufgrund des hohen PGM-Gehalts gestaltet sich die Rückgewinnung von Platin, Palladium und Rhodium hierbei besonders effektiv. Als Recyclingquote werden 94 % für Platin, 70 % für Palladium und 75 % für Rhodium genannt (Hagelüken et al. 2005a). Die Differenz ist hierbei jedoch nicht auf die Recyclingprozesse, sondern auf Verluste bzw. Verschleppungen in der Nutzungsphase zurückzuführen, die bei Palladium rund 30 % und bei Platin rund 6 % ausmachen. Entsprechend bewegen sich die Verluste in der Entsorgung im sehr geringen Prozentbereich. Ähnlich stellt sich die Situation für Platin und Rhodium aus Katalysatoren der Blausäureproduktion dar. Hier liegt die angegebene Recyclingquote bei ca. 90 %, wobei 10 % Verluste der Nutzungsphase zugeschrieben werden (Hagelüken et al. 2005a).

Bei Pulverkatalysatoren wird der Materialverlust in Aufbereitung (Veraschung) und Recycling auf rund 2 % beziffert. In Verbindung mit den Verlusten in der Nutzungsphase von 2 - 3 % folgt hieraus eine Recyclingquote von insgesamt 95 %. Für Fest- und Wirbelbettkatalysatoren werden rund 4,5 % Materialverlust für Ein- und Ausbau, Betrieb und Refining angegeben. Bezogen auf die Entsorgung liegen die Verluste also in jedem Fall unterhalb von 4,5 %. Weitere Optimierungsmöglichkeiten in der Entsorgung, insbesondere der Aufbereitungsprozesse, werden nicht gesehen (Hagelüken et al. 2005a).

Bei Katalysatoren zur homogenen Katalyse sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen PGM Platin, Palladium und Rhodium festzustellen. Für Platin beträgt die Recyclingquote (bezogen auf den Produktlebenszyklus) lediglich 20 %, wobei dies fast ausschließlich auf die Verluste in der Nutzung zurückzuführen ist. Das Platin dissoziiert hierbei zu einem großen Teil ins Produkt, in dem es dann in sehr geringen Konzentrationen vorliegt, wodurch eine Rückgewinnung unmöglich wird. Verluste entlang der Entsorgungskette sind nur in geringem Umfang (3,3 %) festzustellen. Für Palladium zeigt sich eine deutlich unvollständige Erfassung, da es sich hier häufig um Prozesse mit geringer Einsatzmenge von Katalysatoren handelt und die Katalysatoren nicht im-

mer dem Rücklauf zugeführt werden (Erren und Wittmer 2011; Hagelüken et al. 2005a). Die Verluste in Aufbereitung und Recycling lassen sich auf 3,8 % beziffern. Für Rhodium scheinen Verluste in der Sammlung ebenfalls vernachlässigbar, in Aufbereitung und Recycling lassen sie sich auf 4,4 % beziffern (Hagelüken et al. 2005a).

Bei Umweltkatalysatoren sind in der Entsorgung die größten Defizite festzustellen. Über den Lebenszyklus wird ein Materialverlust von rund 90 % bezogen auf die eingesetzten PGM-Mengen angegeben (Hagelüken et al. 2005a). Diese hohen Verluste sind im Wesentlichen der nicht funktionierenden Sammlung zuzuschreiben. Im Gegensatz zu den sonstigen Anwendungsgebieten von Industriekatalysatoren besteht bei den hier relevanten Akteuren, die entsprechende Anlagen wie BHKW und Anlagen mit katalytischer Nachverbrennung betreiben, noch vielfach Unwissenheit über den Wert der enthaltenen Metalle und über Entsorgungsmöglichkeiten. Daher wird der größte Teil der Umweltkatalysatoren entweder dem Stahlschrott (im Falle von Metallkatalysatoren) oder dem Restmüll (im Falle von Keramik-katalysatoren) zugeführt (Heuwieser 2016). Dies wird zudem befördert durch meist kleine Einsatzmengen (kleine Anlagen) und lange Nutzungszeiten (durchschnittlich sechs Jahre) (Hagelüken et al. 2005a). Die auf diese Weise verlorenen Materialmengen landen im Stahlschrottreycling und dissipieren entsprechend weiter. Grundsätzlich bestehen für die Materialrückgewinnung (Aufbereitung und Recycling) keine Hemmnisse, so dass eine Rückgewinnungsquote von mindestens 90 % erreichbar wäre (Hagelüken et al. 2005a).

Diese Angaben von Hagelüken et al. (2005a) decken sich mit anderen Expertenangaben. Demnach wird die Rückgewinnung von bis zu 99,5 % der in den Katalysatoren enthaltenen Platingruppenmetalle ohne Unterscheidung der verschiedenen Katalysatorarten als realistisch eingeschätzt (Zimmer 2012).

Die Verluste in der Entsorgungskette sind in der Übersicht in Tabelle 198 dargestellt. Bezüglich der Aktualität der verwendeten Angaben ist anzumerken, dass diese zwar im Wesentlichen aus den Jahren 2002 und 2003 (Hagelüken et al. 2005a) stammen. Es ist aber dennoch davon auszugehen, dass die wesentlichen Treiber (insbesondere ökonomischer Wert der PGM), die für die hohen Recyclingraten verantwortlich sind, weiterhin bestehen und von keiner Zunahme der Materialverluste auszugehen ist. Diese Einschätzung wurde auch vom Autor der Studie bestätigt (Hagelüken 2013a). Die nahezu verlustfreie Materialrückgewinnung wurde zudem durch eine Auskunft der Zimmer-Katalysatorenrecycling GmbH (Zimmer 2012) bestätigt. Ergänzend findet sich in der Tabelle die Verknüpfung mit den in Kapitel 5.3 für die verschiedenen Katalysatorarten bestimmten Mengen strategischer Metalle, die in 2020 aus EoL Produkten zu erwarten sind.

Für die meisten PGM-haltigen Industriekatalysatoren kann die Entsorgungskette entsprechend bereits als weitgehend optimiert angesehen werden. Mit Ausnahme der Umweltkatalysatoren und Palladium in Katalysatoren der homogenen Katalyse zeigen sich für alle PGM in Industriekatalysatoren Verluste von weniger als 5 %.

Für Palladium aus Katalysatoren der homogenen Katalyse muss eine Optimierung bei den Verlusten in der Sammlung ansetzen. Prinzipiell ist bei den Firmen, die Homogenkatalysatoren einsetzen, aufgrund des Materialwertes ein hohes Interesse an der Rückgewinnung festzustellen (Marx 2014). Jedoch liegen hier häufig Prozesse vor, bei denen die Metallkonzentration in den betroffenen Materialströmen so gering ist, dass es bisher ökonomisch nicht sinnvoll ist, das verbleibende Palladium zurückzugewinnen (Marx 2014, Hagelüken et al. 2005a). Folglich sind für eine Optimierung der Entsorgungskette Prozesse notwendig, die kosteneffizient niedrigkonzentriertes Palladium aus den Abfallströmen zurückgewinnen können. Technisch wird eine Recyclingquote von 95 % für Palladium in Homogenkatalysatoren als realisierbar beschrieben (Erren und Wittmer

2011). Unter Annahme entsprechender Gesamtverluste von 5 % für die optimierte Entsorgungskette und geringfügig geringeren Verlusten für die Schritte Aufbereitung und Rückgewinnung von 3 % ergeben sich Verluste in der Sammlung von 2 %.

Tabelle 198: Verluste entlang der Entsorgungskette von PGM-haltigen Industriekatalysatoren

Variante	Katalysatorart	Verluste Sammlung und Sortierung	Verluste Aufbereitung und Rückgewinnung ⁵⁸	Verluste Entsorgungskette gesamt	Absolute Verluste in 2020
Ist Situation	Raffineriekat.	vernachlässigbar	1,5% (Pt und Pd)	1,5%	12 kg Pt 1,3 kg Pd
	Salpetersäureproduktion	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
	Blausäureproduktion	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
	Pulverkat.	vernachlässigbar	2%	2%	15-17 kg Pt 132-149 kg Pd
	Fest- und Wirbelbett-kats	vernachlässigbar	vernachlässigbar	< 4,5%	<3,6 kg Pt, <32,4 kg Pd
	Homogene Katalyse	vernachlässigbar für Pt, Rh 48% Pd	3,3% Pt; 3,8% Pd ; 4,4% Rh	3,3% Pt; 50% Pd; 4,4% Rh	23-25 kg Pt 82-90 kg Pd 34-38 kg Rh
	Umwelkat.	80 – 90%	<10%	82-91%	21-23 kg Pt
Optimierte Entsorgungs-	Homogene Katalyse	2% Pd	3% Pd	5% Pd	8,2-9 kg Pd (23-25 kg Pt, 34-38 kg Rh)
	Umwelkat.	10%	<10%	19% Pt	4,8 kg Pt

Quelle: Hagelüken et al. (2005a), Zimmer (2012), Erren und Wittmer (2011) und eigene Berechnungen. Für Raffineriekatalysatoren, Katalysatoren der Salpetersäure- und Blausäureproduktion, Pulverkatalysatoren, Fest- und Wirbelbettkatalysatoren sowie Platin und Rhodium in Katalysatoren der homogenen Katalyse kann die Entsorgungskette bereits als weitgehend optimiert angesehen werden.

FCC-Kats

In Katalysatoren zum Fluid-Catalytic-Cracking (FCC) kommen die Seltenen Erden Lanthan, Cer sowie in geringem Umfang Neodym und Praseodym zum Einsatz (vgl. u. a. Goonan 2011). Wie bei Seltenen Erden insgesamt (vgl. Graedel et al. 2011a/b) findet bisher keine Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden aus FCC-Katalysatoren statt (Goonan 2011).

Die FCC-Katalysatoren bestehen aus Zeolith (kristallines Alumosilikat) mit vergleichsweise geringem SE-Anteil von 1,5 bis 5 Gewichtsprozent. Neben dem geringen Metallgehalt lassen sich weitere Faktoren für die nicht vorhandene Rückgewinnung von Cer und Lanthan aus FCC-Katalysatoren identifizieren. Hier sind der Metallpreis, der für Lanthan historisch stets vergleichsweise

⁵⁸ Angaben bezogen auf 100% Inputstrom in die Entsorgung (im Gegensatz zu Hagelüken et al. 2005, wo die Angaben auf 100% Inputstrom in die Herstellung bzw. teilweise in die Nutzung bezogen werden).

niedrig war und erst ab 2009 einen deutlichen Anstieg erfahren hat (Oakdene Hollins 2011), die Homogenität des Katalysators, die Eigenschaften des Metalls und die Menge des anfallenden Katalysators (Hassan 2001) zu nennen.

Die Katalysatoren werden bisher häufig durch Deponierung entsorgt, teilweise werden sie auch aufgrund der Eignung des Trägermaterials als Zusatzstoff in Straßen- und Dammbau verwendet oder in der Zementherstellung verwertet (Hassan 2001; Goonan 2011; Oakdene Hollins 2011). Letztere Verwertungsmöglichkeit wird in Deutschland überwiegend für Katalysatoren mit Zeolith als Trägermaterial gewählt. Bei der Bestimmung der Entsorgungsart (Verwertung als Zusatzstoff in Bauvorhaben, Deponierung in Übertage- oder Untertage-Deponien, Verwertung in Zementherstellung etc.) spielen u. a. eventuelle Verunreinigungen mit Schwermetallen eine Rolle (Hassan 2001).

Vor diesem Hintergrund kann in der Ist-Situation von einem vollständigen Materialverlust von Seltenen Erden entlang der Entsorgungskette von FCC-Katalysatoren ausgegangen werden. Die genauen Verluste in den ersten Schritten der Entsorgungskette lassen sich nur schwer beziffern, liegen vermutlich aber im niedrigen Prozentbereich. Aufgrund des geringeren ökonomischen Werts im Vergleich bspw. zu PGM-haltigen Katalysatoren lässt sich ein weniger sorgfältiger Umgang vermuten, weshalb etwas höhere Verluste als bei PGM-haltigen Industriekatalysatoren anzunehmen sind. In den folgenden Schritten der Entsorgungskette, Aufbereitung und Recycling, ist schließlich von einem vollständigen Verlust auszugehen. Die relativen geschätzten Verluste sowie ihre Verknüpfung mit den Materialmengen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Eine Optimierung der Recyclingkette muss an der fehlenden Aufbereitung und Rückgewinnung ansetzen. Bisher ist kein Verfahren verfügbar, welches eine wirtschaftliche Rückgewinnung der enthaltenen strategischen Metalle Cer und Lanthan ermöglicht. Es sind jedoch diverse hydrometallurgische Verfahren in der Entwicklung (Binnemans et al. 2013a). Diese erreichen teilweise Rückgewinnungsraten von über 98 % (Innocenzi et al. 2014), jedoch fehlen nähere Informationen bezüglich ihres Reifegrads, Rentabilität und wann sie in größerem Maßstab einsatzbereit sein könnten. Für die Skizzierung der optimierten Entsorgungskette wird von einem Einsatz dieser Verfahren ausgegangen. Dabei werden im Vergleich zum PGM-Recycling etwas größere Verluste in den Schritten der Aufbereitung und Rückgewinnung von 5 % angenommen. Entlang der optimierten Entsorgungskette ergeben sich aus dieser Abschätzung entsprechend Gesamtverluste von 14,5 %.

Tabelle 199: Verluste entlang der Entsorgungskette von FCC-Katalysatoren

Variante	Verluste Sammlung und Sortierung	Verluste Aufbereitung und Rückgewinnung	Verluste Entsorgungskette gesamt	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	vermutlich <10%	100% (SE)	100% (SE)	189-331 t SE
Optimierte Entsorgungskette	<10%	5% (SE)	14,5% (SE)	27,2-47,6 t SE

Polymerisationskatalysatoren

Wie in der Produktanalyse dargestellt, dissipiert das Germanium aus Polymerisationskatalysatoren in der Nutzung vollständig ins Produkt. Für eine Kreislaufführung müsste also entsprechend auf das Endprodukt (PET-Flaschen) abgezielt werden.

Die Ist-Situation stellt sich derzeit so dar, dass das Germanium im Rahmen des stofflichen Flaschenrecyclings ggf. weiter dissipiert und schließlich in geringer Konzentration in den Anwendungen des recycelten Materials (bspw. Fleece-Pullover) landet.

Eine Rückgewinnung von Germanium oder anderen Katalysatormaterialien aus PET ist bisher technisch nicht möglich bzw. ökonomisch und ökologisch sinnvoll (Zimmermann und Gößling-Reisemann 2014; Roewer 2014; Oakdene Hollins 2011). Tatsächlich würde eine Rückgewinnung des Katalysatormaterials die Polymere zerstören und so dem PET-Recycling im Wege stehen. Weitere Probleme sind die geringe Konzentration des Katalysatormaterials im PET und die Unklarheit bezüglich der im jeweils zur Entsorgung vorliegenden PET-Abfall enthaltenen Katalysatormaterialien. Weder ökologisch noch ökonomisch ergibt sich entsprechend ein Anreiz zur Rückgewinnung.

Die folgende Tabelle 200 fasst die Materialverluste zusammen.

Tabelle 200: Verluste entlang der Entsorgungskette von Polymerisationskatalysatoren

Variante	Verluste Sammlung und Sortierung	Verluste Aufbereitung und Rückgewinnung	Verluste Entsorgungskette gesamt	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	nicht relevant	100%	100% Ge	837 -1.835 kg Ge

6.2.3.2 Automobilkomponenten

In Automobilen finden sich neben den leicht entfernbaren Katalysatoren, die Platingruppenmetalle sowie Cer und Lanthan enthalten, strategische Metalle wie in der Produktanalyse dargestellt in verschiedenen Komponenten wie der Elektronik, Zündkerzen, Glas usw. Von den strategischen Metallen in den sonstigen Automobilkomponenten wurden stellvertretend Dysprosium, Gadolinium und Terbium in der Produktanalyse betrachtet.

Während für die Katalysatoren ein vergleichsweise gut funktionierendes Recyclingsystem existiert, werden die anderen angesprochenen Komponenten i.d.R. nicht gesondert entfernt. Aufgrund der bestehenden Unterschiede erfolgt die Betrachtung von Autokatalysatoren und den sonstigen relevanten Komponenten aus Automobilen im Folgenden getrennt.

Autokatalysatoren

Rahmen zur Erfassung von Altprodukten

Gemäß § 3 AltfahrzeugV sind Hersteller verpflichtet, Altfahrzeuge⁵⁹ ihrer Marke vom Letzthalter unentgeltlich zurückzunehmen, sobald sie folgenden Stellen übergeben worden sind:

- anerkannte Annahme- bzw. Rücknahmestelle oder
- anerkannter Demontagebetrieb (vom Hersteller zur Rücknahme bestimmt).

Die Rückgabemöglichkeiten müssen flächendeckend, d. h. für jeden Fahrzeughalter erreichbar sein. Die Flächendeckung ist dann ausreichend, wenn die Entfernung zwischen Wohnsitz des Letzthalters und Rücknahmestelle oder von einem Hersteller hierzu bestimmten anerkannten Demontagebetrieb nicht mehr als 50 km beträgt (§ 3 Abs. 3 AltfahrzeugV). Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Anforderung durch das Netz der Fahrzeughändler erfüllt wird.

Endnutzer von Fahrzeugen haben dieses gemäß § 4 Abs. 1 AltfahrzeugV nur einer anerkannten Annahmestelle, einer anerkannten Rücknahmestelle oder einem anerkannten Demontagebetrieb zu überlassen. Entsprechendes gilt für illegal entsorgte Altfahrzeuge, die durch öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger den vorgenannten Stellen übergeben werden.

Während für Annahme- und Rücknahmestellen keine Registrierungspflicht besteht und deren Zahl somit nicht genau bekannt ist, waren im November 2011 1.337 anerkannte Demontagebetriebe bei der Gemeinsamen Stelle Altfahrzeuge registriert. Rücknahmestellen, die im Auftrag bestimmter Fahrzeughersteller Altfahrzeuge zurücknehmen, können über die Internetauftritte der Fahrzeughersteller recherchiert werden. Auskunft zu Annahmestellen können die Landesverbände des Kfz-Gewerbes geben.

Gemäß Art. 53 Einführungsgesetz zum Handelsgesetzbuch (EGHGB) besteht für Hersteller und Importeure von unter die Regelungen der AltfahrzeugV fallenden Fahrzeugen seit Inkrafttreten der AltfahrzeugV die Verpflichtung, Rückstellungen zur Absicherung der Rücknahme und Verwertung dieser Fahrzeuge zu bilden und bilanziell auszuweisen. Damit soll die Erfüllung der Rücknahmeverpflichtung auch im Insolvenzfall abgesichert werden.

Die Hersteller und Vertreiber von Fahrzeugbauteilen (also auch Fahrzeugkatalysatoren) sind gemäß § 3 (6) AltfahrzeugV zur Rücknahme verpflichtet. Sie haben bei Reparaturen anfallende Altteile von Kfz-Werkstätten und ähnlichen gewerblichen Anfallstellen zurückzunehmen, ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten oder gemeinwohlverträglich zu beseitigen.

⁵⁹ Geregelt sind Fahrzeuge der Klasse M1 (Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit höchstens acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz) und N1 (Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einem Höchstgewicht bis zu 3,5 Tonnen) gemäß Anhang II Abschnitt A der Richtlinie 70/156/EWG des Rates vom 6. Februar 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger (ABl. EG Nr. L 42 S. 1, Nr. L 225 S. 34) sowie dreirädrige Kraftfahrzeuge gemäß der Richtlinie 92/61/EWG (ABl. EG Nr. L 225 S. 72), jedoch unter Ausschluss von dreirädrigen Krafträdern. Andere Fahrzeuge sind nach den allgemeinen Regelungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zu entsorgen.

Dienstleistungsunternehmen zur Entsorgung von Katalysatoren sind üblicherweise von den Werkstätten und Altfahrzeug-Demontagebetrieben frei wählbar. Für die in den Vertragswerkstätten anfallenden Katalysatoren haben die meisten Automobilfirmen inzwischen Rücknahmesysteme eingerichtet. In vielen Fällen werden Altkatalysatoren aus den Vertragswerkstätten über die bestehende interne Logistik für Austauschteile an die Zentrallager zurückgesendet und von dort aus einer Weiterverarbeitung zugeführt. Um sicherzustellen, dass die Vertragswerkstätten den Recyclingkatalysator auch tatsächlich zurückliefern und nicht an Dritte verkaufen, wird der Austausch-katalysator häufig mit einem Pfand belegt, das bei Rückgabe eines Altkatalysators der Werkstatt erstattet wird.

Entsorgungskette

Die typische Entsorgung von Autokatalysatoren ist in Abbildung 60 dargestellt. Zunächst erfolgt beim Autoverwerter der Ausbau des Katalysators, bevor die Altkatalysatoren über Einsammler und Entmantler schließlich zum Refiner kommen, bei dem die eigentliche Rückgewinnung der Metalle stattfindet. Keramische Autoabgaskatalysatoren werden hier pyrometallurgisch verarbeitet. Das keramische Trägermaterial wird dabei verschlackt, die Edelmetalle werden je nach Verfahren in Kupfer, Eisen oder Nickel aufkonzentriert und anschließend weiteren vorwiegend nass-chemischen Verfahren unterzogen (Hagelüken et al. 2005a).

Abbildung 60: Verwertungs- und Akteurskette für Altkatalysatoren



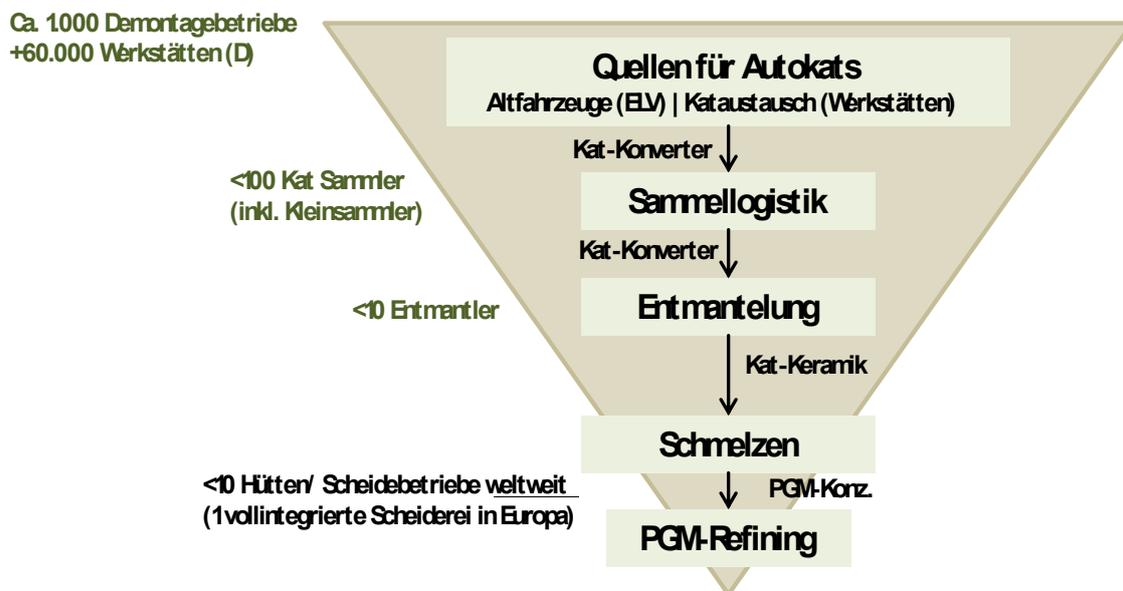
Quelle: in Anlehnung an Hagelüken et al. (2005a)

Die Ist-Entsorgungskette von Autokatalysatoren zielt auf die Rückgewinnung von PGM ab, die Rückgewinnung eingesetzter Seltener Erden (Cer, Lanthan) spielt nahezu keine Rolle. Diese enden in der Regel in der Schlacke (siehe bspw. Goonan 2011; Oakdene Hollins 2011) und dissipieren weiter bspw. auf Deponien oder Füllmaterial im Straßenbau. Im Folgenden wird daher die Situation bzgl. der Entsorgung und Rückgewinnung von PGM dargestellt, die Verluste an Seltene Erden werden in der Zusammenfassung am Ende des Abschnitts wieder aufgegriffen.

Grundsätzlich kann man unterscheiden zwischen Altkatalysatoren aus der Verwertung von Altkaros und Austausch-katalysatoren von noch in Gebrauch befindlichen Fahrzeugen, die aufgrund mangelnder Funktionstüchtigkeit ausgetauscht werden (Hagelüken et al. 2005a, Hagelüken 2007). Die Zahl der aktiven Akteure nimmt entlang der Entsorgungskette deutlich ab. Als anerkannte Demontagebetriebe zur Behandlung von Altfahrzeugen existieren in Deutschland ca. 1.300 Betriebe, von denen ca. 1.100 aktiv sind (Stand 2014) (GESA 2015, DESTATIS 2014). Das

Heraustrennen des Monolithen aus dem Katalysatorgehäuse und Gewinnung der Keramik (Sortierung und Aufbereitung) erfolgt bei rund 10 Akteuren (Hagelüken et al. 2005a, Hagelüken 2007). Für die PGM-Scheidung aus Autokatalysatoren (Recycling) gibt es schließlich weniger als zehn Refiner und nur eine vollintegrierte Scheiderei in Europa (Hagelüken 2007). Abbildung 61 stellt diese Akteurskette schematisch dar.

Abbildung 61: Akteure entlang der Entsorgungskette des Autokatrecycling



Quelle: nach Hagelüken 2007

Die dargestellte Akteurskette ermöglicht prinzipiell eine Entsorgung mit überschaubaren Materialverlusten in Bezug auf die eingesetzten PGM.

Wie jedoch in der Produktanalyse der Automobile und Autokatalysatoren dargelegt (siehe Kapitel 5.3), ergeben sich in dieser Produktgruppe besondere Herausforderungen in der Analyse durch den hohen Anteil an Gebrauchtfahrzeugen, die nach ihrer Außerbetriebsetzung in Deutschland im inner- und außereuropäischen Ausland eine zweite Nutzungsphase erfahren. Für die Analyse der Materialverluste sind entsprechend der Methodik der vorliegenden Untersuchung nur die Verluste von Relevanz, die tatsächlich entlang der Entsorgungskette, also am Produktlebensende auftreten. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, wird jedoch seit einer Änderung der Fahrzeugzulassungsverordnung (FZV) bei der Außerbetriebsetzung von Fahrzeugen nicht mehr danach differenziert, ob diese anschließend verwertet, nach einer vorübergehenden Stilllegung wieder angemeldet oder ins Ausland verbracht werden. Hierdurch ergab sich ein Abgrenzungsproblem zwischen dem Parameter der „Exporte aus der Nutzungsphase“ in der Methodik zur Quantifizierung der Metallverluste in 2020 (siehe Kapitel 5.1) und den Verlusten in der Sammlung in der Quantifizierung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette. Zur Gewährleistung der Konsistenz wurden entsprechend die hier relevanten in Kapitel 5.1 getroffenen Annahmen für die Bestimmung der Materialverluste übernommen. So wurden die legalen Intra- und Extra-EU Exporte als Verluste in der Nutzungsphase und nicht als Verlust in der Entsorgungskette berücksichtigt. Diese belaufen sich auf 48 % bei PKW (40 % Intra-EU, 8 % Extra-EU) sowie bei Nutzfahrzeugen auf 46 %

(19 % Intra-EU, 27 % Extra-EU). Weiterhin wurde für die statistisch ungeklärten Fälle angenommen, dass diese (früher oder später) in Deutschland als Abfall anfallen und nicht als Verlust zu berücksichtigen sind.⁶⁰

Es sei hier nochmals explizit darauf hingewiesen, dass wie in der Methodikbeschreibung und zu Beginn des Kapitels dargelegt, der Begriff der „Verluste“ sich hierbei auf Materialflüsse bezieht, die die Systemgrenzen verlassen und nichts darüber aussagt, inwieweit außerhalb der Systemgrenzen eine Materialrückgewinnung stattfindet. Da keine Erkenntnisse zu den genauen Entsorgungssystemen der Zielländer vorliegen, kann hierzu keine Aussage getroffen werden. Prinzipiell kann jedoch gesagt werden, dass für Exporte ins EU-Ausland eine mit Deutschland vergleichbare Rückgewinnung angenommen werden kann, während bei Exporten in Nicht-EU-Länder höhere Verluste anzunehmen sind.

Neben den Exporten, durch die die Katalysatoren der Entsorgung innerhalb der Systemgrenzen entzogen werden, lassen sich weitere (potenzielle) Defizite entlang der Entsorgungskette nennen (vgl. Hagelüken et al. 2005a):

- Kaum von Bedeutung (und im Widerspruch zur Altautoverordnung stehend) ist der fehlende Ausbau der Katalysatoren aus dem Fahrzeug.
- Falsche Sortierung (bspw. Einstufung als Metallschrott) kann zu Verlusten in der Verwertung führen, wobei aufgrund des Materialwertes von einem geringen Umfang ausgegangen werden kann.
- Relevante Materialverluste (Größenordnung bis zu 5 %) können bei beschädigten Katalysatoren (bspw. Herausfallen von Keramikstücken oder Staub) bei Transport und Umgang auftreten. Die Erfassung/Sammlung von Autokatalysatoren bzw. der Transport von der Anfallstelle zum Behandler erfolgt üblicherweise in Gitterboxen. Beschädigte Katalysatoren müssen zur Verhinderung von Materialverlusten in geschlossenen Behältern transportiert werden. Kürzere Behandlungsketten sind potenziell verlustärmer.
- Weitere Verluste in der Größenordnung von bis zu 5 % können beim Öffnen des Altkatalysators durch mechanische Verfahren auftreten. In einigen Betrieben werden diese Verluste durch entsprechende Absauganlagen reduziert.
- Im Refining hängt die Materialausbeute schließlich von der eingesetzten Prozesstechnologie und der Qualität der Katalysatorkeramik ab. In modernen Betrieben werden ca. 98 % bei Platin und 85 % bei Rhodium erreicht.

⁶⁰ Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes wurden in einem Projekt des UBA die Verbleibswegen von in Deutschland außer Betrieb gesetzten Fahrzeugen recherchiert (Sander, K. et.al.: Entwicklung von Lösungsvorschlägen, einschließlich rechtlicher Instrumente, zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen Kurztitel: Verbleib von Altfahrzeugen, UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3714 33 315 0). Beim Abschluss des vorliegenden Berichtes waren die Ergebnisse des Projektes noch nicht für eine Veröffentlichung verfügbar.

Das dargelegte Problem der Verluste in der Sammlung (bzw. Verluste durch Materialströme über die Systemgrenzen hinaus) besteht nicht für Austauschkatalysatoren aus in Gebrauch befindlichen Fahrzeugen. Diese werden i.d.R. vollständig der oben dargestellten Entsorgungskette zugeführt. Die weiteren Verluste entlang der Entsorgungskette sind als analog zu Altkatalysatoren zu betrachten.

Entsprechend der obigen Ausführungen stellen sich die Materialverluste entlang der Entsorgungskette für Autokatalysatoren unter Berücksichtigung der verschiedenen beschriebenen Szenarien in der Ist-Situation wie in Tabelle 201 dargestellt dar. In Bezug auf das Untersuchungsjahr 2020 kann von einer weiteren Steigung des Anteils nicht in Deutschland entsorgter Fahrzeuge ausgegangen werden.

Für die Skizzierung der optimierten Entsorgungskette werden die Annahmen des Referenzszenarios zugrunde gelegt. Das heißt, Fahrzeuge, die dem System durch den Export von Gebrauchtwagen entzogen werden, werden nicht mitbetrachtet. Die Sammlung kann entsprechend als bereits optimiert angesehen werden. Für eine Optimierung der folgenden Schritte, Sortierung und Aufbereitung, lassen sich eine Reihe von Maßnahmen identifizieren (Hagelücken et al. 2005a; Hagelücken 2014a/b);

- Optimierung des Handlings der Katalysatoren: Reduzieren von Materialverlusten durch sorgfältigeren Umgang; selteneres Umladen; Auslegen von Gitterboxen mit Plastikfolie; Stäube und Katalysator-Partikel dem Refining zuführen,
- Durchführung von Transport, Entmanteln und Refining ausschließlich durch zertifizierte Firmen mit hohen Qualitätsstandards,
- Ausschließlicher Einsatz von Anlagen, die dem Stand der Technik entsprechen (d. h. unter anderem über eine effektive Staubabsaugung verfügen), beim Entmanteln: Vollständig geschlossene, automatisierte, und flexible, d. h. für verschiedene Katalysatorbauformen geeignete Anlagen sind am besten geeignet,
- Ausbau von Akteurskooperationen aus Verwertern, Logistikpartnern, Entmantlern und Refinern.

Je nach Umsetzung der aufgeführten Maßnahmen lassen sich entsprechende Verringerungen der Verluste in Sortierung und Aufbereitung erreichen. Für die optimierte Entsorgungskette in Tabelle 201 wurde eine Halbierung der Verluste in beiden Schritten bei gleichbleibenden Verlusten in der Rückgewinnung angenommen. Hierdurch verringern sich die Verluste entlang der gesamten Entsorgungskette auf 13 % bei Platin und 24,5 % bei Rhodium.

Die enthaltenden Seltenen Erden, Cer und Lanthan, profitieren ebenso von den Verbesserungen in den Schritten der Sortierung und Aufbereitung. Im letzten Schritt, in der Rückgewinnung, kommt es jedoch zu einem vollständigen Verlust der Seltenen Erden, die in der Schlacke landen. Eine Rückgewinnung müsste entsprechend auf die Schlacke abzielen, hierzu fehlen jedoch ökonomische Anreize aufgrund des geringen Wertes von Cer und Lanthan und bislang wurden keine entsprechenden Bemühungen unternommen (Binnemans et al. 2013a). Auch in einer optimierten Entsorgungskette ist daher von einem Verlust der Seltenen Erden im Schritt der Rückgewinnung auszugehen, sofern es keine deutlichen Veränderungen bezüglich der Wirtschaftlichkeit entsprechender Maßnahmen gibt.

Tabelle 201: Materialverluste entlang der Entsorgungskette von Altkatalysatoren

Szenario	Produkt	Sammlung	Sortierung	Aufbereitung	Rückgewinnung	Verluste der gesamten Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ref.-Szenario	Altkats	vernachlässigbar	< 10 %	< 13 %	2 % Pt 15 % Rh	23 % Pt 33 % Rh 100 % SE (Ce, La)	756-798 kg Pt 778-793 kg Rh 134.078-135.611 kg SE
Szenario A	Altkats PKW	48 %*	< 10 %	< 13 %	2 % Pt 15 % Rh	60 % Pt 65 % Rh 100% SE (Ce, La)	1.972-2.081 kg Pt 1.533-1563 kg Rh 122.950 kg SE
	Altkats Nutzfahrzeuge	46 %*	< 10 %	< 13 %	2 % Pt 15 % Rh	59 % Pt 64 % Rh 100 Se (Ce, La)	734-891 Pt 212-242 Rh 11.128-12.661 kg SE
Szenario B	Altkats	60 %*	< 10 %	< 13 %	2 % Pt 15 % Rh	70 % Pt 73 % Rh 100 % SE (Ce, La)	2.300-2.428 kg Pt 1.651-1.683 kg Rh 134.078-135.611 kg SE
Szenario C	Altkats	88 %*	< 10 %	< 13 %	2 % Pt 15 % Rh	91 % Pt 92 % Rh 100 % SE (Ce, La)	2.990-3.157 kg Pt 2.146-2.188 kg Rh 134.078-135.611 kg SE
Optimierte Entsorgungskette	Altkats	vernachlässigbar	5%	6,5%	2 % Pt 15 % Rh 100% SE	13% Pt 24,5% Rh 100% SE	427-451 kg Pt 578 - 589 kg Rh 134.078-135.611 SE

Quelle: basierend auf Hagelüken et al. 2005a; Hagelüken 2010a

* Verlustquoten inkl. Exporte aus der Nutzungsphase sowie bei Szenario B und C inkl. etwaiger Verluste aus den statistisch nicht geklärten Fällen. In Szenario B und C erfolgt keine getrennte Betrachtung von PKW und Nutzfahrzeugen.

Sonstige Automobilkomponenten

Bezüglich der sonstigen Automobilkomponenten, die strategische Metalle enthalten, stellt sich die Situation bei den Exporten aus der Nutzungsphase und Verlusten in der Sammlung wie für die Altkatalysatoren beschrieben dar.

In den folgenden Schritten der Entsorgungskette werden die sonstigen Komponenten mit Gehalten an strategischen Metallen, wie eingangs beschrieben in der Regel nicht gesondert entfernt. Unklar bzgl. der Massenrelevanz ist, inwieweit der Ausbau einzelner Komponenten und die weitere Nutzung als Ersatzteil eine Rolle spielt bzw. zukünftig spielen wird. Die im Automobil verbleibenden Komponenten gehen in den Schritten zur mechanischen Vorbehandlung, Sortierung, Aufbereitung etc., welche auf Massenrohstoffe wie Stahl, Kupfer, Aluminium, Glas und Plastik abzielen, verloren (vgl. hierzu auch Hagelüken und Meskers 2009). Die strategischen Metalle werden hierbei über diverse Output-Fraktionen verteilt, sodass die Möglichkeiten zur Rückgewinnung stark eingeschränkt sind.

Hagelüken und Meskers (2009) stellten fest, dass i.d.R. für diese Komponenten keine vorgeschaltete ökonomisch vertretbare Entfernung möglich war. Aufgrund der zunehmend verbauten Elektronik, die eine steigende Menge strategischer Metalle mit sich bringt, kann sich diese Situation zukünftig jedoch verändern.

Das prinzipielle Potenzial einer Rückgewinnung strategischer Metalle aus den sonstigen Fahrzeugkomponenten insbesondere aus der Elektronik wurde jedoch erkannt und wird zurzeit in verschiedenen Projekten näher untersucht.

Im vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) geförderten Projekt „Verwertungspotenzial seltener Metalle in der Automobilelektronik“ wurden Verwertungsoptionen und ihre ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit untersucht. In dem im September 2013 gestarteten UF-OPLAN Vorhaben „ORKAM“ (FKZ 3713 33 337) ging es um die „Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle“. Diese beiden Vorhaben prüften, ob zukünftig mit einer Wandlung der Entsorgungssituation von Automobilen zu rechnen ist. Auch wenn nicht unbedingt mit signifikanten Änderungen bis zum Bezugsjahr der Studie (2020) zu rechnen ist, kann für die folgenden Jahre davon ausgegangen werden, dass zumindest in Bezug auf die Separation der verbauten Elektronikkomponenten eine Verbesserung der Entsorgungssituation möglich ist.

Für die optimierte Entsorgungskette lässt sich entsprechend festhalten, dass eine Separation der Komponenten, die strategische Metalle enthalten, erforderlich ist. Bei den strategischen Metallen handelt es sich zum einen um Seltene Erden in Permanentmagneten wie Dysprosium, Gadolinium und Terbium, zum anderen um diverse andere strategische Metalle, die sich in erster Linie in der Fahrzeugelektronik befinden⁶¹. Sofern keine Separation dieser Komponenten stattfindet, erfolgt ein vollständiger Verlust in den nachgeschalteten Entsorgungsschritten (z. B. in der Stahlrecyclingroute über die Schlacke; vgl. Metallrad in Abschnitt 6.2.2). Eine Separierung in einer optimierten Entsorgungskette ist unter den bestehenden Rahmenbedingungen prinzipiell nur dann als realistisch einzuschätzen, wenn diese rentabel ist. Dies hängt neben den marktwirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen unter anderem vom Metallgehalt der jeweiligen Komponenten, von der Zugänglichkeit und der Automatisierbarkeit des Separationsverfahrens ab. Die oben genannten Projekte zeigten auf, dass diese Bedingungen derzeit nicht vorhanden sind. Auf eine mögliche Optimierung in der Entsorgung von Permanentmagneten wird in Abschnitt 6.2.3.22 eingegangen. Eine Separation von Leiterplatten aus der Fahrzeugelektronik kann teilweise durch eine sehr differenzierte Post-Schredder-Technologie erreicht werden (Schmid 2015).

⁶¹ Zu den bilanzierten Metallen gehört auch Neodym, welches aber für Fahrzeuge nicht einzeln erfasst wurde, sondern in der Gruppe der Seltenen Erden (SE) auftaucht.

Exkurs: Kreislauforientiertes Produktdesign

Die Ökodesign-Richtlinie (RL 2009/125/EG) schafft den Rahmen für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Produkten auf EU-Ebene. Die Umsetzung der Anforderungen erfolgt mittels produktspezifischer Verordnungen. Bislang sind bereits Verordnungen für die hier untersuchten Produkte in Kraft (bspw. Klimaanlage), für andere laufen Vorstudien (bspw. Server). Die Richtlinie wurde auf nationaler Ebene durch das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) umgesetzt. Ein Kriterium der Ökodesign-Richtlinie für die recyclinggerechte Konstruktion von Produkten ist die „Vermeidung technischer Lösungen, die der Wiederverwendung und dem Recycling von Bauteilen und vollständigen Geräten entgegenstehen“.

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz verpflichtet Hersteller im Rahmen der in § 23 geregelten Produktverantwortung Produkte so zu entwickeln, dass sie „nach Gebrauch zur ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Verwertung sowie zur umweltverträglichen Beseitigung geeignet sind“. Um die spätere Entsorgung zu erleichtern, sollen schadstoffhaltige Erzeugnisse gekennzeichnet und „auf Rückgabe-, Wiederverwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten oder -pflichten und Pfandregelungen durch Kennzeichnung der Erzeugnisse“ hingewiesen werden.

Gemäß § 4 ElektroG2 sind „Elektro- und Elektronikgeräte (...) möglichst so zu gestalten, dass die Demontage und die Verwertung, insbesondere die Wiederverwendung und die stoffliche Verwertung von Altgeräten, ihren Bauteilen und Werkstoffen, berücksichtigt und erleichtert werden.“

Die aufgeführten rechtlichen Anforderungen bilden zwar einen Rahmen. Die für die Umsetzung auf der Produktebene notwendigen konkreten Operationalisierungen bezogen auf die ReStra-Zielelemente bzw. die ReStra-Produkte fehlen jedoch. Dies betrifft sowohl Designaspekte, durch die die Produkte leichter zerlegbar werden (bspw. SE-Magnete aus Automobilkomponenten einfacher separierbar werden) (Design for Dismantling), als auch solche, durch die Elemente leichter separiert werden können, für die kein gemeinsamer Rückgewinnungspfad besteht (z. B. die Trennung von Seltenen Erden aus Elektronikkomponenten, die in integrierten Kupferhütten z. B. zur Rückgewinnung von Edelmetallen verwertet werden) (Design for Recycling).

Die Materialverluste entlang der Entsorgungskette sind den obigen Ausführungen entsprechend in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 202: Verluste strategischer Metalle aus sonstigen Automobilkomponenten entlang der Entsorgungskette

Produkt	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Verluste der gesamten Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Sonstige Automobilkomponenten, Ref.-Szenario	vernachlässigbar	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	55.102-55.770 kg SE; weitere strategische Metalle
Sonstige Automobilkomponenten, PKW, Szenario A	48 %*	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	
Sonstige Automobilkomponenten, Nutzfahrzeuge, Szenario A	46 %*			
Sonstige Automobilkomponenten, Szenario B	60 %*	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	
Sonstige Automobilkomponenten, Szenario C	88 %*	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	100 % (Dy, Gd, Tb; weitere strategische Metalle)	
Optimierte Entsorgungskette	vernachlässigbar	reduzierte Verluste; komponentenabhängig	reduzierte Verluste; komponentenabhängig	-

* Verlustquoten inkl. Exporte aus der Nutzungsphase sowie bei Szenario B und C inkl. etwaiger Verluste aus den statistisch nicht geklärten Fällen

6.2.3.3 Spezialgläser

Spezialgläser stellen neben Poliermitteln eines von zwei Anwendungsfeldern der optischen Industrie dar, die in der Produktanalyse näher betrachtet wurden. In Bezug auf die Verwendung von ReStra-Metallen wurden dabei Strahlenschutzgläser und Lasergläser als relevant identifiziert. In diesen Gläsern kommen Erbium und Cer bzw. deren Oxide zum Einsatz.

Für beide Endanwendungen hat sich im Rahmen einer Hersteller- und Expertenbefragung ergeben, dass bisher keine getrennte Sammlung und kein Recycling der enthaltenen strategischen Metalle erfolgen. Spezielle Rücknahmesysteme existieren nicht (Hamm 2013a; Hartmann 2013a/b; Ladwig 2013a). Bzgl. der Strahlenschutzgläser ist daneben die radioaktive Belastung problematisch, die zunächst eine Dekontamination erforderlich macht (Hartmann 2013a).

Neben der fehlenden Sammlung stellt zudem die geringe Konzentration strategischer Metalle in den Gläsern ein Problem dar. Nach Experteneinschätzung ist die Rückgewinnung strategischer Metalle aus den betroffenen Gläsern praktisch ausgeschlossen (Luidold 2013).

Aufgrund der fehlenden gesonderten Erfassung der Gläser kann von einem vollständigen Materialverlust entlang der Entsorgungskette ausgegangen werden. Bzgl. des Recyclingschritts lässt sich aufgrund der Erkenntnisse der Expertenbefragung davon ausgehen, dass auch bei erfolgter getrennter Sammlung keine bzw. zumindest keine ökonomisch vertretbare Rückgewinnung realisiert würde. Hierbei stellen die hohen Energieaufwendungen für eine mögliche Rückgewinnung ein wesentliches Hemmnis dar. Eine Optimierung der Entsorgungskette stellt sich aufgrund der genannten Aspekte als unrealistisch dar. Für Strahlenschutzgläser ergeben sich aufgrund der Kontamination andere Prioritäten in der Entsorgung. Für Lasergläser wäre zunächst eine gezielte

Sammlung notwendig, für die sich aufgrund der geringen Mengen an Cer von unter 10 kg im Jahr kaum Anreize bestehen.

Die folgende Tabelle fasst die entlang der Entsorgungskette auftretenden Materialverluste zusammen.

Tabelle 203: Verluste entlang der Entsorgungskette von Spezialgläsern

Produkt	Sammlung, Sortierung	Aufbereitung	Rückgewinnung	Verluste der gesamten Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Strahlenschutzgläser	(100 %)	(-)	(100 %)	100 %	850 kg Ce
Lasergläser	(100 %)	(-)	(100 %)	100 %	<10 kg Ce

6.2.3.4 Photovoltaik

Im Bereich der Photovoltaikzellen sind die Dünnschichttechnologien CIGS, CdTe und a-Si relevant.

Insgesamt handelt es sich bei den untersuchten Zelltypen um vergleichsweise junge Technologien, insbesondere wenn man die vergleichsweise hohe Nutzungsdauer betrachtet. Entsprechend sind bisher kaum Dünnschichtzellen, die ihr Lebensende erreicht haben, zur Entsorgung angefallen. Vorhandene Verfahren zur Verwertung von Dünnschicht-Photovoltaikzellen beschränken sich weitestgehend auf die Verarbeitung von Produktionsabfällen. Dennoch waren in den vergangenen Jahren einige Entwicklungen im Bereich der Erfassung bzw. Sammlung von alten Modulen sowie der Verwertung bzw. dem Recycling festzustellen. Dies betrifft Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen, den Aufbau einer Infrastruktur zur Sammlung sowie verschiedene Entwicklungsvorhaben für Verfahren zum Modulrecycling.

Sammlung

Am 14. August 2013 ist die neue WEEE-Richtlinie, die auch PV Module umfasst, in Kraft getreten. Zur nationalen Umsetzung in Deutschland wurde im Jahr 2015 das ElektroG2 verabschiedet (BMU 2015). Alt-Photovoltaikmodule aus privaten Haushalten dürfen nur über öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger, Hersteller oder Vertrieber erfasst werden (§ 12 ElektroG2). Sie stellen bei der Sammlung über die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger eine eigene Gruppe dar (Gruppe 6, ElektroG2 § 14). Für Photovoltaikmodule gilt das neue ElektroG erst seit Februar 2016. Dabei wird zwischen Altgeräten und historischen Altgeräten unterschieden. PV-Altgeräte sind dabei solche, die ab Oktober 2015 in Verkehr gebracht wurden, historische PV-Altgeräte solche, die schon vor diesem Zeitpunkt in Verkehr gebracht wurden (§ 3 ElektroG2). Historische Altgeräte können von Privatkunden direkt an den kommunalen Sammelstellen abgegeben werden, bei gewerblichen Endkunden ist der letzte Besitzer selber für die Entsorgung verantwortlich. Hierdurch ergibt sich die Sonderregelung, dass die Hersteller für solche Photovoltaikmodule von anderen Nutzern als privaten Haushalten und für Photovoltaikmodule, die in Beschaffenheit und Mengen nicht mit den üblicherweise in privaten Haushalten anfallenden Photovoltaikmodulen vergleichbar sind, nicht zur Rücknahme und Entsorgung verpflichtet sind (§ 19 ElektroG2). Ab 2016 soll eine Mindestsammelquote von 45 % bezogen auf das Durchschnittsgewicht der in den letzten drei Jahren in Verkehr gebrachten Geräte (placed-on-the-market, pom) erreicht werden, ab 2019 65 %.

Im Jahr 2013 existierten verschiedene Rücknahmesysteme für Photovoltaikmodule, von denen PV-Cycle, E-Bell, First Solar und take-e-way in den folgenden Abschnitten exemplarisch dargestellt werden.

PV-Cycle

PV-Cycle wurde 2007 zur Sammlung von PV-Altmodulen als gemeinnützige Dachorganisation der Hersteller und Importeure von Photovoltaikmodulen gegründet. PV CYCLE finanziert sich durch Beiträge der Hersteller und Importeure und ermöglicht es ihnen, ihren Entsorgungsverpflichtungen nachzukommen (PV-Cycle 2013b). Nicht registrierte Mitglieder bzw. Eigentümer können den Entsorgungsservice gegen entsprechende Sonderbezahlung ebenfalls wahrnehmen. Laut eigenen Angaben repräsentiert PV CYCLE ca. 90 % des europäischen PV-Markts, betreibt in verschiedenen Ländern nationale Vertretungen und stellt das einzige voll funktionsfähige Rücknahme- und Recyclingprogramm für alle Arten von PV-Technologien in den EU27-Ländern dar. Im PV CYCLE Netzwerk sind Sammelstellen, Abfalltransporteure und spezialisierte Recyclinganlagen miteinander verknüpft (PV-Cycle 2013b). Allein in Deutschland finden sich 104 Sammelstellen im PV CYCLE Netzwerk, im gesamteuropäischen Netzwerk gibt es ca. 317 Sammelstellen (PV-Cycle 2013b). Für Eigentümer von Photovoltaikmodulen der Mitglieder gibt es die Möglichkeit, die Altmodule kostenlos zu entsorgen, auch wenn diese nicht aus privaten Quellen stammen. Die Art der Entsorgung richtet sich nach der Anzahl der Altmodule. Kleine Modulmengen (<30 bis 40) müssen selbstständig zur Sammelstelle gebracht werden, wo sie gesammelt und später zu den Erstbehandlern transportiert werden. Größere Mengen werden nach Vereinbarung beim Eigentümer vor Ort abgeholt. In 2012 wurden von PV CYCLE 3.759 Tonnen EOL Modulschrott gesammelt und verwertet, im Vergleich zu 1.430 Tonnen in 2011 (PV-Cycle 2013a). Rund 77 % hiervon waren kristalline Silicium-basierte Zellen, ca. 6 % amorphe Siliziumzellen, 16 % CIGS Zellen, während CdTe Zellen keinen nennenswerten Anteil an den Abfällen hatten (PV-Cycle 2013a). Der Anstieg der absoluten Zahlen ist zumindest teilweise jedoch auf die Ausdehnung von PV CYCLE auf weitere Länder zurückzuführen. Der logistische und finanzielle Aufwand des Systems hielt sich bisher in Grenzen, da erst zukünftig mit größeren Mengen an Altmodulen zu rechnen ist (PV-Cycle 2013c). Aufgrund der europaweiten Integration von PV-Modulen in die WEEE-Gesetzgebung liegt der Schwerpunkt von PV-Cycle inzwischen nicht mehr auf der Sammlung von PV-Modulen, sondern auf der Beratung und anderen Dienstleistungen im Bereich der Entsorgung von PV-Modulen.

E-Bell

Die Landbell AG für Rückholssysteme ist ein unabhängiger System- und Entsorgungsdienstleister, der für Unternehmen aus Industrie, Handel und Handwerk Rücknahme- und Verwertungspflichten übernimmt (Landbell 2013). In 2013 übernahm die E-Bell Recycling GmbH die Rücknahme von Solar-Modulen in Europa. Der Transport zu Recyclingunternehmen erfolgt durch die E-Bell Recycling GmbH je nach Menge der Module individuell nach Bedarf an den Zwischenlagern oder an der Anfallstelle.

In 2013 existierte kein stationäres Netz an Sammelstellen, da die Menge der anfallenden Altmodule eher gering war. Der logistische Aufwand richtet sich nach der Art des Rückbaus bzw. nach dem Zerstörungszustand der Module. Grundsätzlich erfolgt die Rückholung auf Holzpaletten als Stückgut. Sofern der Transport per Palette aufgrund des Zerstörungsgrades nicht möglich ist, finden entsprechende Containereinheiten Einsatz. Die Finanzierung des Systems erfolgte im Untersuchungsjahr 2013 ausschließlich durch die jeweiligen Hersteller.

First Solar

First Solar bietet für die eigenen Dünnschichtmodule ein eigenes Rücknahmesystem an (Beckmann 2012). Zunächst basierte das Modell auf einer vorgezogenen Entsorgungsgebühr, die in den Modulpreis integriert war (Wambach und Wade 2013). Inzwischen kann der Käufer eine Entsorgungsleistung kaufen, die über den gesetzlichen Mindeststandards nach ElektroG2 hinausgeht (Wade 2015). Im Rahmen des ElektroG2 können solche direkten Rücknahmen aber angerechnet werden.

Für den Abtransport der Altmodule stellt First Solar Verpackungsanleitung und -material (Transportbehälter) zur Verfügung. Demontage und Verpackung der Module erfolgen durch den Modulbesitzer auf dessen Kosten.

Die Mehrheit der installierten Module in Deutschland (>85 % in 2011) ist derzeit der Klasse bis 30 kWp zuzuordnen, die typische Anlagengröße für Installationen auf privaten Hausdächern. Dies spricht für eine relativ breite Verteilung der Module auf viele zukünftige Abfallbesitzer (vgl. Beckmann 2012), zumindest für die nähere Zukunft. Die durchschnittliche Anlagengröße ist in den letzten Jahren gestiegen, was mit einer höheren Anzahl von Freiflächen- und Gewerbeanlagen zusammenhängt und später (ab 2030) vermutlich zu einer stärkeren räumlichen Konzentrierung der Abfallmengen führen wird. Die zunächst noch breite Verteilung der Altanlagen kann eine effiziente Sammlung grundsätzlich erschweren. Nach aktuellen gesetzlichen Regelungen muss jeder öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger in seinem Entsorgungsgebiet mindestens eine Sammelstelle zur kostenlosen Annahme einrichten. Zudem sind die Module i.d.R. von einer Größe, die eine Entsorgung über andere Wege wie beispielsweise den Hausmüll sehr unwahrscheinlich macht, was für eine hohe Erfassungsquote spricht. Dennoch existiert durchaus die Möglichkeit des unkontrollierten Rückbaus bspw. bei Gebäudeabriss (bspw. für ältere Module aus dem 100.000 Dächer-Programm), wobei Verluste auftreten können.

Neben der Erfassung alter Module über Sammelstellen etc. scheint sich in den letzten Jahren auch ein Markt für gebrauchte und nicht mehr funktionsfähige Module, die als Ersatzteillieferant gefragt sind (Fiedler 2013), zu entwickeln. Über Plattformen wie photovoltaikforum.com, die von der SecondSol GmbH betrieben wird, werden solche Module gehandelt. Bisher finden diese Aktivitäten in recht überschaubarem Umfang statt (Fiedler 2013), sodass für das Jahr 2020 von keinem relevanten Einfluss auszugehen ist. Längerfristig könnten solche Plattformen jedoch an Bedeutung gewinnen.

Vor dem geschilderten Hintergrund kann die Sammelquote für das Jahr 2020 in Anlehnung an die geltenden Quoten abgeschätzt werden. 85 % Sammelquote bezogen auf die anfallenden EoL-Module können für das Jahr 2020 als konservativer Schätzwert angenommen werden (in Anlehnung an Sinha et al. 2012; Wambach 2013). Für CdTe-Module ist von geringeren Verlusten auszugehen, da der mengenmäßig relevanteste Hersteller First Solar Module in dem für das Jahr 2020 relevanten Zeitraum nur an gewerbliche Kunden ausgeliefert hat und in dem entsprechenden Zeitraum auch eine vorgezogene Recyclinggebühr erhoben worden ist. Entsprechend kann aufgrund der bereits bestehenden und sich laufend entwickelnden Infrastruktur zur Sammlung von Altmodulen für das Jahr 2020 von einer Sammlung von mindestens 85 % der anfallenden Module ausgegangen werden, das heißt, die Verluste werden auf <15 % beziffert. Dieselbe Quote gilt auch für die enthaltenen strategischen Metalle, die in den Modulen gebunden sind.

Sortierung, Aufbereitung und Recycling

Grundsätzlich werden im ElektroG2 bestimmte Verwertungsquoten verlangt. Für Altgeräte der Kategorie 4 (u. a. Photovoltaikmodule) ist dort vorgesehen, dass diese so behandelt werden, dass

- der Anteil der Verwertung mindestens 80 % beträgt und
- der Anteil der Vorbereitung zur Wiederverwendung und des Recyclings mindestens 70 % beträgt (ElektroG2 § 22 Abs. 1).

Die Bestimmung der entsprechenden Anteile erfolgt über das Gewicht.

PV CYCLE hat sich zum Ziel gesetzt bis 2020 85 % eines Solarmoduls bezogen auf die Masse zurückzugewinnen (PV-Cycle 2013b). Hierbei ist jedoch anzumerken, dass 80 bis 90 % des Gewichts Glas und weitere 10 % Metalle wie Aluminium und Kupfer sind. Halbleitermaterialien machen zwischen 0,1 bis maximal 2 % aus.

Speziell für CIGS und CdTe PV-Module bieten derzeit verschiedene Unternehmen Behandlungstechnologien an. Eine Übersicht von Recyclingverfahren für Photovoltaikdünnschichtzellen findet sich in der folgenden Tabelle.

Tabelle 204: Behandlungsverfahren für Dünnschichtphotovoltaikmodule

Firma, Ort	Beschreibung
First Solar, Frankfurt/Oder	Vorbehandlung von CdTe-Module; Zerkleinerung, Kombination von Trocken- und Nassprozessen
Saperatec, Bielefeld	Pilot-Behandlungsanlage für Dünnschichtmodule (CIGS, CdTe); Trennung von Verklebungen und Beschichtung mithilfe von Tensiden
Looser Chemie, Langenweißbach	Pilot-Behandlungsanlage für Dünnschichtmodule (CIGS, CdTe); Verbundöffnung, chemische Behandlung der Halbleiterschichten
Solarcycle, Bitterfeld/Wolfen	Behandlungsanlage für Dünnschichtmodule (CIGS) in Planung; Kombination thermischer, physikalischer und chemischer Verfahrensschritte
Lobbe, Espenhain	Versuche in Labor und Technikum zum Recycling von Dünnschicht-Modulen (CIGS, CdTe) gemeinsam mit LCD-Paneelen; Kombination aus Kälteschick-, Versprödung und chemisch-physikalischer Behandlung

Quelle: Beckmann 2012; PV CYCLE 2013; vgl. auch Technologiescreening

Da die meisten Verfahren bisher lediglich im Pilotmaßstab erprobt wurden und noch nicht im industriellen Maßstab realisiert wurden, liegen nur wenige Informationen bezüglich auftretender Materialverluste im Prozess vor. Die verschiedenen Unternehmen berichten zudem von derzeit bestehenden Problemen bezüglich der Weiterentwicklung der Verfahren: Die Entwicklung stützt sich hauptsächlich auf Versuche mit Produktionsabfällen. Aufgrund der derzeitigen Probleme der Branche und insbesondere der deutschen Hersteller hat sich der Zugriff auf entsprechende Abfälle jedoch deutlich erschwert.

Im Projekt RESOLVED, welches zwischen 2004 und 2007 von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), First Solar, der Deutschen Solar AG sowie den Universitäten Utrecht und Miskolc bearbeitet wurde, wurden Möglichkeiten des Recyclings von CdTe und CIS Dünnschichtmodulen untersucht (RESOLVED o.J.). End-of-Life Module wurden hierbei entweder in einer Hammermühle mechanisch aufbereitet (bei zerstörten Modulen oder Glasbruch) oder Glas

und Halbleiterschicht wurden durch thermische Auftrennung und Strahlverfahren getrennt. Anschließend folgte in beiden Fällen eine nasschemische Behandlung zur Separation des Halbleiters von Strahlmitteln und Glasrückständen (RESOLVED o.J.). Bei der Behandlung von Modulbruch wird eine Rückgewinnung von 78,7 % CdTe und 54 % CIGS in der Aufbereitung genannt. Bei den unzerstörten Modulen liegen die Rückgewinnungsraten noch höher (RESOLVED o.J.). Bzgl. der Materialrückgewinnung im Gesamtprozess liegen keine Informationen vor.

Bezüglich der First Solar Recyclinganlage wird angegeben, dass 95 % bis 98 % des CdTe im Filterkuchen aufgefangen werden können, wovon in den weiteren Schritten 80 % bis 95 % Cd und Te zurückgewonnen werden (Marwede und Reller 2012). Entsprechend ist für dieses Verfahren von Materialverlusten an Cd und Te zwischen 7 % und 24 % auszugehen, die jedoch nicht zu den in ReStra betrachteten strategischen Metallen gehören. Indium wird jedoch innerhalb des Prozesses nicht zurückgewonnen, sodass die Verluste hier 100 % betragen (vgl. Marwede et al. 2013; Reckziegel 2010; Sander et al. 2004). Bzgl. dieser voraussichtlichen Verluste ist jedoch anzumerken, dass davon auszugehen ist, dass künftig ITO-TCO eine deutlich geringere Rolle spielen werde. Stattdessen werden zunehmend aluminiumdotiertes Zinkoxid und fluordotiertes Zinnoxid eingesetzt (Stegemann 2013). Auch wenn sich hier keine Reduzierung der Indiumverluste ergeben sollte, ist längerfristig von sinkender Mengenrelevanz dieser Verluste auszugehen. Dasselbe gilt für a-Si-Zellen, bei denen bisher keine Technologien zur Rückgewinnung von Indium aus ITO-TCO eingesetzt oder erprobt werden, jedoch gleichzeitig längerfristig von einem zurückgehenden Einsatz von Indium auszugehen ist.

Das Loser Chemie Verfahren ist sowohl für CIGS als auch CdTe Module einsetzbar. Ergebnis des chemischen Prozesses sind Polymetallsalzlösungen, die in die weitere Aufbereitung gehen (Paltzsch o.J.). Bei Solarcycle in Bitterfeld ist eine Anlage zum Recycling von CIGS Modulen in Planung, bzgl. der Einzelheiten zum Prozess sowie eventuell auftretender Verluste liegen jedoch keine Erkenntnisse vor. Die Firma Lobbe spricht davon, in ihrem Verfahren „verschiedene Metalle [...] fast zu 100 Prozent“ zurückzugewinnen zu können (Lobbe 2012). Inwieweit dies für die Halbleitermaterialien Indium und Gallium gilt, ist nicht klar. Das von Saperatec entwickelte Verfahren zielt auf eine Trennung von Glas und Halbleiterbeschichtung mithilfe speziell entwickelter Flüssigkeiten ab (saperatec o.J.). Die so gewonnenen Halbleiterbeschichtungen werden an auf die Weiterverarbeitung spezialisierte Kooperationspartner weitergegeben (saperatec o.J.). Es ist hervorzuheben, dass als Ergebnis des Prozesses das Halbleitermaterial als Feststoff vorliegt (bspw. im Gegensatz zum Loser Chemie, wo Polymetallsalzlösungen als Ergebnis des Verfahrens vorliegen) und von einer vergleichsweise hohen Effizienz in den Rückgewinnungsprozessen auszugehen ist (Hübner 2013a, 2013b).

Für die verschiedenen Ansätze zur Rückgewinnung von Indium und Gallium aus CIGS-Zellen lassen sich die Rückgewinnungsraten auf 70 bis 90 % beziffern (Marwede 2013).

Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die derzeitige Entsorgungs- bzw. Recyclingsituation von End-of-Life-Photovoltaikmodulen auf einem äußerst geringen Massenniveau bewegt, was aber insbesondere darin begründet liegt, dass bisher kaum ausgediente Module als Abfall anfallen. Für die Ist-Situation der Entsorgungspraxis ergeben sich vollständige Verluste der anfallenden strategischen Metalle. Gleichzeitig lässt sich wie beschrieben eine relativ dynamische Entwicklung sowohl bzgl. des Aufbaus von Sammelsystemen, als auch von Anlagen zur Modulaufbereitung und -recycling feststellen. Auf dieser Basis wird eine optimierte Entsorgungskette skiz-

ziert. Die entsprechenden Abschätzungen für Ist-Situation und optimierte Entsorgungskette finden sich in Tabelle 205. Grundlage der Prognose sind die obigen Ausführungen zur Sammlung sowie die Annahme, dass die beschriebenen Recyclingverfahren dann tatsächlich für die Behandlung von EOL-Modulen zum Einsatz kommen.

In Sander et al. (2007) wird hingegen hervorgehoben, dass gerade in den Jahren, in denen nur geringe Mengen an Modulabfall anfallen, was grundsätzlich auch für das Bezugsjahr 2020 dieser Studie noch der Fall ist, hochwertige spezialisierte Recyclinglösungen noch nicht wirtschaftlich realisierbar sind. Die geringen bisherigen und in den nächsten Jahren zu erwartenden Abfallmengen werden auch in (Behrendt et al. 2010) erneut als Problem beschrieben, das dazu führt, dass die wirtschaftliche Schwelle für Recyclinganlagen nicht überschritten wird. Aufgrund der ökonomischen Situation kann daher bei zu geringen Abfallmengen das Shreddern mit folgender Verwertung als wahrscheinlichere EOL-Variante angesehen werden. Hierbei werden die gesetzlich vorgeschriebenen Verwertungsquoten zwar erreicht, jedoch keines der hier relevanten strategischen Metalle zurückgewonnen. Einzuschränken ist, dass CdTe-Module hiervon ausgeschlossen sind (aufgrund der Gehalte an toxischem Cd, vgl. auch Behrendt et al. 2010).

Aufgrund der bisherigen Entwicklungen und der Kritikalität der Metalle lässt sich jedoch davon ausgehen, dass sobald größere Mengen EoL-Module zum Recycling anfallen, sich die Situation entsprechend der in der folgenden Tabelle dargestellten optimierten Entsorgungskette entwickeln kann, wobei die prinzipielle Konkurrenz zum Shreddern bestehen bleibt. Rechtliche Instrumente könnten hier eine Entwicklung zu Gunsten der Rückgewinnung von strategischen Metallen begünstigen.

Tabelle 205: Materialverluste von ReStra-Metallen entlang der Entsorgungskette von Dünnschicht PV-Modulen

Variante	PV-Technologie	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	CdTe	<15%	100%	100% In	25-207 kg In
	a-Si	<15%	100%	100% In	11-62 kg In
	CIGS	<15%	100%	100% In, Ga	4-78 kg In 1-62,9 kg Ga
Optimierte Entsorgungskette	CdTe	<15%	100% In (7-24% Cd, Te)	100% In	25-207 kg In
	a-Si	<15%	100% In	100% In	11-62 kg In
	CIGS	<15%	10-30% In, Ga	23-40% In, Ga	1-31 kg In 0,2-25 kg Ga

6.2.3.5 Hitzeschutzkeramiken

Im Bereich der Hitzeschutzkeramiken wurde der Einsatz von Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid in der keramischen Hitzeschutzbeschichtung von stationären Gasturbinen und Flugzeugtriebwerken betrachtet. Im Gegensatz zur Produktanalyse (siehe Kapitel 5.3) ist für die Analyse der Entsorgungskette keine getrennte Betrachtung der beiden Anwendungsfelder notwendig, da sich die Entsorgungssituation ähnlich darstellt.

In beiden Anwendungsfeldern fallen die hier relevanten Abfallmengen („alte“ Beschichtungen) nur teilweise am Lebensende des gesamten Produkts (stationäre Gasturbine und Flugzeug/Flug-

zeugtriebwerke bzw. die beschichteten Komponenten - Brennkammerelemente, Leit- und Laufschaufeln) an. Ein großer Teil der Abfälle fällt während Wartungszyklen an, in denen die Beschichtung durch Strahlverfahren oder chemische Verfahren entfernt und durch neue Beschichtung ersetzt wird. Die Anzahl der Zyklen, d. h. der Wiederverwendungen der Komponenten, bewegt sich zwischen 1 und 4 (Burmeister 2013). Entsprechend fallen etwa bis zu 75 % der relevanten Abfälle während der Nutzungsphase des Produkts und zwischen 25 % und 100 % am Lebensende an. Im Schnitt kann jedoch von 2 Zyklen ausgegangen werden (Burmeister 2013), was einer 50-prozentigen Aufteilung der Abfallmengen zwischen Nutzung und Lebensende der Produkte entspricht. Je nachdem gestaltet sich die Entsorgungskette unterschiedlich.

In den Wartungsintervallen wird die Beschichtung von den beschichteten Bauteilen anhand verschiedener Verfahren entfernt. Dies können Hochdruckwasserstrahlen, Aluminiumoxid-Strahlen oder auch chemische Verfahren sein. Je nach Verfahren ergibt sich eine unterschiedliche Sammlung der Abfälle, wobei in keinem Fall eine spezielle Aufbereitung und Rückgewinnung strategischer Metalle stattfindet. Seltenen Erden kommt hier bisher keine besondere Aufmerksamkeit zu. Die Abfälle aus dem Hochdruckwasserstrahlen werden gesammelt und vom Entsorger abgenommen. Sie fallen unter den Abfallschlüssel „sonstige Schlämme“ (Gülzow 2013). Abfälle aus dem Aluminiumoxidstrahlen werden deponiert, Abfälle aus der chemischen Entfernung werden nach Anwenderauskunft der Verbrennung zugeführt (Gülzow 2013).

Bei der Entsorgung der beschichteten Komponenten findet keine Entfernung der Beschichtung statt. Die Komponenten werden entweder an die Hersteller zurückgeschickt oder der Metallrückgewinnung zugeführt, wobei keine Rückgewinnung Seltener Erden stattfindet (Gülzow 2013).

Entsprechend kann in beiden Fällen von einem vollständigen Verlust der hier relevanten strategischen Metalle entlang der Entsorgungskette bezogen auf die Ist-Situation ausgegangen werden.

Für eine Optimierung der Entsorgungskette müssten zunächst geeignete Verfahren zur Rückgewinnung der enthaltenen strategischen Metalle am Ende der Entsorgungskette zur Verfügung stehen. Auch wenn Yttrium zu den als besonders kritisch eingestuften schweren Seltenen Erden zählt, gibt es diesbezüglich jedoch bislang nahezu keine Überlegungen (Binnemans et al. 2013a/b), entsprechende einsatzbereite Verfahren existieren nicht. Prinzipiell stellt sich die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Keramiken aufgrund ihres unedlen Verhaltens eine große Herausforderung dar. Wie das Technologiescreening aufgezeigt hat, gibt es verschiedene - hauptsächlich hydrometallurgische - Verfahren im Labor- und Pilotmaßstab für eine Yttriumrückgewinnung aus anderen Abfallströmen und MVA-Schlacken. Auch wenn sich diese Verfahren auf den hier relevanten Abfallstrom übertragen ließen - wozu keine Informationen vorliegen - ist jedoch auch dann unklar, inwieweit eine Rückgewinnung aufgrund der geringen Metallkonzentrationen und vergleichsweise geringen absoluten Mengen rentabel wäre. Erkenntnisse über Rückgewinnungsraten liegen zudem bislang nicht vor.

Sollten geeignete, wirtschaftlich einsetzbare Recyclingtechnologien verfügbar werden, so sind weitere Optimierungen in der vorgelagerten Entsorgungskette notwendig. Bisher werden die Abfälle aus dem jeweils in der Wartung angewandten Verfahren, das heißt die Abfälle aus dem Hochdruckwasserstrahlen, dem Aluminiumoxidstrahlen und der chemischen Entfernung, gemeinsam mit anderen Beschichtungsabfällen unterschiedlicher Materialzusammensetzung gesammelt. Hierdurch kommt es zur weiteren Reduzierung der ohnehin geringen Yttriumkonzentration sowie zur Vermischung mit anderen Metallen, die ggf. ebenso einer Rückgewinnung zugeführt werden sollen bzw. können. Für eine Zuführung der yttriumhaltigen Abfallströme zu geeigneten Rückgewinnungsverfahren wäre hier eine getrennte Erfassung notwendig.

Bei der endgültigen Entsorgung der beschichteten Komponenten wird auch in Zukunft der Fokus sehr wahrscheinlich auf die Nickelrückgewinnung liegen. Dies ist vor allem durch den sehr geringen Massenanteil an Yttrium begründet (unterhalb 1 %, vgl. Produktanalyse Kapitel 5.3) und den ökonomisch höheren Anreiz Nickel aus den Nickel-Superlegierungen zurückzugewinnen, statt Yttrium. Die enthaltenen Seltenen Erden, insbesondere das hier interessierende Yttrium, gehen hierbei in die Schlacke über und können nach heutigem Stand nicht wirtschaftlich zurückgewonnen werden (siehe auch Metallrad in Abschnitt 6.2.2). Für eine Rückgewinnung müsste also entweder die Beschichtung vor der Zuführung ins Nickelrecycling entfernt werden - wobei sich dann die zuvor genannten Probleme ergeben - oder die Schlacke aufbereitet werden.

Die Verluste entlang der Entsorgungskette sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Für die optimierte Entsorgungskette lassen sich aufgrund bislang fehlender geeigneter Verfahren keine potenziellen Reduzierungen der Verluste quantifizieren.

Tabelle 206: Materialverluste entlang der Entsorgungskette keramischer Hitzeschutzbeschichtungen

Variante	Bereich	Sammlung	Sortierung	Aufbereitung	Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	Wartung	<10%	-	-	100%	100%	709-1.786 kg Y
	Entsorgung	<10%	-	-	100%	100%	
Optimierte Entsorgungskette	-	Getrennte Erfassung der Y-haltigen Abfälle	-	keine geeigneten Verfahren	keine geeigneten Verfahren	= Ist-Situation	= Ist-Situation

Obwohl die Betrachtung im Projekt *ReStra* auf die Abfälle am Produktlebensende fokussiert und Produktionsabfälle ausklammert, werden diese hier aufgrund ihrer Größenordnung und Relevanz kurz näher betrachtet. Bei der Beschichtung der verschiedenen Komponenten stationärer Gasturbinen bzw. von Flugzeugtriebwerken kommt es zu sogenanntem Overspray, der je nach Komponente zwischen unter 20 % (bspw. bei Brennkammerelementen) und ca. 90 % (Leit- und Laufschaufeln) betragen kann (Seitz 2013b; Burmeister 2013). Das überschüssige eingesetzte Material wird von Filtern aufgefangen, nachdem eine gewisse Menge erreicht ist, erfolgt die Entsorgung des Filterkuchens. In der Abfallsammlung werden verschiedene Beschichtungsabfälle zusammengebracht. Aufgrund von Nickelgehalten in bestimmten Beschichtungsmaterialien werden diese gesammelten Abfälle an Nickelhütten abgegeben (Gülzow 2013). Eine Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden oder anderer Materialien findet nicht statt.

6.2.3.6 Anwendungen von Mischmetall in der Metallurgie

Bezüglich der Produktgruppe „Anwendungen von Mischmetall in der Metallurgie“ bzw. der entsprechenden Endprodukte erfolgt keine nähere Betrachtung, da die einzelnen Endprodukte in der Produktanalyse nicht identifiziert werden konnten (siehe Kapitel 5.3). Zudem liegen keine Erkenntnisse über die Rückgewinnung der hier relevanten Seltenen Erden Cer und Lanthan aus Gusseisen im Recycling vor. Es ist in diesem Fall von einem vollständigen Materialverlust im Recycling auszugehen. Die in geringer Konzentration enthaltenen Seltenen Erden werden aus den thermometallurgischen Prozessen über die Schlacke ausgetragen. Eine Optimierung der Entsorgungssituation müsste also an der Schlackenaufbereitung ansetzen. Diesbezüglich existieren zwar diverse Ansätze - Cer und Lanthan spielen dabei aber aufgrund ihres vergleichsweise geringen Wertes nur eine untergeordnete Rolle (Binnemans et al. 2013a/b).

Tabelle 207: Materialverluste aus Anwendungen von Mischmetall in der Metallurgie

Produkt	Sammlung	Sortierung	Aufbereitung	Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Anwendungen von Mischmetall in der Metallurgie	(-)	(-)	(-)	100%	100%	106-133 t Ce 46-58 t La

6.2.3.7 Batterien

In der Produktgruppe Batterien hat die Produktanalyse eine Relevanz von Nickelmetallhydridbatterien (NiMH) ergeben (siehe Kapitel 5.3). Diese enthalten Seltene Erden.

Sammlung

Die Hersteller von Gerätebatterien haben das Gemeinsame Rücknahmesystem für Geräte-Alt-batterien (GRS Batterien - Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien) und drei herstellereigene Rücknahmesysteme (CCR REBAT, ERP Deutschland, Öcorecell) eingerichtet. Nach eigenen Angaben betreibt GRS Batterien 170.000 Sammelstellen und CCR REBAT 15.000.

Für die Erfassung werden unterschiedliche Behältersysteme genutzt, die sich allerdings zwischen den einzelnen Rücknahmesystemen weitestgehend ähneln. Sammelkartons werden bspw. von allen Systemen angeboten.

GRS Batterien sammelt Gerätebatterien (also auch NiMH-Batterien) vom privaten Endverbraucher im Bringsystem, indem an Batterie-Verkaufsstellen, Wertstoffhöfen und mobilen Sammelstellen entsprechend gekennzeichnete, grüne Behälter aufgestellt werden, in die der Endverbraucher Gerätebatterien unentgeltlich einwerfen kann.

Gewerbliche Endverbraucher haben zudem die Möglichkeit, gebrauchte Gerätebatterien im Holsystem zu entsorgen. Dafür bietet GRS Batterien die Möglichkeit zur Bestellung standardisierter Behälter (30 kg-Sammelkarton, 90 kg-Sammelfass), welche befüllt abgeholt werden.

Zudem wird Vertreibern von Elektrofahrrädern ein gesondert gekennzeichnete 30 kg-Sammelkarton zur Erfassung von Li-Ion-Batterien aus Elektrofahrrädern angeboten. Ein ähnliches System bietet GRS Batterien den gewerblichen Endnutzern für Altbatterien aus stationären Energiespeichersystemen und Energieerzeugungsanlagen an.

Die Erfassung von Gerätebatterien nach drei Sicherheitsklassen entsprechend GRS wird in der folgenden Tabelle im Überblick dargestellt.

Tabelle 208: GRS-Sicherheitsklassen (GRS 2012a)

Sicherheitsklasse	Gerätebatteriearten	Erfassungsort
herkömmliche Gerätebatterien	unkritische Gemische und Mono-chargen an ZnC-, Zn-Luft-, AlMn-, Pb-, NiCd-, NiMH-Batterien, tolerierbarer Anteil Lithiumsysteme < 10%	klassische Sammelstellen (Handel u. ä.)
Hochenergie-Gerätebatterien	Mono-Fractionen primärer und sekundärer Lithiumsysteme, ggf. auch NiMH und/oder zukünftige Alternativtechnologien	qualifizierte Annahmestellen bei öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern
beschädigte Hochenergie-Gerätebatterien	beschädigte Lithiumbatterien u. ä.; Gewicht der Batterie oder Zelle > 500 g/St	qualifizierte Annahmestellen im Fachhandel, Handwerk und Sonstige

Mit Einführung dieser Sicherheitsklassen reagiert GRS Batterien auf den wachsenden Anteil an Li-Ion-Batterien im Batteriemisch und auf die damit verbundene Gefährdung durch Selbstentzündung.

CCR ReBat nutzt für die Sammlung 30 kg-Sammelkartons und 160 kg-Sammelfässer. Als Sammelstellen fungieren Vertreiber von Gerätebatterien, öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger und Betreiber von Behandlungseinrichtungen für Altgeräte nach dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz (CCR ReBat o.J.). ERP Deutschland stellt den Sammelstellen 30 kg-Sammelkartons zur Verfügung (ERP Deutschland o.J.). Öcorecell bieten den Sammelstellen verschiedene Sammelbehältnisse (Karton, Eimer, Fässer, Müllgroßbehälter) an (Öcorecell o.J.).

Zur Rücknahme bzw. Sammlung der Batterien sind gemäß Batteriegesetz die Hersteller verpflichtet (BattG 2009). Eine Sammelquote von mindestens 35 % bis 2012 und 45 % bis 2016 bezogen auf die in Verkehr gebrachte Menge ist hier rechtlich vorgegeben (BattG 2009). Bezogen auf alle Batterietypen wird diese Sammelquote bereits heute durch die existierenden Sammelsysteme erreicht.

Speziell für NiMH-Batterien liegen die Sammelquoten (bezogen auf die Inverkehrbringung) jedoch wie in der folgenden Tabelle dargestellt deutlich niedriger. Es zeigt sich, dass die Sammelquote für NiMH-Batterien im Jahr 2012 nur bei 20 % der in Verkehr gebrachten Menge gelegen hat.

Tabelle 209: Sammlung von NiMH-Batterien der vier Rücknahmesysteme in 2012

Organisation	Masse in Verkehr gebrachter NiMH-Batterien [t]	Masse zurückgenommener NiMH-Batterien [t]	Anteil zurückgenommener NiMH-Altbatterien [%]
GRS	2.134,000	450,000	21
REBAT	333,551	42,590	13
ERP	143,960	40,270	28
Ökorecell	4,578	1,481	32
Gesamt	2.616,089	534,341	20

Quellen: ERP 2012; GRS 2012; ÖcoReCell 2012; REBAT 2012

Zu einem geringen Teil lässt sich diese niedrige Quote durch die steigende Inverkehrbringung erklären. Vergleicht man die in 2012 erfasste Menge unter Annahme einer statischen durchschnittlichen Lebensdauer von sieben Jahren mit der in 2005 in Verkehr gebrachten Menge an NiMH-Batterien, so fällt die Sammelquote um etwa 3 % höher aus, was jedoch immer noch einem Verlust zwischen 77 % und 80 % entspricht.

Diese hohen Verluste lassen sich zum größten Teil auf die Entsorgung von Altbatterien über den Restmüll zurückführen.

Nach Schätzungen des GRS verbleiben rund 30 % aller Batterien in den jeweiligen Elektro- und Elektronikgeräten und werden mit diesen über den Elektroschrott oder den Restmüll entsorgt (Chryssos 2011). Heegn (2004) geht zudem davon aus, dass nicht unerhebliche Mengen an NiMH-Batterien ohne Vorbehandlung im Stahlrecycling landen.

Bei Industriebatterien stellt sich die Situation etwas anders dar. Hersteller nehmen die Batterien nach Ende der Nutzungsdauer zunehmend eigenständig zurück und führen sie einer Verwertung zu (UBA 2011). Einige Fahrzeughersteller wie bspw. Nissan (2013) entwickeln ebenfalls eigene Rücknahmesysteme für die in ihren Produkten verwendeten Batterien. Für Batterien aus Altfahrzeugen im Allgemeinen gelten die in der Altfahrzeugverordnung geregelten Demontagepflichten. Eine Rücknahme von Industriebatterien erfolgt auch über GRS.

Zahlen zur Sammlung von Industriebatterien liegen vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) vor; allerdings erfolgt hier keine separate Ausweisung von NiMH-Batterien. Die folgende Tabelle stellt die Sammelquote für die Jahre 2007 bis 2009 dar, die bei durchschnittlich 63 % gelegen hat. Die Verluste liegen entsprechend zwischen 32 % und 44 % bzw. durchschnittlich bei 37 %. Aktuellere Daten waren vom ZVEI nicht zu erhalten (Frey 2013). Näherungsweise wird davon ausgegangen, dass die Sammelquote für NiMH-Industriebatterien der Sammelquote aller Industriebatterien entspricht.

Tabelle 210: Sammlung von Industriebatterien in den Jahren 2007-2009

Berichtsjahr	2007	2008	2009
Masse der in Verkehr gebrachten Batterien [t]	86.350	80.415	60.680
Masse der zurückgenommenen Altbatterien [t]	54.980	45.417	41.240
Sammelquote	64%	56%	68%

Quelle: ZVEI 2010 in UBA 2011

Sortierung

Bei der Sortierung ist ebenfalls zwischen Industriebatterien und Gerätebatterien zu unterscheiden. Bei den Gerätebatterien liegen nach der Sammlung zunächst die unterschiedlichen Batterietypen und -systeme vermischt vor. Dabei handelt es sich sowohl um die Gerätealtbatterien, die direkt und unsortiert von den Verbrauchern zurückgenommen wurden, als auch um die aus Elektro- und Elektronikaltgeräten ausgebauten Batterien aus den Entsorgungsfachbetrieben. Für die weiteren Verwertungsschritte ist eine Sortierung der verschiedenen Batterietypen bzw. eine Aussortierung der hier betrachteten NiMH-Batterien notwendig.

In einem ersten Schritt werden die gesammelten Batteriemengen dazu von Verunreinigungen wie beispielsweise Plastiktüten, Papier, elektronischen Bauteilen, Draht und Kunststoffumhüllungen befreit und in folgenden Schritten weitersortiert (Heegn 2004; Rentz et al., 2001; Knudsen & Nowak, 2008). Die Sortierung übernehmen in Deutschland halb automatische Sortierbetriebe, wie

beispielsweise die Batteriesortieranlage der Redux Technology GmbH in Bremerhaven. Hier werden die Gerätebatterien zunächst von Hand vorsortiert, um Verunreinigungen und Batteriepacks abzutrennen. Im Anschluss erfolgen zwei automatische Sortierverfahren: das elektromagnetische Verfahren und das Röntgenverfahren. Das elektromagnetische Verfahren identifiziert mithilfe eines elektromagnetischen Sensors das System magnetischer Rundzellen. Es basiert auf der unterschiedlichen Störung eines Magnetfeldes durch die verschiedenen elektrochemischen Systeme und ist mit einem Auswurfmechanismus gekoppelt. Die Sortierreinheit wird mit 98 % angegeben (Martens 2011, GRS 2012). Beim Röntgenverfahren werden die Rundzellen durch einen Röntgensensor geleitet, der anhand der Graustufung im Röntgenbild das jeweilige Batteriesystem erkennt (GRS, 2012). Die Sortierreinheit liegt hier bei 99 % (Redux Technology GmbH 2012).

Industriebatterien bedürfen dagegen keiner separaten Sortierung. Sie werden von den Herstellern und Händlern nach chemischen Systemen getrennt gesammelt und liegen damit sortenrein vor. Damit ergeben sich für die Sortierung bei Industriebatterien keinerlei Verluste (ZVEI, 2012).

Aufbereitung und Rückgewinnung

Seit 2011 schreibt das Batteriegesetz Verwertungsquoten von mindestens 50 % vor. Für Blei-Säure-Batterien und Nickel-Cadmium-Batterien liegen diese Verwertungsquoten mit 65 % (bei maximaler Verwertung des Bleis) beziehungsweise 75 % sogar noch höher. Diese Quote erreicht das Recycling von NiMH-Batterien bisher ausschließlich durch die Rückgewinnung der Hauptbestandteile Eisen und Nickel. Beide fließen anschließend in die Stahlproduktion ein, Eisen als Rohstoff und Nickel als Legierungselement in der Stahlveredelung. Die in den NiMH-Batterien enthaltenen Seltenen Erden gehen dabei im Stahl oder in der Schlacke gebunden ungenutzt verloren (Martens 2011; Rombach et al. 2008). Dies gilt auch für den Teil der Batterien, der nach erfolgreicher Sammlung und Sortierung in andere EU-Staaten exportiert wird, um in den dortigen Recyclinganlagen verwertet zu werden (ERP, 2012). Die Verlustrate für Seltene Erden auf der zusammengefassten Prozessstufe für Aufbereitung und Recycling liegt damit bei 100 %.

Zusammenfassung der Materialverluste und Optimierung der Entsorgungskette

Entsprechend den obigen Ausführungen lässt sich sagen, dass bezüglich der Entsorgungssituation von NiMH-Batterien deutliche Unterschiede zwischen Geräte- und Industriebatterien festzustellen sind, welche sich insbesondere bei der Sammlung zeigen. Bei beiden Batteriearten kommt es jedoch im Rückgewinnungsschritt zu einem vollständigen Verlust der enthaltenen Seltenen Erden, wodurch sich für die Ist-Situation jeweils ein hundertprozentiger Verlust für die gesamte Entsorgungskette ergibt.

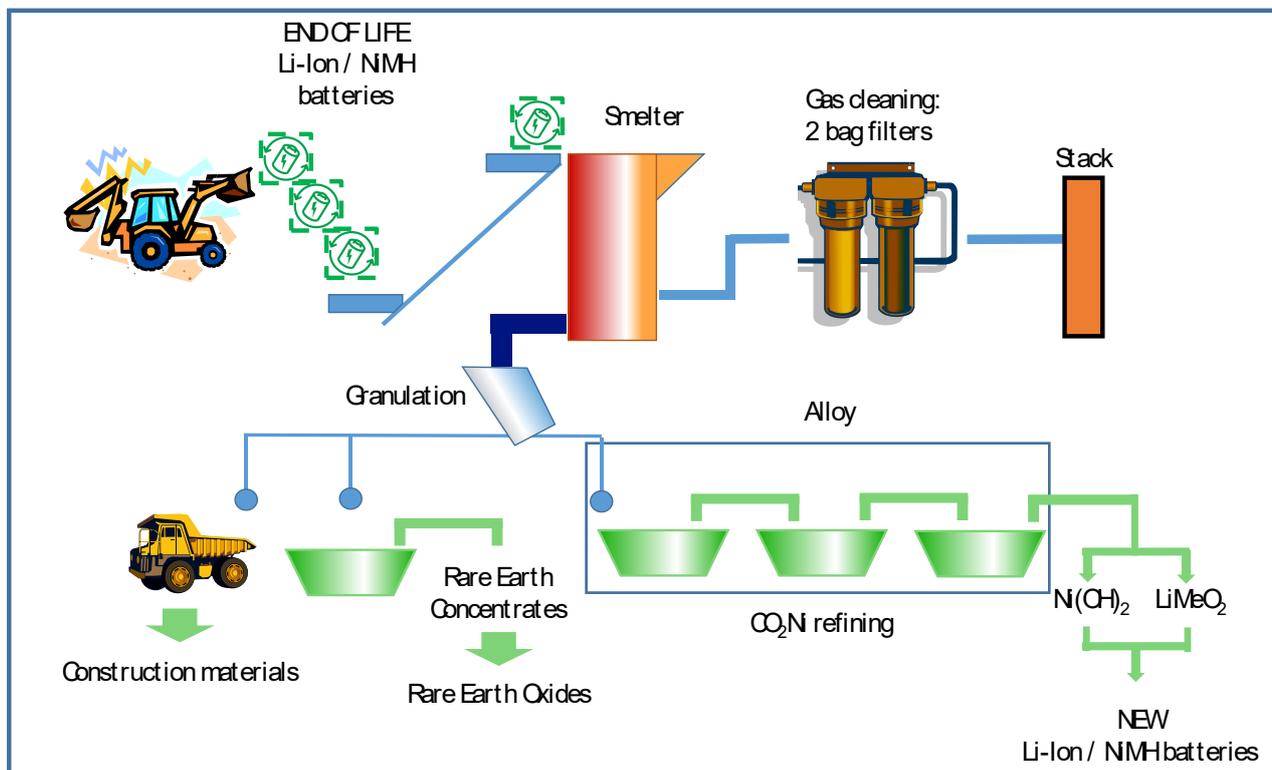
Eine Optimierung der Entsorgungskette muss im Wesentlichen an zwei Stellen ansetzen, der Sammlung sowie der Aufbereitung und Rückgewinnung. Die Sortierung hingegen erfolgt bereits weitgehend verlustfrei.

Eine Optimierung von Aufbereitung und Recycling erscheint aufgrund bereits existierender oder in der Entwicklung befindlicher Verfahren als vergleichsweise problemlos realisierbar. Hier lassen sich beispielsweise die im Technologiescreening genannten Verfahren der Treibacher Auermet Produktionsgesellschaft, das Verfahren von Umicore mit Weiterverarbeitung bei Rhodia und das Verfahren der Mitsui Metal Mining Co. nennen.

Das auf patentierter Ultra-High-Temperature-(UHT)-Schmelztechnologie basierende Umicore-Verfahren Val'Eas® dient beispielsweise zur Verwertung von Li-Ion- und NiMH-Akkumulatoren (Geräte- und Industriebatterien). Dabei konnte die betreffende Batterierecyclinganlage in Hobo-

ken bei Antwerpen anfangs lediglich Nickel und Kobalt zurückgewinnen. Lithium und Seltene Erden gingen auch hier in der Schlacke gebunden verloren. Mittlerweile ist Umicore allerdings in der Lage, auch Lithium sowie ein Seltenerd-Konzentrat zurückzugewinnen. Letzteres wird seit 2012 von Rhodia in dessen Anlage im französischen La Rochelle zu Seltenerd-Mischmetall weiterverarbeitet. Das zugehörige schematische Verfahrensfließbild zeigt die folgende Abbildung.

Abbildung 62: Verfahrensfließbild der Batterierecyclinganlage von Umicore in Hoboken, Belgien



Quelle: Umicore Precious Metals Refining 2013

Ebenfalls für das Recycling von NiMH-Batterien geeignet, aber industriell noch nicht umgesetzt, sind das Aufbereitungsverfahren der Loser Chemie GmbH, bei dem die Seltenen Erden durch vollständiges Auflösen in Säure zurückgewonnen werden, und das RWTH-UVR-Verfahren der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und der UVR-FIA GmbH. Letzteres stellt eine gemeinsam entwickelte Verfahrenstechnologie dar und ermöglicht die Rückgewinnung von Kobalt und Seltenen Erden aus NiMH-Alt-Batterien durch die Kombination mechanischer, pyrometallurgischer sowie hydrometallurgischer Verfahrensschritte. Dazu werden die NiMH-Batterien in einer Hammermühle zerkleinert und aufgeschlossen. Wegen der möglichen Wasserstofffreisetzung und der damit verbundenen Gefahr der Knallgasdetonation erfolgt dieser Prozessschritt in einer sensorüberwachten Atmosphäre. Die anschließende Nasssiebung bei 0,5 Millimeter trennt Stahlblech, Elektroden, Kunststoffe und Papier ab, während die wertvollen Komponenten Nickel, Kobalt und Seltene Erden in der Feinfraktion zurückbleiben. Diese wird unter Zugabe spezieller Schlackenbildner im Lichtbogenofen zu einer Nickel-Kobalt-Legierung sowie einer Schlacke umgeschmolzen, in der sich die Seltenen Erden bereits zu 85 % angereichert haben (Vest et al. 2010).

Die Angaben zur Rückgewinnungsraten Seltenen Erden aus den verschiedenen Verfahren bewegen sich zwischen 70 % und 80 %, weshalb bzgl. des Rückgewinnungsschritts von zukünftig deutlich

geringeren Verlusten ausgegangen werden kann. Zu erwähnen ist hierbei jedoch, dass die Verfahren teilweise außerhalb der Systemgrenzen, das heißt außerhalb der Bundesrepublik Deutschland, stattfinden. Die entsprechenden Materialströme gehen hierbei über die Systemgrenzen hinaus, werden aber aller Voraussicht nach in den Metallkreislauf zurückgeführt. Entsprechend der Ausführungen im Abschnitt 6.2.1 zur methodischen Herangehensweise werden diese Materialströme daher nicht als Verluste gewertet.

Eine Optimierung der Sammlung ist bei Verlusten von bis zu 80 % insbesondere bei Gerätebatterien notwendig, aber auch bei Industriebatterien mit Verlusten von bis zu 44 % in Sammlung ist Handlungsbedarf für eine weitere Optimierung erkennbar. Probleme ergeben sich hierbei durch die sich der ohnehin langen Nutzungsdauer anschließende Hortung (vgl. Produktanalyse in Kapitel 5.3; Al-Thyabat et al. 2013; Müller und Friedrich 2006), den Verbleib von Batterien in den Geräten sowie die teilweise falsche Entsorgung einzelner Batterien (siehe Ausführungen zur Ist-Situation). Auch wenn bereits diverse Rücknahmesysteme bestehen, sind hier weitere Optimierungen notwendig, um sicherzustellen, dass die Batterien am Lebensende auch über diese entsorgt werden.

In der folgenden Tabelle sind die Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von NiMH-Batterien für die Ist-Situation und die optimierte Entsorgungskette zusammengefasst. Für die Sammlung in der optimierten Entsorgungskette wurde hierbei eine Reduktion der Verluste um rund 50 % auf 40 % für Gerätebatterien und 20 % für Industriebatterien angenommen. Da die Basisdaten zu den Mengenströmen (siehe Kapitel 5.3) nicht zwischen Geräte- und Industriebatterien unterscheiden, ist eine Quantifizierung der in der optimierten Entsorgungskette auftretenden Verluste nur eingeschränkt möglich. Zur Quantifizierung wurde hierbei ein konservatives Vorgehen auf Basis der Verlustraten der Gerätebatterien gewählt.

Tabelle 211: Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von NiMH-Batterien

	Batterietyp	Sammlung	Sortierung	Aufbereitung & Rückgewinnung	Gesamtverluste	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	Gerätebatterien	77-80 %	2 %	100 % SE	100 % SE	187-303 t SE
	Industriebatterien	32-44 %	0 %	100 % SE	100 % SE	
Optimierte Entsorgungskette	Gerätebatterien	50 %	2 %	20-30 % SE	60-65% SE	max. 112-197 t SE
	Industriebatterien	20 %	0 %	20-30 % SE	36-44% SE	

6.2.3.8 Poliermittel

Die Produktanalyse untersuchte Poliermittel der optischen Industrie, die Ceroxid und Lanthanoxid enthalten (siehe Kapitel 5.3). Diese Poliermittel finden in der Herstellung optischer Produkte wie Linsen und Prismen Anwendung.

Bei den anwendenden Betrieben fallen die Poliermittel bzw. -schlämme als Abfall in der Produktion an und werden zunächst getrennt gesammelt (Hartmann 2013b, Ladwig 2013, Hamm 2013a; Tanaka et al. 2012). Im weiteren Verlauf der Entsorgungskette findet jedoch eine Vermischung mit anderen Abfällen desselben Abfallschlüssels (10 11 13 bzw. 10 11 14) statt (Pehlken 2013). In den weiteren Schritten der Entsorgungskette erfolgt keine Rückgewinnung von Cer und Lanthan. Laut Tanaka et al. (2012) werden SE-haltige Poliermittelabfälle meist deponiert, Recyclingaktivitäten für Seltene Erden aus Poliermitteln gibt es in nennenswertem Maßstab bisher nicht

(Tanaka et al. 2012; Xu und Peng 2009). Obwohl die betroffenen Firmen Optionen für das Recycling dieser Schlämme, bzw. der enthaltenen Seltenen Erden untersuchen (Hartmann 2013; Ladwig, 2013; Hamm 2013b), wurden diese bisher vor allem wegen der fehlenden Rentabilität nicht umgesetzt. Spectaris (Ladwig 2013) hat aus diesem Grund 2010 das Industriekonsortium „Seltene Erden“ gegründet, welches sich im Hinblick auf die Polierschlämme mit den Themen Substitution, Recycling und Effizienzsteigerung befasst.

EoL-Poliermittel weisen prinzipiell eine sehr gute Eignung zur Rückgewinnung auf und ein Interesse der Industrie an einem funktionierenden Recyclingsystem wird als gegeben beschrieben (Hamm 2013a; Hartmann 2013b; Ladwig 2013b). Durch die nahezu vollständige Erfassung bzw. Sammlung durch die Nutzer ist eine Grundvoraussetzung zu einer Rückgewinnung bereits erfüllt (vgl. auch Tanaka et al. 2012). Durch die Vermeidung der Vermischung mit anderen Abfällen ließen sich ebenfalls Voraussetzungen für eine Rückgewinnung in den folgenden Schritten der Entsorgungskette schaffen. Herausforderungen bestehen weiterhin in der eigentlichen Materialrückgewinnung. Die „gebrauchten“ bzw. end-of-life Poliermittel sind je nach Nutzung unterschiedlich verunreinigt. Die folgende Tabelle zeigt Beispiele für die mögliche Zusammensetzung der SE-haltigen Poliermittel vor und nach dem Gebrauch.

Tabelle 212: Zusammensetzung Poliermittel - vor und nach Gebrauch

Bestandteil	Zusammensetzung Poliermittel-neu (Gew.-%)	Zusammensetzung Poliermittel-EoL (Gew.-%) (Kato et al. 2000)	Zusammensetzung Poliermittel-EoL (Gew.-%) (Xu und Peng 2009)
La ₂ O ₃	34,2	17,8	0-35
CeO ₂	43,8	22,1	50-99
Pr ₆ O ₁₁	3,4	2,3	0-5
Nd ₂ O ₃	10,9	5,1	0-15
BaO	2,62	0,67	~2,0
SiO ₂		12,6	<0,5
Al ₂ O ₃		24,8	~1,5

Quelle: Kato et al. 2000; Xu und Peng 2009

Für die Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden gibt es diverse Verfahrensansätze (siehe Technologiescreening sowie Xu und Peng 2009; Tanaka et al. 2012; Kim et al. 2011; Moon et al. 2011). Diese Verfahren zeigen eine mögliche Materialrückgewinnung bei neuwertigen Poliermitteln von bis zu 99 % (Tanaka et al. 2012). Bei gebrauchten (EoL) Poliermitteln sind die Rückgewinnungsquoten jedoch deutlich geringer und werden für verschiedene Verfahren und Verunreinigungen des Ausgangsmaterials mit 28 bis 74 % angegeben. Zwar scheint der Einsatz dieser Verfahren bisher nicht wirtschaftlich zu sein, aber auch im Vergleich zu anderen SE-Abfallströmen wird die Rückgewinnung von SE aus Poliermitteln als prinzipiell machbar und technisch vergleichsweise einfach umsetzbar (vgl. Tanaka et al. 2012) eingeschätzt.

Die folgende Tabelle 213 fasst die Materialverluste entlang der Entsorgungskette für die Ist-Situation und die optimierte Entsorgungskette zusammen.

Tabelle 213: Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Poliermitteln

EOL-Poliermittel	Sammlung	Sortierung	Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	<1% (zu vernachlässigen)	-	100% (Ce, La)	100% (Ce, La)	70-102 t Ce 1,2-5,5 t La
Optimierte Entsorgungskette	<1% (zu vernachlässigen)	-	28% - 72%	30% - 72%	21-73 t Ce 0,4-3,9 t La

6.2.3.9 Laseranwendungen

Die Produktanalyse untersuchte Er:YAG Laser, welche in der Medizintechnik angewendet werden, aufgrund ihrer Relevanz für Erbium und Yttrium, die sich in den Laserkristallen finden (siehe Kapitel 5.3).

Derzeit existieren keine speziellen Sammelsysteme für Laserstäbe. Inwieweit eine Rücknahme gebrauchter Laser durch die Hersteller erfolgt und in welchem Umfang eine Wiederverwendung gebrauchter Laserstäbe in Neugeräten stattfindet, ist unklar. Anfragen bei den in der folgenden Tabelle genannten Herstellern bzw. Vertriebsfirmen von Lasern ergaben keine entsprechenden Erkenntnisse.

Tabelle 214: Kontaktierte Hersteller bzw. Vertriebsfirmen von Lasern

Firma	Beschreibung
Laserunion	Dachgesellschaft von Laserproduzenten und -vertriebsfirmen
Pantec Biosolutions	Hersteller diverser medizinischer Produkte, u.a. von Lasern
MLT GmbH	Hersteller medizinischer Laser
intros Lasertechnik	Hersteller und Vertriebsfirma für medizinische Laser
Xiomedics	Medizintechnikunternehmen, Hersteller u.a. von medizinischen Lasern

Der einzige identifizierte Abnehmer von EoL Laserstäben ist das Forschungsinstitut für mineralische und metallische Werkstoffe - Edelsteine/Edelmetalle - GmbH (FEE), gleichzeitig der größte und nahezu einzige deutsche Laser-Kristallzüchter. Der Geschäftsführer des FEE bewertet das Rückgewinnungspotenzial von Neodym und Erbium aus Laserstäben als eher uninteressant, vor allem wegen der sehr geringen Mengen je Laserstab und der nahezu unbegrenzten Lebensdauer (Ackermann 2013). Daher werden beim FEE Laserstäbe zurückgenommen und gelagert, bis ein ökonomisch rentables Recyclingverfahren verfügbar wird. Interessant könnte hingegen das Recycling von Erbium und Yttrium aus dem Überschuss-Material sein, welches beim Ausbohren der Laserstäbe aus dem Kristall anfällt und bisher nicht verwendet wird. Das FEE sammelt dieses Material bisher ebenfalls und lagert es ein. Die bis heute akkumulierte Gesamtmenge schätzt das FEE auf ca. 300 kg (Ackermann 2013). Dabei handelt es sich jedoch um eine sehr heterogene Mischung aus nicht-dotiertem Material und unterschiedlich dotiertem Material. Für die Zukunft wäre eventuell denkbar das Überschuss-Material der Erbium-dotierten Kristalle gesondert zu behandeln (Ackermann 2013). Bisher sind allerdings keinerlei Rückgewinnungsverfahren verfügbar (vgl. Binnemans et al. 2013a; Graedel et al. 2011a). Binnemans et al. (2013a) stellen zudem fest, dass auch die Entwicklung von Recyclingsystemen für die Rückgewinnung Seltener Erden aus Laserkristallen aufgrund der geringen Volumina wenig sinnvoll sei.

Wie in der Produktanalyse beschrieben, zeigen die Laserstäbe jedoch auch nach Ende der durchschnittlich rund 40 jährigen Produktverweildauer keine Verschleißerscheinungen etc., sodass prinzipiell eine Möglichkeit zur Wiederverwendung in neuen Produkten besteht. Da gebrauchte Laserstäbe auch gehandelt werden, ist davon auszugehen, dass eine Wiederverwendung zumindest in eingeschränktem Umfang stattfindet (Ackermann 2013).

Trotz der schlechten Datenlage bezüglich der Entsorgung der betrachteten Laseranwendungen ist davon auszugehen, dass es entlang der Entsorgungskette zu einem vollständigen Verlust der hier relevanten strategischen Metalle kommt. Eine Optimierung der Entsorgungssituation bezüglich der Rückgewinnung der enthaltenen Seltenerdmetalle wird auf Basis der recherchierten Informationen mittelfristig als unwahrscheinlich eingeschätzt. Inwieweit die Wiederverwendung über das derzeitige Maß hinaus ausgeweitet werden könnte, lässt sich auf Basis der ermittelten Informationen nicht einschätzen. Die folgende Tabelle beschränkt sich entsprechend auf die Darstellung der Ist-Situation.

Tabelle 215: Materialverluste entlang der Entsorgungskette von Laseranwendungen

Variante	Sammlung/ Sortierung	Aufbereitung, Rückgewinnung	gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	-	(100%)	100%	14 kg Er 8 kg Y

6.2.3.10 Windenergie

Windenergieanlagen (WEA) haben mit rund 20 Jahren eine vergleichsweise lange Lebensdauer. Entsprechend werden derzeit in erster Linie in den frühen neunziger Jahren installierte Anlagen zurückgebaut. Die Zahl der bis 2013 zurückzubauenden Anlagen der ersten Generation wird unter Annahme einer festen Nutzungsdauer von 20 Jahren auf rund 1.000 Anlagen geschätzt (o. A. 2013). Unter diesen Anlagen finden sich jedoch keine der hier relevanten direkt angetriebenen Anlagen mit Permanentmagneten. Auch in Bezug auf 2020 ist - wie in der Produktanalyse (siehe Kapitel 5.3) gezeigt - die Anzahl der relevanten Anlagen zur Entsorgung vergleichsweise gering. Erfahrungen mit der Entsorgung bzw. dem Recycling dieser Anlagen und der Rückgewinnung strategischer Metalle gibt es entsprechend bisher nicht.

Daher werden im Folgenden allgemeine Aspekte der Entsorgung bzw. des Rückbaus von Windenergieanlagen beschrieben und unter Bezug auf die Ausführungen zur Entsorgung von Permanentmagneten in Abschnitt 6.2.3.22 möglicher zukünftige Optimierungen diskutiert.

Gesetze, Verordnungen oder Normen, welche direkt die Entsorgung von WEA regeln, existieren nicht (Seiler 2010). Herstellereigene Rücknahmesysteme gibt es nicht (Seiler 2013). Die Anlagenhersteller sind zum großen Teil der Auffassung, dass die Verantwortung für die Entsorgung beim Betreiber liegt (Seiler 2010/2013; Seiler et al. 2011), wobei die beiden größten Hersteller (Enercon und Vestas) eigene Anlagen zurücknehmen bzw. zurückkaufen, überholen und als Secondhandanlagen wieder verkaufen (Seiler 2010). So hat Enercon beispielsweise in 2012 rund 100 alte E-40 und E-44 generalüberholt und wieder verkauft (Hoormann 2013). Rademaker et al. (2013b) geben für Repoweringanlagen (Anlagen, die im Rahmen des Repowering zurückgebaut wurden) eine Wiederverwendungsrate von 80 % an. Zum einen bedeutet dies eine Verlängerung der Verweildauer, sodass eventuelle Mengen strategischer Metalle später anfallen. Zum anderen ist die Wiederverwendung häufig mit einem Export verbunden, sodass die Anlagen später nicht in Deutschland zur Verwertung anfallen (Hoormann 2013) und somit außerhalb der für das Projekt

festgelegten Systemgrenzen einer Verwertung zugeführt werden. Inwieweit jedoch nach einer eventuellen zweiten Nutzungsphase außerhalb Deutschlands eine Kreislaufführung der strategischen Metalle stattfinden wird, lässt sich aufgrund des langen betrachteten Zeitraums bislang nicht abschätzen. Je nach zukünftiger Preisentwicklung von Permanentmagneten und relevanten SE dürften ökonomische Anreize hierbei eine Rolle spielen.

Generell lässt sich sagen, dass bei der Sammlung (bzw. dem Rückbau) keine nennenswerten Verluste auftreten. Die Möglichkeit der Entsorgung über nicht vorgesehene Wege (wie bei anderen Produkten wie Batterien bspw. durch den Hausmüll) ist hier weitgehend auszuschließen. Auch Rademaker et al. (2013a) gehen von einer 100-prozentigen Sammlungsrate aus. Der Rückbau gestaltet sich im Allgemeinen so, dass die Anlage mithilfe eines Krans Stück für Stück demontiert und abtransportiert wird. Zunächst erfolgt die Trennung der Blätter von der Nabe, anschließend werden Nabe und Gondel demontiert, bevor der Rückbau des Turms erfolgt (BWE 2013b). Bei Anlagen, die nicht aufbereitet, sondern endgültig entsorgt werden, wird für die Stahl-, Kupfer- und Aluminiumanteile eine hohe Recyclingquote von 80 bis 90 % berichtet (BWE 2013b, Seiler 2010).

Während bei der Sammlung also nur vernachlässigbare Verluste festzustellen sind, ist es unklar, wie genau die Verluste in den folgenden Schritten Sortierung, Aufbereitung und Recycling aussehen. Es kann als wahrscheinlich angesehen werden, dass zukünftig eine gezielte Entnahme und Rückgewinnung der Permanentmagnete erfolgen wird. Bezogen auf die Ist-Situation ist jedoch mit Blick auf die derzeitigen EoL-Recyclingquoten Seltener Erden von vollständigen Materialverlusten auszugehen.

Während die Sammlung also als bereits weitgehend optimiert angesehen werden kann, bieten die folgenden Schritte in der Entsorgungskette der Permanentmagnete Raum für Optimierung. Unter Annahme einer Wiederverwendung der enthaltenen Permanentmagnete, wie von Binemans et al. (2013a) (vgl. Abschnitt 6.2.3.22) als beste Lösung für Windenergieanlagen beschrieben, lassen sich auch die Verluste in den folgenden Schritten als vernachlässigbar einstufen. Unter Annahme einer Rückgewinnung der enthaltenen Seltener Erden ist, wie in Abschnitt 6.2.3.22 beschrieben, von Verlusten von etwa 5 % auszugehen. Eine Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette in der Ist-Situation sowie in der optimierten Entsorgungskette findet sich in der folgenden Tabelle.

Tabelle 216: Materialverluste entlang der Entsorgungskette von getriebelosen Windenergieanlagen

Variante	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	zu vernachlässigen	100%	100%	1.308-4.470 kg Nd 119-409 kg Dy 3-11 kg Tb
Optimierte Entsorgungskette- Wiederverwendung	zu vernachlässigen	zu vernachlässigen	zu vernachlässigen	zu vernachlässigen
Optimierte Entsorgungskette - SE Rückgewinnung	zu vernachlässigen	5%	5%	65-224 kg Nd 6-20 kg Dy 0,2-0,6 kg Tb

6.2.3.11 Medizintechnische Geräte: MRTs und Röntgengeräte

Wie in der Produktanalyse (siehe Kapitel 5.3) beschrieben, sind hier solche MRT-Systeme relevant, die Permanentmagnete enthalten. Diese beinhalten die Seltenerdmetalle Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium. In Röntgengeräten hingegen ist Gadolinium das relevante strategische Metall.

Die Sammlung bzw. Erfassung von Altgeräten erfolgt meist direkt über die Hersteller bzw. Anbieter. Die bedeutendsten Hersteller Philips Healthcare und Siemens Healthcare nehmen gebrauchte Geräte zurück, unterziehen sie einer Generalüberholung und bieten sie als Second-hand-Geräte wieder zum Verkauf an (Philips Healthcare 2005; Siemens Healthcare 2013; Siemens medical 2007). Der Hersteller GE-Healthcare verleast Geräte, anstatt sie zu verkaufen, sodass diese nach ihrer Gebrauchsphase wieder an den Hersteller zurückgehen (Metz, 2013). Diese drei genannten Hersteller decken gemeinsam zwischen 75 % und 85 % des Weltmarktes ab (Magnetica o.J.).

Neben den genannten herstellereigenen Rücknahmesystemen gibt es von den Herstellern unabhängige Anbieter, die Anwendern alte Geräte abkaufen und Abbau und Abtransport übernehmen. Hier sind beispielsweise die Firmen Agito Medical, Lennox Transport, Glomeditrans und BDS-Büschler zu nennen. Agito Medical kauft beispielsweise alte Geräte auf, arbeitet diese auf und bietet sie erneut zum Verkauf an. Die Außerbetriebnahme und Verwertung von MRT-Magneten werden explizit als Teil der angebotenen Leistungen hervorgehoben. Die Firma Lennox Transport fokussiert eher auf die logistischen Aspekte und übernimmt Demontage und Abtransport von Röntgenanlagen, MRTs, CTs etc. sowie auf Wunsch auch die Entsorgung (Lennox Transport GmbH 2013).

Der Absatz wiederaufbereiteter Altgeräte erfolgt teilweise international, sodass die Geräte nicht in Deutschland oder Europa entsorgt werden (Glomeditrans 2013). Statistiken über den Umfang gibt es jedoch nicht.

Insgesamt kann entsprechend von einer vergleichsweise gut funktionierenden Sammlung von Altgeräten ausgegangen werden. Insbesondere da für die Anwender ein ökonomischer Anreiz zur Rückgabe von Altprodukten besteht und die Hersteller Rücknahmesysteme eingerichtet haben bzw. die Geräte im Leasing-Fall ohnehin an die Hersteller zurückgehen, werden die Verluste für den Schritt der Sammlung als gering eingeschätzt. Aufgrund der reinen Größe und Masse der Ge-

räte erscheinen alternative Entsorgungen als über die genannten Entsorgungswege zudem unwahrscheinlich. Konkrete Zahlen sind hierzu nicht verfügbar. In Huisman et al. (2008) wird zwar für medizinische Geräte („medical devices“) eine Sammelquote von 49,7 % angegeben, diese bezieht sich jedoch neben den hier relevanten MRTs und Röntgengeräte auf diverse andere Geräte wie Dialyseausrüstung, Herzlungenmaschinen, Laborausrüstung etc. (Huisman et al. 2008). Die Sammlungsrate für MRTs und Röntgengeräte wird mit 75 - 85 % deutlich höher eingeschätzt.

Für Altgeräte, die entsorgt werden sollen, bestehen herstellereigene Recyclingcenter. So hat beispielsweise Philips 2009 am Standort Hamburg-Fuhlsbüttel ein Retouren- und Recycling-Center errichtet, in dem Materialien aus alten Geräten repariert werden (Philips 2009). Es sind jedoch keine Informationen verfügbar, welche Materialien dies im Einzelnen sind und welche Rückgewinnung aus den Fraktionen erfolgt - entsprechende Anfragen blieben ohne Ergebnis.

Laut Angerer et al. (2009) werden 93 % des Gewichts gebrauchter MRTs stofflich verwertet. Aufgrund fehlender großtechnischer Recyclingmöglichkeiten für SE-Magnete kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um nicht-ReStra-relevante Materialien handelt, und von einem vollständigen Verlust der ReStra-Metalle in der Entsorgungskette, vor allem in die Schlacken des Stahlrecyclings, ausgegangen werden muss.

Derzeit bestehen keine Rückgewinnungsmöglichkeiten von Gadolinium aus Röntgengeräten. Planungen, solche Verfahren bis zum ReStra-Bezugsjahr 2020 zu etablieren sind nicht bekannt (Philips 2016, Siemens 2016, eds-r 2016).

Für die optimierte Entsorgungskette wird zunächst aufgrund der Anfallstruktur von Altgeräten und den Erfassungssystemen eine Reduzierung der Verluste in der Sammlung auf 10 % angenommen. Derzeit sind diverse Verfahren zur Rückgewinnung der Seltenen Erden aus Magneten in der Entwicklung. Verluste von <5 % sind hierbei erreichbar.

Die folgende Tabelle stellt die auftretenden Verluste in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette in der Übersicht dar.

Tabelle 217: Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette medizintechnischer Geräte

Variante	Produkt	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	MRTs	<25% (pessimistisch)	100% SE	100% SE	922-4.898 kg SE
	Röntgengeräte	<25% (pessimistisch)	100%	100% Gd	24-25 kg Gd
Optimierte Entsorgungskette	MRTs	10%	5%	14,5% SE	134-710 kg SE
	Röntgengeräte	10%	100% Gd	100%	24-25 kg Gd

6.2.3.12 Brennstoffzellen

Im Bereich der Brennstoffzellen wurden Festoxidkeramik-Brennstoffzellen (solid oxide fuel cells, SOFC) in der Produktanalyse (siehe Kapitel 5.3) in Bezug auf die zu erwartenden Mengen strategischer Metalle in 2020 untersucht. Relevante Metalle hierbei sind Yttrium und Lanthan.

Grundsätzlich lässt sich anmerken, dass es sich bei SOFC-Brennstoffzellen um eine sehr junge Technologie handelt und bisher keine nennenswerten Mengen zur Entsorgung anfallen. Entsprechend existieren weder spezifische Sammelsysteme noch erprobte Recyclingverfahren (vgl. Technologiescreening). Je nach Anwendungsgebiet fallen Brennstoffzellen teilweise unter das

ElektroG2, möglicherweise zukünftig auch unter die Altfahrzeugverordnung mit den entsprechend geltenden Quoten für Sammlung und Verwertung (Schiemann et al. 2007).

In SOFC Brennstoffzellen finden sich die relevanten strategischen Metalle im Elektrolyt, das aus yttriumstabilisiertem Zirkonoxid (YSZ) besteht, in der Anode, die aus einem Co-Ni-YSZ Cermet besteht, und der Kathode aus Strontium dotiertem Lanthanmangandioxid (LaMnO_3) (Schiemann et al. 2007).

Sammlung, Sortierung

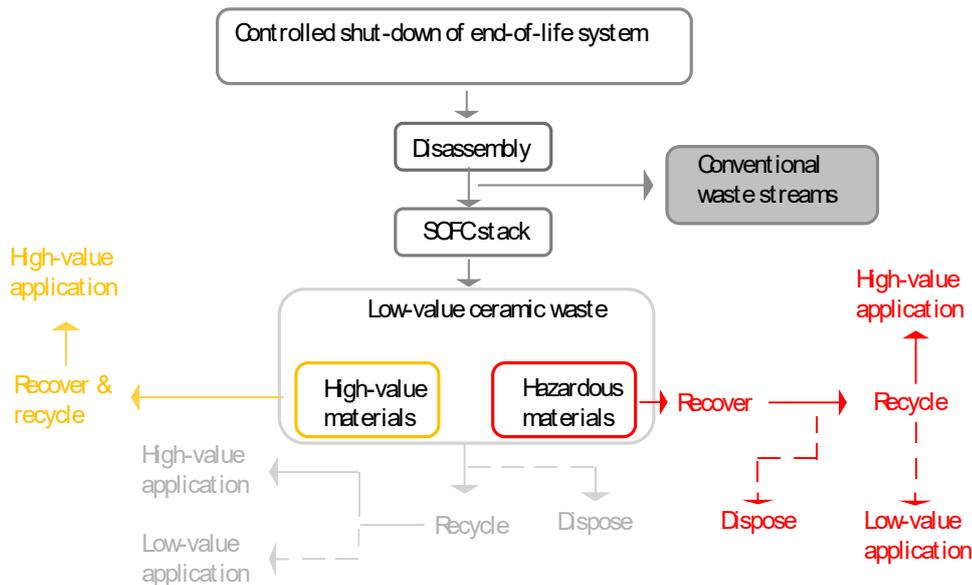
Die Art der Sammlung richtet sich weitgehend nach der Art der Anwendung der Brennstoffzellen. Wie auch in der Produktanalyse (siehe Kapitel 5.3) beschrieben, werden SOFC-Brennstoffzellen derzeit primär zur stationären Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt, während mobile Anwendungen bisher keine Rolle spielen (Nagel 2008). Entsprechend ist das Problem der Entsorgung als Teil von Elektro- und Elektronikgeräten (siehe bspw. Schiemann et al. 2007) für SOFC-Zellen ohne Bedeutung. Die stationäre Nutzung, i.d.R. in BHKWs, weist prinzipiell eine bessere Eignung zur Erfassung bzw. Sammlung auf. Zwar bestehen zum Rückbau speziell von SOFC-BHKWs bisher keinerlei Erfahrungen und entsprechend auch keine Daten zu Sammlung und Sortierung, eine weitgehend verlustfreie Sammlung erscheint aber durchaus möglich. Als grobe Abschätzung werden die zu erwartenden Verluste auf <10 % festgelegt.

Aufbereitung, Rückgewinnung

Im Anschluss an Sammlung bzw. Demontage stehen Aufbereitung und Rückgewinnung als nächste Schritte der Entsorgungskette an. Hier wird die manuelle Zerlegung als wahrscheinlichste Behandlungsweise eingeschätzt (Schiemann et al. 2007). Der Einsatz automatisierter Verfahren wird lediglich für Brennstoffzellen kleinerer Bauart und niedrigen Leistungsbereichs (in mobilen Anwendungen) als realistische Option für die Zukunft eingeschätzt, da hier eher mit Mengenströmen zu rechnen ist, durch die sich entsprechende Verfahren rechnen (Schiemann et al. 2007). Bezüglich der Verwertung heben Schiemann et al. (2007) hervor, dass sich die zukünftige Verwertung auf die Rückgewinnung der enthaltenen „seltene Metalle“, worunter Schiemann et al. auch die hier relevanten Seltenerdmetalle Yttrium und Lanthan verstehen, abzielen sollten. Die prinzipielle Eignung bestehender Verfahren zur Rückgewinnung dieser Metalle aus SOFC-Brennstoffzellen wird hierbei hervorgehoben. Dennoch werden die hohen Energieaufwendungen der Verfahren - insbesondere zur Trennung von Yttrium und Zirkonoxid - sowie fehlende ökonomische Anreize zur Rückgewinnung als Faktoren genannt, die eine tatsächliche Rückgewinnung von Yttrium und Lanthan sehr unwahrscheinlich machen (Schiemann et al. 2007). Mögliche Änderungen könnten sich zukünftig durch steigende Mengenströme sowie Preisänderungen der Metalle ergeben (Schiemann et al. 2007).

Wright et al. (2007) beschreiben eine Recyclingstrategie für SOFC-Brennstoffzellen, die in Abbildung 63 dargestellt ist. Hierbei wird von einer 99 prozentigen Rückgewinnung der hochwertigen Materialien ausgegangen, wobei sich dies in dem beschriebenen Ansatz auf die Nickelrückgewinnung beschränkt. Für die übrigen Fraktionen wird auf die „traditionellen“ metallurgischen Routen verwiesen (Wright et al. 2007). Bezüglich des Recyclings der hier relevanten keramischen Fraktionen wird wie bei Schiemann et al. (2007) der hohe Energieaufwand bei gleichzeitig vergleichsweise geringem Materialwert als Hürde für ein hochwertiges Recycling (Recycling ohne Qualitätsverlust) beschrieben. Als mögliche Verwertungswege wird bspw. der Einsatz als Füllmaterial in der Baubranche genannt (Wright et al. 2007).

Abbildung 63: Recyclingstrategie für SOFC



Quelle: nach Wright et al. 2007

Innerhalb des Untersuchungszeitraums bis 2020 ist nicht zu erwarten, dass Yttrium aus SOFC zurückgewonnen werden kann. Bezogen auf die aktuelle Entsorgungssituation lässt sich zudem auf die von UNEP abgeschätzten end-of-life Recyclingraten von Yttrium und Lanthan von unter einem Prozent hinweisen (Graedel et al. 2011a, 2011b), die verdeutlichen, dass bis dato keine entsprechenden Aktivitäten zu verzeichnen sind. Für die Schritte der Aufbereitung und Entsorgung ist also auch in einer optimierten Entsorgungskette bis 2020 von einem vollständigen Verlust auszugehen.

Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette

Die derzeitige Entsorgung von Brennstoffzellen bewegt sich auf einem sehr geringen Massenniveau, da End-of-Life-Produkte bisher kaum zur Entsorgung anfallen. Bei der derzeitigen Entsorgungspraxis ist von einem vollständigen Verlust der enthaltenen strategischen Metalle auszugehen.

Prinzipiell bestehen für eine Optimierung der Entsorgungskette gute Voraussetzungen in Bezug auf die Schritte der Sammlung und Sortierung, welche bereits weitgehend verlustfrei ablaufen. Hindernisse ergeben sich jedoch in den folgenden Schritten der Entsorgungskette, in Aufbereitung und Rückgewinnung. Wie beschrieben stehen hier bislang keine spezifischen Rückgewinnungsverfahren zur Verfügung, auch wenn - wie das Technologiescreening gezeigt hat - Verfahren zur Yttriumrückgewinnung im Labor- und Pilotmaßstab aus anderen Abfallströmen vorliegen. Zudem gilt die Rückgewinnung von Yttrium und Lanthan als ökonomisch wenig attraktiv, was im hohen Energieaufwand der Rückgewinnung (bezogen auf bestehende Verfahren zur SE-Rückgewinnung) und dem niedrigen ökonomischen Wert insbesondere von Lanthan begründet ist. Analog zur Entsorgungssituation von Hitzeschutzkeramiken (vgl. Abschnitt 6.2.3.5) erscheint eine Rückgewinnung der strategischen Metalle in einer optimierten Entsorgungskette bis 2020 nicht realisierbar, da sich derzeit keine spezifischen Verfahren in der Entwicklung befinden (vgl. Technologiescreening Kapitel 6.1).

Die abgeschätzten Materialverluste sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 218: Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Brennstoffzellen

Variante	Sammlung, Sortierung	Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	<10%	100% (Y, La)	100% (Y, La)	50.186 – 78.152 kg Y 30.767 – 47.770 kg La
Optimierte Entsorgungskette	<10%	keine geeigneten Verfahren	= Ist-Situation	= Ist-Situation

6.2.3.13 Optische Faseranwendungen

Im Bereich der optischen Faseranwendungen wurden zum einen Glasfaserkabel der Telekommunikationsinfrastruktur, die mit Germanium dotiert werden, und zum anderen Erbium-dotierte Faserverstärker als Produkte analysiert.

Die erbiumdotierten Faserverstärker (EDFAs) stellen eine Nischenanwendung dar, für die keine spezifischen Informationen vorliegen. In (Huisman et al. 2008) wird die Sammelquote für Elektroaltgeräte im Bereich IT und Telekommunikation mit 27,8 % angegeben. Dieser Wert wird als Näherung für die untersuchten EDFAs angenommen.

Aktivitäten zur Rückgewinnung von Erbium aus EoL-Produkten sind bisher nicht bekannt (vgl. u. a. Graedel 2011a, 2011b). Aufgrund der geringen Erbiummengen im Produkt sowie der insgesamt aus EDFAs in 2020 zu erwartenden Metallfracht (im Milligrammbereich, siehe Produktanalyse in Kapitel 5.3) ist nicht davon auszugehen, dass es hier im Untersuchungszeitraum durch neue Verfahren zu Veränderungen kommt. Über die gesamte Entsorgungskette ist also von einem vollständigen Verlust des Erbiums auszugehen. Aufgrund der geringen Mengen erscheinen weiterführende Bestrebungen bezüglich einer Optimierung der Entsorgungskette unverhältnismäßig.

Bei Glasfaserkabeln besteht grundsätzlich eine gute Eignung zur Sammlung. Durch die Verlegung in Leer- bzw. Kabelschutzrohren ist die Entnehmbarkeit gegeben und es besteht daher prinzipiell eine gute Eignung zur Sammlung nicht mehr funktionstüchtiger oder benötigter Kabel. Entsprechende Aktivitäten gibt es jedoch bisher nicht, was insbesondere darin begründet liegt, dass bisher kaum Kabel ihr Lebensende erreichen.

Bis dato findet keine Rückgewinnung von Germanium aus EoL-Produkten statt (Graedel 2011a, 2011b). Entsprechend kann für die derzeitige Entsorgungssituation von einem vollständigen Germaniumverlust in der Entsorgungskette ausgegangen werden. Dass es hier bis 2020 zu Änderungen kommt, wird als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt. Im Produktionsprozess von Glasfaserkabeln findet zwar eine Germaniumrückgewinnung statt, die jedoch nur aufgrund der hohen Germaniumkonzentration in der zur Dotierung eingesetzten Lauge rentabel ist (Dammshäuser 2003; Merkel und Friedrich 2010). Im Endprodukt hingegen ist die Konzentration gering, auch im Vergleich zu den für die Primärgewinnung genutzten Erzen. Während einige Mineralien durchaus einen Anteil zwischen 4 und 32 Gew.-% aufweisen können (Höll et al. 2007), haben die für die Primärproduktion relevanten Erze, vor allem Zink-Blei-Erze (Sphalerit/Galenit), einen Gehalt von etwa 0,3% (Bernstein 1985).

Eine Rückgewinnung des Germaniums erscheint demnach eher unwahrscheinlich, solange keine rentablen Recyclingverfahren zur Verfügung stehen. Als sinnvoller kann zumindest für Glasfaserkabel der Telekommunikationsinfrastruktur gegebenenfalls eine Wieder- oder Weiterverwendung angesehen werden. Eine Nutzungsdauer von bis zu 100 Jahren wird als möglich angesehen. Hierdurch ließen sich die Verluste in der Entsorgungskette entsprechend deutlich reduzieren.

Eine Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette findet sich in der folgenden Tabelle.

Tabelle 219: Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette optischer Faseranwendungen

Variante	Anwendung	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	EDFA	27,8%	100%	100%	4 mg Er
	Glasfaserkabel	prinzipiell gute Eignung	100%	100%	1,2-3,4 kg Ge
Optimierte Entsorgungskette	EDFA	27,8%	keine Optimierung aufgrund geringer Mengen	= Ist-Situation	= Ist-Situation
	Glasfaserkabel	prinzipiell gute Eignung	ggf. Wiederverwendung	= Ist-Situation	= Ist-Situation

6.2.3.14 LEDs

Relevant im Projekt ReStra sind (gewerblich genutzte) LED-Anzeigetafeln, andere LED-Anwendungen wurden dem Projekt RePro zugeordnet. LEDs enthalten die ReStra-Metalle Gallium, Indium, Cer, Yttrium und Gold.

Erfahrungen mit dem realen Entsorgungsverhalten der Endverbraucher mit LED-Anzeigetafeln liegen derzeit aufgrund der bisher geringen Mengen und der langen Lebensdauer von LED-Anzeigetafeln nicht vor.

Erfassung

LED-Anzeigetafeln fallen unter das ElektroG2. Eine separate Erfassung ist daher verpflichtend. Sie haben in der Regel einen hohen Metallanteil (oftmals Aluminium) und einen hohen Glasanteil (Frontglas). Der Materialwert dieser Hauptbestandteile wirkt zusätzlich zu den rechtlichen Anforderungen als ökonomischer Treiber für eine separate Erfassung. Da LED-Anzeigetafeln zudem relativ groß sind, kann insgesamt von einer sehr hohen Erfassungsrate in einen separaten Abfallstrom ausgegangen werden.

Behandlung und Rückgewinnung

Das ElektroG2 gibt keine spezifischen Behandlungsanforderungen für LED-Anzeigetafeln vor. Ggf. relevant ist die Anforderung zum Ausbau von Leiterplatten >10 cm² aus der Steuereinheit der Anzeigetafeln. Es erfolgt in der Regel ein Aufschluss durch Zerkleinerung in Schreddern oder langsam laufenden Zerkleinerungsaggregaten. Dabei wird der größte Anteil der LED in die organische oder mineralische Mischfraktion überführt (Cycled 2015). Ein großtechnisches Verfahren zur Separation der LED aus dem Gesamtstrom ist nicht etabliert (Bergamos 2015). Eventuell könne über eine Dichtentrennung eine Aufkonzentrierung bestimmter Fraktionen erreicht werden, in der die LED enthalten sind. Dies ist jedoch derzeit nicht etabliert (Bergamos 2015).

Das Technologiescreening (siehe Kapitel 6.1) zeigt keine Verfahren zum Recycling von ReStra-Metallen aus LED auf. Während beispielsweise für die Rückgewinnung Seltener Erden aus anderen Leuchtmitteln bereits verschiedene Verfahrensansätze existieren, stellt die Rückgewinnung aus LEDs bislang eine Lücke dar (Binnemans et al. 2013a). Thema und Irrekt (2010) und Deubzer (2015) gehen davon aus, dass eine Rückgewinnung der in LED enthaltenen strategischen Metalle auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlich durchführbar ist.

Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette

Bisher sind keine Verfahren zum Recycling (Vorbehandlung, Rückgewinnung) von ReStra-Metallen aus LED etabliert. Eine Veränderung der Situation bis 2020 wird als unwahrscheinlich gesehen (Deubzer 2015). Wesentliche Hemmnisse sind die geringen Konzentrationen der ReStra-Elemente in den Altprodukten bei gleichzeitiger fester Einbindung in die Produktmatrix sowie die geringen erzielbaren spezifischen Erlöse aus den ReStra-Elementen.

Bezogen auf die Ist-Situation ist von einem vollständigen Verlust der enthaltenen strategischen Metalle auszugehen (siehe Tabelle).

Tabelle 220: Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von LED-Anzeigetafeln

Variante	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	<10%	100%	100%	0,14 kg Ga 0,11 kg In 0,03 kg Ce 0,96 kg Y 3,14 kg Au
Optimierte Entsorgungskette	<10%	Keine geeigneten Verfahren bis 2020	= Ist-Situation	-= Ist-Situation

6.2.3.15 Elektrofahrräder (Pedelecs)

Die SE-haltigen Permanentmagnete finden sich in den Motoren der Elektrofahrräder. Von den verschiedenen Typen der Elektrofahrräder fallen Pedelecs, auf die die Produktanalyse in Kapitel 5.3 aufgrund der mengenmäßigen Dominanz fokussiert hat, unter den Geltungsbereich des ElektroG2. Hier sind die Verantwortung für Rücknahme und Verwertung sowie geltende Quoten grundsätzlich geregelt.

Unter den Komponenten von Elektrofahrrädern, die strategische Metalle beinhalten, existieren bisher jedoch nur für Batterien dedizierte separate Sammelsysteme (GRS 2010; Elektrofahrrad24 o.J.; VCD 2010), während eine separate Entsorgung der Permanentmagnete bisher nicht realisiert wird.

Konkrete Erfahrungen bezüglich der Entsorgung von Elektrofahrrädern bestehen bisher kaum, da es sich um ein vergleichsweise junges Produkt handelt. Inwieweit sich wie bei herkömmlichen Fahrrädern ein ausgeprägter Secondhand-Markt entwickelt, dürfte von der Verfügbarkeit der Akkus sowie der Funktionstüchtigkeit der Motoren abhängen. Das ElektroG2 schreibt die getrennte Erfassung über die öffentlich rechtlichen Entsorger (örE) oder herstellereigene Sammelsysteme vor. In der Praxis ist zu erwarten, dass die Elektrofahrräder teilweise auch über die Schrotthändler erfasst werden. Es ist summiert über beide Wege insgesamt von einer nahezu vollständigen Sammlung (>90 %) auszugehen. Für die Bestimmung des Anteils, der über nicht-gesetzeskonforme Wege läuft, steht keine Datengrundlage zur Verfügung. Die Entsorgung über den Hausmüll erscheint nicht zuletzt aufgrund der Ausmaße der Fahrräder unwahrscheinlich. In der Sammlung sind entsprechend kaum Optimierungspotenziale zu erwarten.

Die Rückgewinnung der ReStra-Metalle bzw. des Neodyms aus den Magneten in Elektrofahrrädern würde die manuelle Demontage der Permanentmagnete voraussetzen. Dem Zeitaufwand in der Größenordnung von bis zu 10 Minuten für die Separation des Rotors stünde eine Neodymmenge

von durchschnittlich 150 g gegenüber (siehe Kapitel 5.3). In einer Stunde würden bei diesem Szenario 0,9 kg Magnete als Teil von Rotoren separiert. Legt man einen Neodympreis von 60 EUR pro kg zugrunde und berücksichtigt einen Mitnahmeeffekt aus der gleichzeitigen Demontage der Steuerungselektronik sowie der höheren Erlöse für die gewonnenen reineren Metallfraktionen, ist von einer relativ geringen Differenz zwischen Erlösen und Aufwendungen auszugehen⁶². Derzeit werden keine Erlöse erzielt, wenn Seltenerdmetalle an Verwerter abgegeben werden (siehe auch Kap. 6.6). Es ist entsprechend von einem vollständigen Verlust der enthaltenen strategischen Metalle entlang des Entsorgungsweges auszugehen. In Bezug auf eine Optimierung der Entsorgungskette ist jedoch anzumerken, dass wie in Abschnitt 6.2.3.22 beschrieben, diverse Verfahren zur Separierung von Permanentmagneten mit anschließender Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden in Entwicklung sind. Sollte es zu einer Entnahme der Magnete mit anschließendem Recycling kommen, so sind Verluste in der Größenordnung von 5 % erreichbar. Voraussetzung ist hierfür, wie beschrieben, die Wirtschaftlichkeit der entsprechenden Verfahren bzw. eine Veränderung der rechtlichen Rahmenbedingungen.

Tabelle 221: Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Elektrofahrrädern

Variante	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	<10%	100%	100%	4.768-6.399 kg Nd 1.192-1.600 kg Dy 238-320 kg Tb
Optimierte Entsorgungskette	<10%	5%	14,5%	691-928 kg Nd 173-232 kg Dy 35-46 kg Tb

6.2.3.16 Nabendynamos

Bei Nabendynamos stellt sich die Situation grundsätzlich weitgehend ähnlich dar, wie in Abschnitt 6.2.3.15 für Pedelecs beschrieben. Bezüglich der Sammlung ist von einer weitgehenden Erfassung über Schrotthändler mit vergleichsweise geringen Verlusten (<10%) auszugehen. In den darauf folgenden Schritten findet jedoch derzeit (Ist-Situation) keine Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden statt, weshalb ein kompletter Verlust der enthaltenen strategischen Metalle anzunehmen ist.

Während die Sammlung dementsprechend bereits als weitgehend optimiert angesehen werden kann, ergeben sich für eine optimierte Entsorgungskette in den folgenden Schritten die in Abschnitt 6.2.3.22 skizzierten Möglichkeiten für die Rückgewinnung von Seltenerdelementen aus Permanentmagneten. Sofern sich Entnahme und Rückgewinnung wirtschaftlich darstellen lassen,

⁶² Eine Berücksichtigung der Erlöse durch das höherpreisige Dysprosium kann hier nicht berücksichtigt werden, da nicht bekannt ist, ob bzw. wie die Magnetwerkstoffe in Rückgewinnungsverfahren separiert werden können.

sind anhand der in Entwicklung befindlichen Verfahren Materialverluste von unter 5 % in der Rückgewinnung erreichbar.

Tabelle fasst die Verluste für Ist-Situation und optimierte Entsorgungskette zusammen.

Tabelle 222: Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Nabendynamos

Variante	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	<10%	100%	100%	1.372-1.453 kg Nd 438-464 kg Pr
Optimierte Entsorgungskette	<10%	5%	14,5%	199-211 kg Nd 64-67 kg Pr

6.2.3.17 Raumklimaanlagen

In Raumklimaanlagen werden SE-haltige Permanentmagneten in den Kompressoren eingesetzt. In diesen kommen Neodym, Dysprosium und Terbium zum Einsatz. Es handelt sich bei dieser Raumklimaanlagen-Bauart um ein junges Produkt, das erst ca. im Jahr 2000 eingeführt wurde. Unter den zur Entsorgung anfallenden Raumklimaanlagen wird für das Jahr 2011 der Anteil von Anlagen mit SE-haltigen Permanentmagneten für Japan auf 5 Prozent beziffert, mit Steigerung auf 65 % bis 2020 (Mitsubishi Electric 2013). Für die EU liegt der Anteil etwa halb so hoch (siehe Produktanalyse in Kapitel 5.3; Shah 2013; Riviere et al. 2008). Bisher bestehen also kaum Erfahrungen im Umgang mit entsprechenden EoL-Produkten.

Sammlung

Der Sammlung von Raumklimaanlagen mit anschließender Zuführung zur ordnungsgemäßen Verwertung kommt neben dem Recyclingaspekt auch aufgrund der enthaltenen klimawirksamen Gase eine große Bedeutung zu (UBA 2013; Manhart et al. 2008). Raumklimaanlagen gehören zur Gruppe der Haushaltsgroßgeräte und können an kommunalen Sammelstellen abgegeben werden. Daneben gibt es herstellereigene Rücknahmesysteme, bspw. von Mitsubishi Electric und Hitachi, die nicht auf die eigenen Produkte beschränkt sind, sondern auch für Geräte anderer Hersteller offenstehen (Mitsubishi Electric 2013).

Die Statistiken zur Sammlung von Haushaltsgroßgeräten in Deutschland zeigen Quoten zwischen 36 und 47 Prozent für die Jahre 2006 bis 2010 bezogen auf die in Verkehr gebrachte Menge (siehe bspw. Eurostat 2013). Zusätzlich ist jedoch von Sammelaktivitäten, die nicht in die Statistik eingehen, bspw. über Schrotthändler, auszugehen. Die tatsächlichen Sammelquoten bezogen auf die anfallende Menge von EoL-Produkten dürfte zudem aufgrund des Marktwachstums und der Lebensdauern etwas höher ausfallen. Auch Riviere et al. (2008) schätzen die Sammelquoten bei Raumklimaanlagen als höher ein als bei sonstigem Elektro- und Elektronikschrott.

Vor diesen Hintergrund wird eine Sammelquote von mind. 50 % angenommen.

Sortierung, Aufbereitung, Recycling

Da die Verwendung von Seltenen Erden in den Kompressoren von Raumklimaanlagen wie in der Produktanalyse dargestellt noch relativ neu ist, lassen sich bisher keine Recyclingaktivitäten in Deutschland feststellen, die auf eine Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden abzielen.

In Bezug auf die Ist-Situation ist entsprechend von einem vollständigen Verlust der enthaltenen strategischen Metalle auszugehen.

Insbesondere in Japan, wo eine größere Verbreitung der relevanten Produkte zu beobachten ist, gibt es jedoch bereits entsprechende Aktivitäten. Verschiedene Hersteller von Raumklimaanlagen wie Mitsubishi und Hitachi verfolgen hier Bestrebungen, Zerlege- und Recyclingsysteme, die auf die Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden abzielen, zu etablieren (Mitsubishi Electric 2013; Binnemans et al. 2013a; Hitachi 2010; siehe Ausführungen in Abschnitt 6.2.3.22). So hat beispielsweise Mitsubishi Electric ein automatisiertes Verfahren entwickelt, in dem die Kompressoren zerlegt und anschließend die Magneten entfernt werden. Die entsprechende Zerlegung einer Raumklimaanlage nimmt hierbei 30 Sekunden in Anspruch. Auch Hitachi hat ein eigenes Verfahren zur Zerlegung und Entnahme der Kompressoren aus Raumklimaanlagen entwickelt (Binnemans et al. 2013a; Hitachi 2010).

Informationen bezüglich Rückgewinnungs- bzw. Verlustraten in den Schritten der Sortierung, Aufbereitung und Recycling liegen speziell für Raumklimaanlagen bisher nicht vor. Allgemein wird jedoch die Ähnlichkeit zu den beim Recycling von Festplatten (HDD) in Entwicklung befindlichen Verfahren hervorgehoben. Hier sind in der Materialrückgewinnung prinzipiell Rückgewinnungsraten von bis zu 95 % möglich. Vor diesem Hintergrund wird für die optimierte Entsorgungskette von auf 5 % reduzierte Materialverlusten für die Schritte der Sortierung, Aufbereitung und Rückgewinnung ausgegangen.

Für die Sammlung kann für eine optimierte Entsorgungskette ebenfalls von weiter reduzierten Verlusten ausgegangen werden. Die bezüglich der Ist-Situation angenommenen Verluste von 50 % stellen eine eher konservative Abschätzung dar. Die Ausmaße von Raumklimaanlagen lassen eine Entsorgung über andere Entsorgungswege (bspw. Hausmüll) unwahrscheinlich erscheinen. Zudem existieren, wie beschrieben, bereits herstellereigene Rücknahmesysteme. Aufgrund dieser Aspekte werden für die Skizzierung der optimierten Entsorgungskette Verluste von 25 % angesetzt. Hervorzuheben ist hierbei jedoch, dass wenig quantifizierende Daten zur Erfassung von Raumklimaanlagen verfügbar sind.

Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette

Die abgeschätzten Materialverluste entlang der Entsorgungskette sind für die Ist-Situation sowie die optimierte Entsorgungskette in Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 223: Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Raumklimaanlagen

Variante	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamt Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	~50%	100%	100%	2.036-2.135 kg Nd 509-534 kg Dy 102-107 kg Tb
Optimierte Entsorgungskette	25%	5%	28,75%	585-614 kg Nd 146-154 kg Dy 29-31 kg Tb

6.2.3.18 Schleifkeramiken

Im Bereich der Schleifkeramiken sind solche aus Yttrium-stabilisiertem Zirkondioxid relevant. Auf dem deutschen Markt sind dies in erster Linie bestimmte Produkte der Hersteller Treibacher Schleifmittel GmbH, 3M und Saint Gobain (siehe Produktanalyse in Kapitel 5.3). Die relevanten Y-haltigen Abfälle ergeben sich als Abrieb der Schleifmittel während der Nutzungsphase.

Schleifprozesse finden fast immer unter Einsatz von Kühlschmierstoffen statt, die neben dem Kühlen und Schmieren auch dem Abtransport von Spänen und Schleifmittelabrieb dienen. Daneben erfolgt in vergleichsweise geringem Umfang eine Austragung des Schleifmittelabriebs über Anhaftungen am Werkstück.

Über Filter erfolgt eine Reinigung des Kühlschmierstoffes von den enthaltenen Teilchen, die als Filterkuchen zurückbleiben. Zusätzlich können Magnetabscheider eingesetzt werden, um eine sofortige Trennung der (ferromagnetischen) Späne zu erreichen. Teilweise erfolgt auch eine Reinigung des Kühlschmiermittels durch Zentrifugieren (Klocke und König 2005).

Die Entsorgung der Schleifrückstände erfolgt in Abhängigkeit vom eingesetzten Kühlschmiermittel (wassermischbar oder nicht-wassermischbar) unterschiedlich, die Aufbereitung und das Recycling der enthaltenen SE-haltigen Schleifmittelrückstände spielen hierbei jedoch keine Rolle. Bei nicht-wassermischbaren ölhaltigen Schmierstoffen erfolgt meist eine Ölabscheidung und Abtrennung der Metallspäne, seltener eine thermische Verwertung. Bei wassermischbaren Schmierstoffen erfolgt eine Aufbereitung des noch in den Schleifrückständen enthaltenen Wassers, die Metallspäne werden in der Regel ebenfalls abgetrennt und dem Recycling zugeführt (Klocke und König 2005). Die verbleibenden Schleifrückstände werden entweder thermisch oder nach weiteren Aufbereitungsschritten beispielsweise als Füllmaterial im Straßenbau stofflich verwertet (IHK UMFIS 2013; Groß-Bölting 2012). Entsprechend lässt sich bezogen auf die Ist-Situation von einem vollständigen Verlust des in Schleifmitteln enthaltenen Yttriums ausgehen (siehe Tabelle).

Auch auf längere Sicht scheint es nicht wahrscheinlich, dass es zu nennenswerten Änderungen bzgl. der Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Schleifmittelrückständen kommen wird. Ansatzpunkte für eine Optimierung der Entsorgungskette bestehen kaum. Die fehlenden ökonomischen Anreize, die für andere Y-Anwendungen bestehen (Schiemann et al. 2007), gelten hier ebenso. Zudem ist der Einsatz von Yttrium in Schleifmitteln besonders dissipativ, was den Aufwand für

Separierung, Erfassung und Rückgewinnung enorm erhöht. Umgekehrt bestehen starke ökonomische Anreize für eine Beibehaltung der derzeitigen Entsorgungssituation, welche auf eine Verwertung der dominierenden Massenströme, des Kühlschmiermittels und der Späne, abzielt.

Tabelle 224: Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette yttriumhaltigen Schleifmitteln

Variante	Sammlung	Sortierung, Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	<5% (Schätzung, Verluste nur über Anhaftung am Werkstück)	100%	100%	25-2.160 kg Y
Optimierte Entsorgungskette	<5% (Schätzung, Verluste nur über Anhaftung am Werkstück)	keine geeigneten Verfahren	= Ist-Situation	= Ist-Situation

6.2.3.19 Absorbermaterial und Kontrollstäbe in Kernreaktoren

Absorbermaterial und Kontrollstäbe in Kernreaktoren wurden aufgrund der Anwendung von Indium und Gadolinium untersucht. Beide Produkte werden durch ihre Nutzung radioaktiv belastet (vgl. Produktanalyse in Kapitel 5.3). Entsprechend erfolgt eine verlustfreie Erfassung und Sammlung mit anschließender (Zwischen-) Lagerung. Wie in der Produktanalyse in Kapitel 5.3 dokumentiert, ist von einer Abklingzeit von über 50 Jahren auszugehen. Für das Bezugsjahr 2020 ist entsprechend mit keinen für das Recycling infrage kommenden Abfällen zu rechnen. Unabhängig davon lässt sich anmerken, dass die end-of-life Recyclingquoten von Gadolinium und Indium auf unter ein Prozent geschätzt werden (Graedel 2011a, 2011b), bezogen auf die Ist-Situation kann entsprechend von vollständigen Verlusten entlang der Entsorgungskette ausgegangen werden.

Aufgrund der radioaktiven Belastung erscheint eine Optimierung der Entsorgung (bezogen auf eine Rückgewinnung strategischer Metalle) zumindest für gadoliniumhaltiges Absorbermaterial unwahrscheinlich. Die Steuerstäbe haben - wie in der Produktanalyse in Kapitel 5.3 beschrieben - einen Silberanteil von 80 %, der Indiumgehalt beläuft sich auf 15 %. Sofern nach einer Abklingzeit mit anschließender Zwischenlagerung eine Freimessung der Materialien erfolgen kann, ist durchaus davon auszugehen, dass eine Rückgewinnung der enthaltenen Edel- und strategischen Metalle ökonomisch sinnvoll ist, wenn auch erst deutlich über den Projektzeitraum hinaus.

Eine Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette findet sich in

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle.

Tabelle 225: Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Absorbiermaterial und Steuerstäben in Kernreaktoren

Variante	Sammlung, Sortierung	Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	verlustfrei	100% Gd, In	100% Gd, In	70 kg Gd 650 kg In
Optimierte Entsorgungskette	verlustfrei	keine geeigneten Verfahren	= Ist-Situation	= Ist-Situation

6.2.3.20 Hochtemperatursupraleiter

Hochtemperatursupraleiter (HTS) wurden bezüglich der Anwendung von Yttrium untersucht. Für die Betrachtung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette ist es notwendig, die Endprodukte zu betrachten, in denen die HTS zum Einsatz kommen. In erster Linie relevant sind gemäß der Produktanalyse in Kapitel 5.3 Kabel, Generatoren und MRTs. Kabel und Generatoren kommen hierbei auf einen Anteil von 70 %. In Kabeln wird die Verweildauer mit über 40 Jahren angegeben, in Generatoren mit über 20 Jahren, in den sonstigen Anwendungen mit mindestens 10 bis 15 Jahren (siehe der Produktanalyse in Kapitel 5.3). Kommerzielle Anwendungen insbesondere zur Übertragung von Strom gibt es jedoch erst seit einigen Jahren (RWE 2013). Entsprechend gibt es derzeit keine Entsorgung von EoL-Produkten (in relevantem Maßstab) und auch bis zum Bezugsjahr 2020 sind keine relevanten Mengen zur Entsorgung zu erwarten. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der derzeitigen EoL Recyclingquoten von Yttrium von unter einem Prozent (Graedel et al. 2011a/b) kann für die Ist-Situation von vollständigen Verlusten der enthaltenen strategischen Metalle entlang der Entsorgungskette ausgegangen werden.

Es kann dennoch festgestellt werden, dass zumindest prinzipiell eine gute Eignung zur Sammlung besteht. Für MRTs wurde die Sammlung bereits in Abschnitt 6.2.3.11 beschrieben. Die Sammlung von Kabeln zur Stromübertragung kann - sofern entsprechende Anreize bestehen - weitgehend verlustfrei erfolgen.

Bzgl. der Materialrückgewinnung lässt sich sagen, dass zum einen aktuell keine Rückgewinnung von Yttrium aus EoL-Produkten stattfindet (Graedel 2011a, 2011b). Die Betrachtung anderer Produkte mit yttriumhaltigen Keramiken (Hitzeschutzkeramiken, Brennstoffzellen) zeigte ebenfalls, dass die Rückgewinnung von Yttrium bei der Entsorgung bisher keine Rolle spielt, auch wenn im Technologiescreening Verfahren für die Yttriumrückgewinnung aus anderen Abfallströmen im Labor- und Pilotmaßstab aufgeführt sind. Auch wenn beispielsweise für die Behandlung von Keramiken aus Brennstoffzellen entsprechende Verfahrensansätze existieren, finden diese in der Praxis keine Anwendung, selbst wenn längerfristig von höheren ökonomischen Anreizen auszugehen ist (vgl. 6.2.3.12). Zentrale Voraussetzung für eine Optimierung der Entsorgungskette ist also die Verfügbarkeit von Verfahren, die eine ökonomisch rentable Rückgewinnung der enthaltenen Anteile von Yttrium erlauben.

Tabelle fasst die Materialverluste entlang der Entsorgungskette zusammen.

Tabelle 226: Materialverluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Hochtemperatursupraleitern

Variante	Sammlung, Sortierung	Aufbereitung, Rückgewinnung	Gesamt Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation	produktabhängig, eher als gering einzuschätzen	100%	100%	42-140 kg Y
Optimierte Entsorgungskette	produktabhängig, eher als gering einzuschätzen	keine geeigneten Verfahren	= Ist-Situation	= Ist-Situation

6.2.3.21 Rechenzentren

Rechenzentren wurden in der Produktanalyse in Kapitel 5.3 aufgrund ihrer Relevanz für Palladium, Platin und Gold betrachtet. Daneben können in den verschiedenen Komponenten von Rechenzentren auch andere der in ReStra untersuchten Metalle wie Indium oder Gallium enthalten sein, was hier am Rande mitbetrachtet wird.

Sammlung

Die Erfassung von Elektro- und Elektronikaltgeräten erfolgt entsprechend dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG2). Auch die Server der Rechenzentren fallen in den Geltungsbereich dieses Gesetzes und werden der Kategorie 3, das heißt den IT- und Telekommunikationsgeräten, zugeordnet.

Die Nutzer sind entsprechend verpflichtet, die Geräte einer getrennten Erfassung zuzuführen. Für die Rücknahme und Verwertung der seit August 2005 in Verkehr gebrachten Business-to-Business-Geräte (B2B-Geräte) sind die Hersteller verantwortlich, es sein denn, Hersteller und Nutzer haben abweichende vertragliche Vereinbarungen getroffen. In diesem Fall muss der vertraglich festgelegte Entsorgungspflichtige die Altgeräte entsorgen und die Kosten dafür tragen. In allen anderen Fällen haben die Hersteller ein eigenes und für die Letztnutzer zumutbares Rücknahmesystem für Altgeräte bereitzustellen. Verschiedene Rücknahmesysteme für Elektro- und Elektronikaltgeräte bieten die europaweite Rücknahme von B2B-Geräten und deren Recycling an.

Wurde der Nutzer von IT-Geräten und -strukturen vertraglich zur Entsorgung seiner Altgeräte verpflichtet, so muss er deren fachgerechte Verwertung und Entsorgung am Ende der Nutzungsphase sicherstellen. Dies kann entweder durch die Vereinbarung der zeitgleichen Abholung des Altgerätes bei Lieferung eines Neugerätes oder durch die Beauftragung eines zertifizierten Erstbehandlers oder Entsorgungsfachbetriebes erfolgen. Den Abbau und die Entsorgung von Rechenzentren bietet eine Vielzahl von Unternehmen an. Sie bieten ihren Kunden in der Regel ein umfassendes Servicepaket aus qualifiziertem Abbau der Altanlagen, Entkabelung, werterhaltender Demontage einzelner Anlagenkomponenten zur Wiederverwendung, Verladung und Transport sowie der eigentlichen fachgerechten Verwertung und Entsorgung. Darüber hinaus können geringe Mengen gewerblich genutzter Altgeräte, nach Absprache und unter Umständen gegen Gebühr, teilweise auch an kommunalen Sammelstellen abgegeben werden, was Höchsten für kleine Rechenzentren von Bedeutung ist. Eine verbindliche spezifische Sammelquote für gewerbliche Elektro(nik)altgeräte existiert bisher nicht.

Aufgrund der Berichtspflicht aller Mitgliedstaaten gemäß der europäischen Richtlinie 2002/96/EC über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE-Richtlinie) muss auch Deutschland alle zwei Jahre über den aktuellen Stand bei der Erfassung von Elektro(nik)altgeräten berichten. Dazu werden die erfassten Daten der als gemeinsame Stelle der Hersteller im Sinne des ElektroG2 fungieren-

den Stiftung ear sowie der Statistischen Landesämter verwendet. Ursprung der Daten sind jeweils die zertifizierten Erstbehandlungsanlagen (EBA). Im Jahr 2010 waren 230 EBA registriert und gemäß ElektroG2 zur Auskunft verpflichtet. Die Angaben über die in Verkehr gebrachten Mengen an B2B-Neugeräten erfolgten im Rahmen der Jahresmeldung durch die Hersteller an die Stiftung ear als Jahressumme (Gallenkemper & Breer 2013).

Zur näherungsweisen Bestimmung der Sammelquote von Rechenzentren werden die B2B-Daten der Stiftung ear für die Kategorie IT- und Telekommunikationstechnik herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass die in Tabelle dargestellte Menge auch andere gewerbliche Geräte wie beispielsweise Telefonanlagen oder Multifunktionsdrucker beinhaltet. Weitere nach gewerblichen Anwendungen oder nach Servern beziehungsweise Rechenzentren aufgeschlüsselte Daten liegen nicht vor.

B2B-Gerätemengen werden seit 2007 auch durch die Statistischen Landesämter bei den EBA abgefragt und beim Statistischen Bundesamt (Destatis) zusammengeführt.

Tabelle 227: iVgM von B2B-Geräten der IT- und Telekommunikationstechnik sowie Verhältnis der iVgM zu der zurückgenommenen Menge eines Jahres

Berichtsjahr	2008	2009	2010	2011	2012
iVgM [t/a]	96.073	109.765	90.563	74.148	71.870
Rücknahmemenge ear [t/a]	14.027	13.002	14.023	14.253	15.383
Sammelquote ear	14,6%	11,9%	15,5%	19,2%	21,4%
Rücknahmemengen Destatis [t/a]	18.055	20.345	20.665	-	-
Sammelquote Destatis (gesamt)	18,8%	18,5%	22,8%	-	-

Quellen: Gallenkemper & Breer 2010, 2013

Bei einer sinkenden Anzahl der in Verkehr gebrachten B2B-Geräte der IT- und Telekommunikationstechnik sowie leicht steigenden Rücknahmemengen kann aber von einer steigenden Sammelquote ausgegangen werden. Dennoch ist zu beachten, dass der Bezug der in Verkehr gebrachten Menge auf die im gleichen Jahr zurückgenommene Menge keine echte Sammelquote darstellt.

Auch die zuletzt steigende Anzahl an Leasingverträgen im Bereich gewerblich genutzter Elektrogeräte führt zu einer erhöhten Rücklaufquote. Leasingverträge sorgen dafür, dass das Eigentum an den Geräten bei den Herstellern beziehungsweise den Vertreibern verbleibt und klären damit auch die Frage nach der Entsorgungsverantwortung am Ende der Nutzungsphase (Huisman et al. 2007). Die Leasingverträge können dabei unterschiedlich gestaltet sein. Neben dem Leasing kompletter Server werden auch Anteile an Servern verleast, die dabei sowohl auf verschiedene Leasingverträge als auch auf verschiedene Kunden aufgesplittet werden können (Siegler 2004). Wie viele Geräte tatsächlich vom Leasing betroffen sind, und ob diese am Ende ihrer Leasing-/Nutzungsdauer recycelt oder erneut verkauft werden, konnte nicht ermittelt werden.

Neben gesetzlichen und vertraglichen Verpflichtungen ergibt sich ein zusätzlicher Anreiz zur Sammlung aus dem ökonomischen Wert der Rechenzentren. Hintemann und Fichter (2010) beziffern alleine den Wert des Materialbestandes in Rechenzentren in Deutschland in 2008 auf 88 Millionen Euro, wovon knapp 60 % auf die Edelmetalle Gold, Palladium, Platin und Silber entfallen. Aufgrund des hohen ökonomischen Werts bezahlen Entsorger sowie Re-Marketing Firmen in der Regel für die Abnahme der Rechenzentren zur Entsorgung.

Ein Faktor, der die Recyclingquoten negativ beeinflusst, ist der Export gebrauchter Geräte ins außereuropäische Ausland. Dies betrifft insbesondere die nach dem Baseler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung (UNEP 2013a) illegalen Transporte nicht-funktionsfähiger Ware in Entwicklungs- und Schwellenländer (Hagelüken 2006a). Zwar wurde diese Problematik illegaler Exporte durch die Novelle der Richtlinie 2012/19/EU adressiert, indem die Nachweispflicht der Gebrauchsfähigkeit beim Exporteur verankert wurde (European Commission 2012), die zukünftigen Auswirkungen dieser Änderungen bleiben jedoch noch abzuwarten. Zudem muss bedacht werden, dass auch verwendbare Geräte irgendwann das Ende des Produktlebenszyklus erreichen und dann in den Empfängerländern kaum auf adäquate Recyclingstrukturen treffen (Hagelüken 2006a). Hier sind wiederum Strategien auf internationaler Ebene notwendig, um sicherzustellen, dass vorhandene EAG in geeignete Recyclingverfahren gelenkt werden (UNEP 2013a). Eine detailliertere Beschreibung von Ansätzen zur Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten findet sich in Sander und Schilling (2010).

Zusammenfassung: Materialverluste in der Sammlung

Eine Quantifizierung der Sammelquoten sowie der Mengen, die die Systemgrenzen der Studie verlassen und in Ländern ohne vergleichbare Entsorgungssysteme zur Entsorgung anfallen, ist auf Grundlage der Datenlage nur eingeschränkt möglich. Verschiedene andere Studien geben für verschiedene (Consumer) Elektronikprodukte Erfassungsquoten von 35 bis 40 % (Huisman et al. 2008) oder 50 % (Buchert et al. 2012b) an. Für Rechenzentren als gewerblichen Produkten ist jedoch von geringeren Verlusten auszugehen. Wie beschrieben besteht ein hoher ökonomischer Anreiz zur Erfassung. Daneben etablierten sich zunehmend Leasingsysteme. Vor diesem Hintergrund wird eine Sammelquote von 70 % angenommen. Eine weitere Steigerung erscheint aufgrund der beschriebenen Sachlage durchaus erreichbar.

Sortierung und Aufbereitung

Laut ElektroG2 müssen IT- und Telekommunikationsaltgeräte bezogen auf das durchschnittliche Gerätegewicht zu mindestens 80 % verwertet und zu mindestens 70 % wiederverwendet und stofflich verwertet werden. Um diese Vorgaben zu erreichen, erfolgt im Anschluss an die Sammlung der Elektro(nik)altgeräte deren Sortierung und Zerlegung. Dafür werden die zurückgenommenen Altgeräte nach ihren Produkteigenschaften, ihrem Alter und ihrem Zustand unterschieden und funktionstüchtige Geräte für eine Wiederverwendung aussortiert.

Die Wiedervermarktung aufbereiteter Geräte erfolgt nicht nur in Deutschland, sondern auch im Ausland. Nicht wiederverwendbare Geräte werden an ein Partnerunternehmen zur Zerlegung und letzten Verwertung abgegeben.

Die elektr(on)ischen Altgeräte, die in Deutschland verbleiben, durchlaufen eine manuelle, teil-automatisierte und/oder voll automatisierte Demontage. Dabei werden zu Beginn einzelne wiederverwendbare Teile oder Baugruppen demontiert sowie Schadstoffe abgetrennt.

Bei der manuellen Zerlegung werden einfache Werkzeuge (Zangen, Sägen, Elektroschrauber, etc.) sowie Mustergeräte und Zerlegelisten verwendet. Automatisierte Verfahren erfolgen unter Einsatz von Zerlegemaschinen wie zum Beispiel der Smash Boom Bang SB oder des Querstromzerrspanners. Nach einer mechanischen Vorzerlegung können teilweise Bauteile wie Festplatten, Trafos und Kondensatoren unzerkleinert entnommen werden, wobei sich diese in Rechenzentren meist auf Leiterplatten befinden und nach der ersten Zerlegung nicht als Einzelkomponenten separiert werden können. Auf nachgeschalteten Bändern erfolgen weitere manuelle Demontageschritte. Hier werden auch die Leiterplatten entnommen. Daran schließt sich eine manuelle oder automatisierte Sortierung mittels Sieben, Sensoren oder Magneten an (Martens 2011).

Dass der Grad der manuellen Demontage bei der Vorbehandlung ausschlaggebend für die Rückgewinnungsraten ist, zeigt auch der Verfahrensvergleich von Salhofer et al. (2009). Diese unterzogen eine Monocharge von gewerblichen PCs drei verschiedenen Behandlungstechnologien: zwei unterschiedliche Demontagetiefen sowie die mechanische Aufbereitung mit Smasher- und Schredderanlagen gemäß dem aktuellen Stand der Technik. Bei der Hauptzerlegung wurden hierbei Motherboards und Kontakte entnommen, was der Vorgehensweise von Demontagebetrieben im Routinebetrieb entspricht (Salhofer et al. 2009). Bei der vertieften Zerlegung wurden Festplatten, Laufwerke und Netzteile weiter demontiert und auch Leiterplatten aus diesen Bauteilen wurden entfernt (Salhofer et al. 2009). Alle drei Verfahren unterschieden sich dabei sowohl in ihrem Aufwand als auch in ihrer Wertstoffausbeute. Die Rückgewinnungsraten von Gold und Palladium sind in Tabelle dargestellt. Platin wurde in dieser Studie nicht gesondert betrachtet.

Tabelle 228: Gehalte und Separationsraten von Edelmetallen für Demontage und mechanische Aufbereitung

Element	Gehalt (ppm)	Hauptzerlegung	Vertiefte Zerlegung	Mechanische Aufbereitung
Au	23	80%	97%	70%
Pd	9	66%	99%	41%

Quelle: Salhofer et al. 2009

Eine möglichst tief gehende Demontage und die vorherige Entnahme hochwertiger Bauteile wie Leiterplatten und Stecker ist damit Voraussetzung zur Erreichung hoher Edelmetallausbeuten. Dies wird in verschiedenen Studien bestätigt (siehe bspw. Chancerel 2010; Chancerel et al. 2009;

Salhofer et al. 2009; Schöps et al. 2010), die der zumeist üblichen Praxis des Schredderns ganzer Geräteeinheiten höhere Edelmetallverluste zuschreiben.

Bezüglich Rechenzentren kann davon ausgegangen werden, dass Server nur in Ausnahmefällen geschreddert werden, bevor Leiterplatten und andere wertvolle Komponenten ausgebaut worden sind. Die Separationsquote von Leiterplatten kann hierbei als sehr hoch angesehen werden. Unsicherheiten bestehen bei den Leiterplatten von Festplatten und Flachbildschirmen. Aufgrund des im Vergleich zu Motherboards von Servern jedoch noch höheren Wertgehalts lässt sich aber eine ebenfalls hohe Separationsquote vermuten.

Vor diesem Hintergrund werden für die Sortierung/Zerlegung Verlustraten von 10 Prozent bezogen auf alle enthaltenen Komponenten von Rechenzentren angenommen.

Für die folgenden Schritte der Aufbereitung werden aufgrund der schlechten Datenlage nicht mehr Rechenzentren als Ganzes untersucht, sondern ihre relevanten Komponenten betrachtet. Wie Hintemann und Fichter (2010) anhand ihrer Referenz-Modul-Einheiten gezeigt haben, finden sich die betrachteten Edelmetalle hauptsächlich in den verschiedenen Leiterplatten (bspw. Motherboards, Leiterplatten in Festplatten). Weitere Vorkommen wie beispielsweise in der Klimatisierung oder der unterbrechungsfreien Stromversorgung sind den Autoren zufolge vernachlässigbar (Hintemann und Fichter 2010). Chancerel et al. (2009) haben in ihren Versuchen gezeigt, dass das starke Schreddern von Leiterplatten zu Verlust von Silber, Gold und Palladium führt. Die Edelmetalle verteilen sich dabei größtenteils in Fraktionen, aus denen sie nicht mehr zurückgewonnen werden. Die Verluste von Gold und Palladium werden hierbei auf rund 74 Prozent quantifiziert. Sie landen u.a. in der Kunststofffraktion oder aufgrund anhaftender magnetischer Anteile im Eisenschrott. Eine Rückgewinnung der strategischen Metalle aus der Eisen- bzw. Stahlroute ist - wie aus dem Metallrad in Kapitel 6 ersichtlich - kaum möglich. Im Filterstaub finden sich knapp 5 % Palladium wieder, da die palladiumhaltigen Keramikträger im Schredder ebenfalls aufgebrochen werden (Chancerel et al. 2009). Beim Platin der Festplattenscheiben gehen Buchert et al. (2012) von einem Komplettverlust durch den Schredderprozess aus. Die Autoren vermuten, dass sich das Platin in der Schredderleichtfraktion oder der Aluminiumfraktion sammelt und auch hier nicht zurückgewonnen wird. In aktuelleren Untersuchungen gehen Schöps et al. (2010) von etwas höheren Rückgewinnungsraten insbesondere für Gold aus. Für die vertiefte Zerlegung hingegen werden die die Rückgewinnungsraten für die verschiedenen enthaltenen strategischen Metalle auf 97 bis 99 % beziffert (Schöps et al. 2010).

Rückgewinnung

Für die Wiedergewinnung von Edelmetallen aus Sekundärmaterialien wie beispielsweise Elektronikschrott existieren verschiedene Raffinationsverfahren mit hohen Wirkungsgraden. Üblicherweise werden geeignete Komponenten wie Computerleiterplatten, die neben einem nennenswerten Kupferanteil auch geringe Edelmetallmengen enthalten, in einem Hochofenprozess bei ca. 1.200 Grad eingeschmolzen. Dabei dient das Kupfer als Sammlermetall und bindet die Edelmetalle in seiner flüssigen Phase (Hagelücken 2010). Kunststoffanteile aus dem Elektronikschrott werden entweder vorher abgetrennt, um sie anderweitig zu verwerten und die Dioxinbildung zu verhindern, oder werden in den Prozessen energetisch genutzt (Martens 2011). Keramische Bestandteile, Glas sowie einige Metalloxide ((Fe, Al, Ge, Ga, SE)) werden in der Schlacke eingebunden. Nach dem Abstich der Kupferphase wird diese in einer weiteren Verfahrensstufe zu Kupfer raffiniert, wobei sich die enthaltenen Edelmetalle vollständig im Anodenschlamm anreichern. In

einer nachgeschalteten pyrometallurgischen Aufbereitung werden die Edelmetalle mit Rückgewinnungsraten von teilweise über 90 Prozent in hoher Reinheit zurückgewonnen (Buchert et al. 2012).

In Deutschland verarbeitet vor allem die Aurubis AG die kupferhaltigen Schreddermaterialien aufbereiteter Elektro(nik)schrotte. Dazu nutzt der weltgrößte Kupferrecycler seine Anlagen in Lünen und Hamburg. Darüber hinaus werden Elektroaltgeräte auch zum schwedischen Bergbauunternehmen Boliden (Anlage in Rönnskär) sowie zum belgischen Materialtechnologiekonzern Umicore (Anlage in Hoboken) gebracht. Wagner et al. (2012) gehen davon aus, dass sich die nach Schweden und Belgien exportierten Mengen mit den von Aurubis aus dem Ausland importierten Mengen ausgleichen.

Mit modernen metallurgischen Verfahren lassen sich Edelmetalle inzwischen zu mehr als 95 Prozent zurückgewinnen (Buchert 2013; Hagelüken 2010). Die Rückgewinnung stellt damit die effizienteste Stufe der Entsorgungskette elektronischer Altgeräte dar.

Zusammenfassung der Materialverluste entlang der Entsorgungskette

In Tabelle sind die Materialverluste entlang der Entsorgungskette für einen low-end Fall der Ist-Situation dargestellt, in dem von einer mechanischen Zerlegung mit Verlusten von bis zu 74 % von Gold und Palladium sowie von 74-100 % von Platin ausgegangen wird. Bezüglich der Sammlung werden wie beschrieben Verluste von 30 %, für die Sortierung und Zerlegung von 10 % sowie in der Rückgewinnung von 5% angenommen.

Für eine Optimierung der Entsorgungskette besteht das größte Potenzial im Schritt der Aufbereitung. Hier wird im Vergleich zur Ist-Situation von manueller Demontage mit deutlich reduzierten Verlusten ausgegangen. Zudem werden für die Sammlung weiter reduzierte Verluste von 20 % angenommen. Der Schritt der Rückgewinnung kann hingegen als weitgehend optimiert angesehen werden.

In Bezug auf die Ist-Situation ergeben sich Materialverluste von 84 bis 100 %. In der skizzierten optimierten Entsorgungskette sind diese Verluste für Au, Pd und Pt auf 34% reduzierbar.

Tabelle 229: Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette von Rechenzentren

Produkt	Szenario	Sammlung	Sortierung/ Zerlegung	Aufbereitung	Rückgewinnung	Gesamte Entsorgungskette	Absolute Verluste in 2020
Ist-Situation (low end)	mechanisch	30 %	10 % Au 10 % Pd 10 % Pt	max. 74 % Au max. 74 % Pd max. 74 - 100 % Pt	~5 % (Au, Pd, Pt)	84 % Au, Pd 84-100 % Pt 100% Ga, In	350-438 kg Au 4-5,8 kg Pt 239-293 kg Pd
Optimierte Entsorgungskette (high end)	Demontage und Metallurgie	20 %	10 % Au 10 % Pd 10 % Pt	0-3 % Au 0-3 % Pd 0-3 % Pt	~5 % (Au, Pd, Pt)	34 % Au, Pd, Pt 100% Ga, In	142-177 kg Au 1,7-2 kg Pt 97-118 kg Pd

6.2.3.22 SE-Permanentmagnete

SE-Permanentmagnete - hier in erster Linie relevant sind Neodym-Eisen-Bor-Magnete - kommen in verschiedenen der betrachteten Produkte zum Einsatz wie z. B. Windenergieanlagen, Automobile, Elektrofahrräder, Raumklimaanlagen und MRT-Geräte. Neben Neodym kommen in diesen Magneten auch andere Seltene Erden wie Dysprosium, Terbium, Praseodym und weitere zum Einsatz. Eine Rückgewinnung der eingesetzten Seltenen Erden aus Permanentmagneten in nennenswertem Maßstab findet bisher nicht statt (vgl. Goonan 2011; Graedel et al. 2011a/2011b). In Bezug auf die Ist-Situation ist entsprechend von einem vollständigen Verlust der enthaltenen strategischen Metalle auszugehen. Es gibt jedoch bereits verschiedene Verfahrensansätze und Forschungsaktivitäten für eine Rückgewinnung Seltener Erden aus Permanentmagneten (siehe hierzu auch Technologiescreening in Kapitel 6.1).

So finden sich bei Hitachi fortgeschrittene Aktivitäten zum Recycling von Seltenen Erden aus Permanentmagneten, wo ein Verfahren speziell für Magnete aus Festplatten und Klimaanlagen entwickelt wurde (Hitachi 2010)). Im Labormaßstab (einige kg bis Tonnen Magnetwerkstoff) scheint die Anlage auch erfolgreich angelaufen zu sein (Hitachi 2013). Genaue Angaben über eine erfolgte großtechnische Inbetriebnahme oder die mögliche Größenordnung der Anlage liegen derzeit aber nicht vor. Ein weiteres Verfahren für Separierung und Recycling der Permanentmagneten aus Raumklimaanlagen ist bei Mitsubishi Material & Co. in Entwicklung (Tanaka et al. 2012). Andere Verfahren zum Recycling von Permanentmagneten mit Rückgewinnung Seltener Erden finden sich wie auch im Technologiescreening in Kapitel 6.1 beschrieben in der Entwicklung, u.a. bei der Loser Chemie GmbH, der Vacuumschmelze GmbH, dem Fraunhofer IFAM Dresden und in einem Gemeinschaftsprojekt von Umicore und Rhodia. Entsprechend kann für eine Optimierung der Entsorgungskette davon ausgegangen werden, dass zukünftig diverse Verfahren zur Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Permanentmagneten zur Verfügung stehen werden.

Die möglichen Arten der Verwertung bzw. des Recyclings lassen sich wie in Tabelle beschrieben einteilen. In Binnemans et al. (2013a) sind für die verschiedenen Verfahrensarten die dargestellten Vor- und Nachteile aufgeführt. Wie in der Tabelle dargestellt wird für große Magnete wie sie in Windenergieanlagen und großen Elektromotoren zum Einsatz kommen die Wiederverwendung als sinnvollste EoL-Lösung erachtet, während dies für kleine Magnete wie aus Festplatten, kleinen Elektromotoren (wie bspw. an verschiedenen Stellen in Automobilen verbaut) als nicht sinnvoll erachtet wird (Binnemans et al. 2013a).

Tabelle 230: Vor- und Nachteile verschiedener Recyclingoptionen für SE-haltige Permanentmagnete

Methode / Verfahren	Vorteile	Nachteile
Direkte Wiederverwendung	wirtschaftlichster Verwertungsweg keine Abfallerzeugung	nur geeignet für große Magnete (Windenergieanlagen, große Elektromotoren) bisher nicht in großen Mengen verfügbar
Wiederaufbereitung der Legierungen zu Magneten nach „hydrogen decrepitation“	weniger Energie erforderlich als bei hydro- und pyrometallurgischen Verfahren keine Abfallerzeugung insb. für Festplatten geeignet	nicht geeignet für (Magnet-) Inputströme mit unterschiedlicher Zusammensetzung nicht geeignet für oxidierte Magnete
Hydrometallurgische Verfahren	geeignet für alle Arten von Magnetzusammensetzungen	viele Prozessschritte notwendig, bis neue Magneten erhalten werden hoher Verbrauch an Chemikalien

Methode / Verfahren	Vorteile	Nachteile
	anwendbar für nicht-oxidierte und oxidierte Legierungen selbe Prozessschritte wie für die Extraktion von SE aus Erzen	Große Abwassermengen
Pyrometallurgische Verfahren	geeignet für alle Arten von Magnetzusammensetzungen kein Abwasseranfall weniger Prozessschritte als bei hydrometallurgischen Verfahren SE werden in metallischem Zustand erhalten	hoher Energieverbrauch kann nicht direkt für oxidierte Magnete angewandt werden große Mengen festen Abfalls
Gas-Phasen Extraktion	geeignet für alle Arten von Magnetzusammensetzungen anwendbar für nicht-oxidierte und oxidierte Legierungen kein Abwasseranfall	verbraucht große Mengen Chlorgases Aluminiumchlorid ist hoch korrosiv

Quelle: nach Binnemans et al. 2013a

Wenn also entsprechend von einer Wiederverwendung der in Windenergieanlagen sowie ggf. auch in MRTs eingesetzten Magneten ausgegangen wird, können hier die auftretenden Materialverluste als vernachlässigbar eingestuft werden.

Für kleine Magnete wie sie in kleinen Elektromotoren sowie Generatoren in Automobilen, Elektrofahrzeugen und Raumklimaanlagen zum Einsatz kommen, kann angenommen werden - sofern die Magnete getrennt erfasst und dem Recycling zugeführt werden - dass sie zukünftig mit einem der verfügbaren bzw. in der Entwicklung befindlichen Verfahren behandelt werden. Erkenntnisse über in den Prozessen auftretende Materialverluste gibt es bisher kaum. Für ein Verfahren, das an der University of Birmingham für gesinterte NdFeB-Magnete aus Festplatten entwickelt wird, wurden Rückgewinnungsraten von etwa 95 % angegeben (Binnemans et al. 2013a). Vergleichbare Quoten beschreibt Walton (2015). Zu beachten ist hierbei jedoch, dass die häufig uneinheitliche Materialzusammensetzung von Permanentmagneten mit schwankenden SE-Gehalten eine Herausforderung für Recyclingverfahren darstellen kann (Rademaker et al. 2013a) bzw. sich gewisse Anforderungen an die Reinheit des Inputstroms ergeben.

Eine Grundvoraussetzung für die Zuführung in die geeigneten Rückgewinnungsverfahren ist zunächst die Separierung aus dem Produkt und entsprechende Erfassung. Einige der in Entwicklung befindlichen Verfahren beinhalten die Schritte zur Zerlegung des Produkts und Separierung der Permanentmagnete. Entsprechende Verfahren sind beispielsweise für Raumklimaanlagen, Waschmaschinen und Festplatten in Entwicklung (Tanaka et al. 2012). In der Regel ist innerhalb dieser Schritte eine Entmagnetisierung erforderlich, um zu vermeiden, dass die Permanentmagnete durch Anhaftung an Stahlfraktionen verloren gehen oder Störstoffe mit in den Rückgewinnungsprozess einschleppen.

Allgemeine Abschätzungen für potenzielle Verluste von Permanentmagneten nach Produkttypen lassen sich nur schwer treffen. Dies hängt zum einen von der produktspezifischen Sammlung und Erfassung ab, die in den jeweiligen Abschnitten beschrieben ist. Darüber hinaus lässt sich sagen, dass die Wirtschaftlichkeit von Verfahren zur Separierung von Permanentmagneten von der Zu-

gänglichkeit und der Größe der Magnete abhängt. Für dezentralisierte Permanentmagnete in Automobilen ist beispielsweise eine wirtschaftliche Separierung schwerer umzusetzen als für Magnete aus Raumklimaanlagen.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich die in der Tabelle dargestellten Verluste in der Rückgewinnung in der Ist-Situation und der potenziell optimierten Entsorgungskette.

Es ist anzumerken, dass Rademaker et al. (2013a) bis zum Bezugsjahr 2020 Festplatten als wesentlichen Gegenstand für das Recycling und die Rückgewinnung Seltener Erden aus Permanentmagneten sehen⁶³. Für Windenergieanlagen und Hybridfahrzeuge sehen sie erst ab Ende der 2020er Jahre relevante zu erwartende Mengenströme (Rademaker et al. 2013a), die Recyclingsysteme rentabel machen („economy-of-scale“). Die Produktanalyse (siehe Kapitel 5.3) zeigt, dass auch die Menge an Seltenen Erden aus Elektrofahrräder und PKW einen wesentlichen Beitrag leisten können, um die Mengenschwelle für einen ökonomischen Betrieb der Rückgewinnung zu erreichen.

Tabelle 231: Ausblick - Verluste strategischer Metalle in der Entsorgung von Permanentmagneten

Variante	Sammlung, Sortierung	Aufbereitung, Rückgewinnung
Ist-Situation	produktabhängig, siehe jeweilige Abschnitte	100%
Optimierte Entsorgungskette	produktabhängig, siehe jeweilige Abschnitte	bis zu <5%

6.2.4 Zusammenfassung

Das Kapitel hat die Materialverluste, die in der Ist-Situation für die verschiedenen untersuchten Produkte entlang der Entsorgungskette auftreten, aufgezeigt. Ausgehend von der Ist-Situation wurde - wo möglich- eine optimierte Entsorgungskette skizziert. Auf dieser Basis lässt sich eine Differenz der (absoluten) Verluste strategischer Metalle aus den Abfallströmen der untersuchten Produkte in 2020 zwischen einer Entsorgungskette, die der Ist-Situation entspricht, und einer optimierten Entsorgungskette bestimmen. Die folgende Tabelle fasst die Materialverluste für Ist-Situation, optimierte Entsorgungskette sowie deren Differenz zusammen. Die Differenz stellt das mit geeigneten Maßnahmen zu hebende Rückgewinnungspotenzial dar.

⁶³ Auch die Ergebnisse des Projektes RePro bestätigen die Relevanz der SE-Mengen aus Festplatten (Sander 2015a).

Tabelle 232: Vergleich der Materialverluste in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette für das Jahr 2020

Produkt	Ist-Situation	Optimierte Entsorgungskette	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
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	-	-

Produkt	Ist-Situation	Optimierte Entsorgungskette	Differenz
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 me- dium 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 dar⁶⁴.

⁶⁴ Bei Schwankungsbreiten wurde der arithmetische Mittelwert gebildet.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Abbildung 64: Mengenströme von Platin, Palladium, Rhodium und Gold in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette

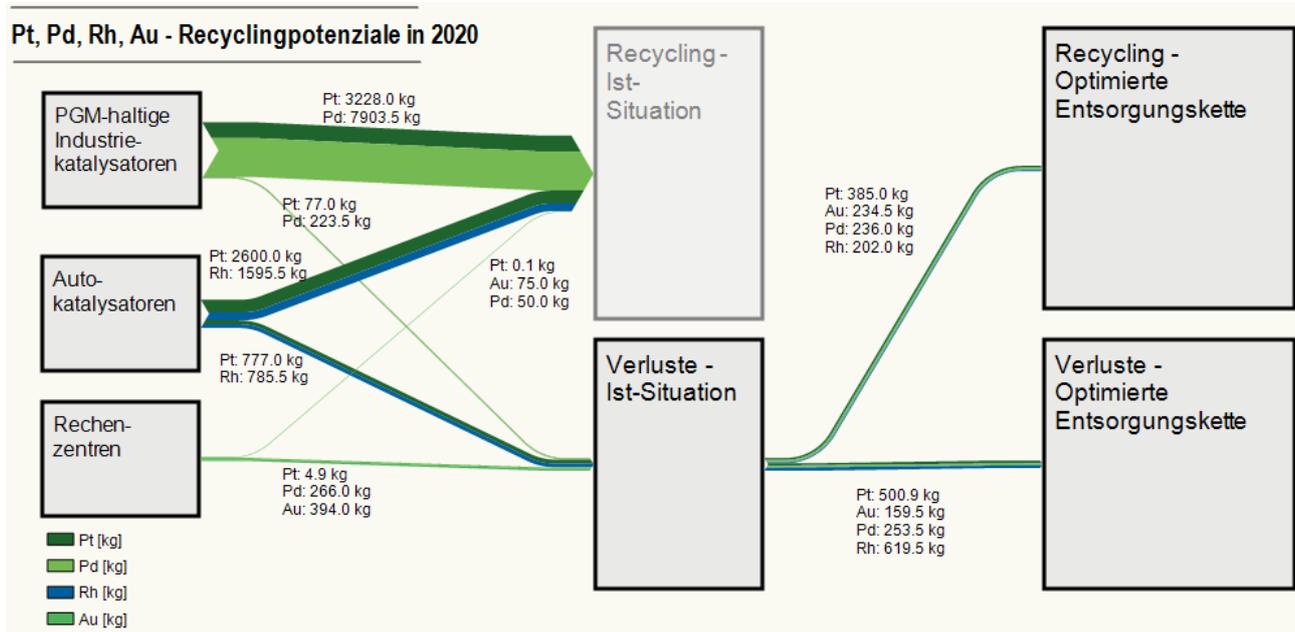


Abbildung 65: Mengenströme von Neodym, Dysprosium und Terbium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette

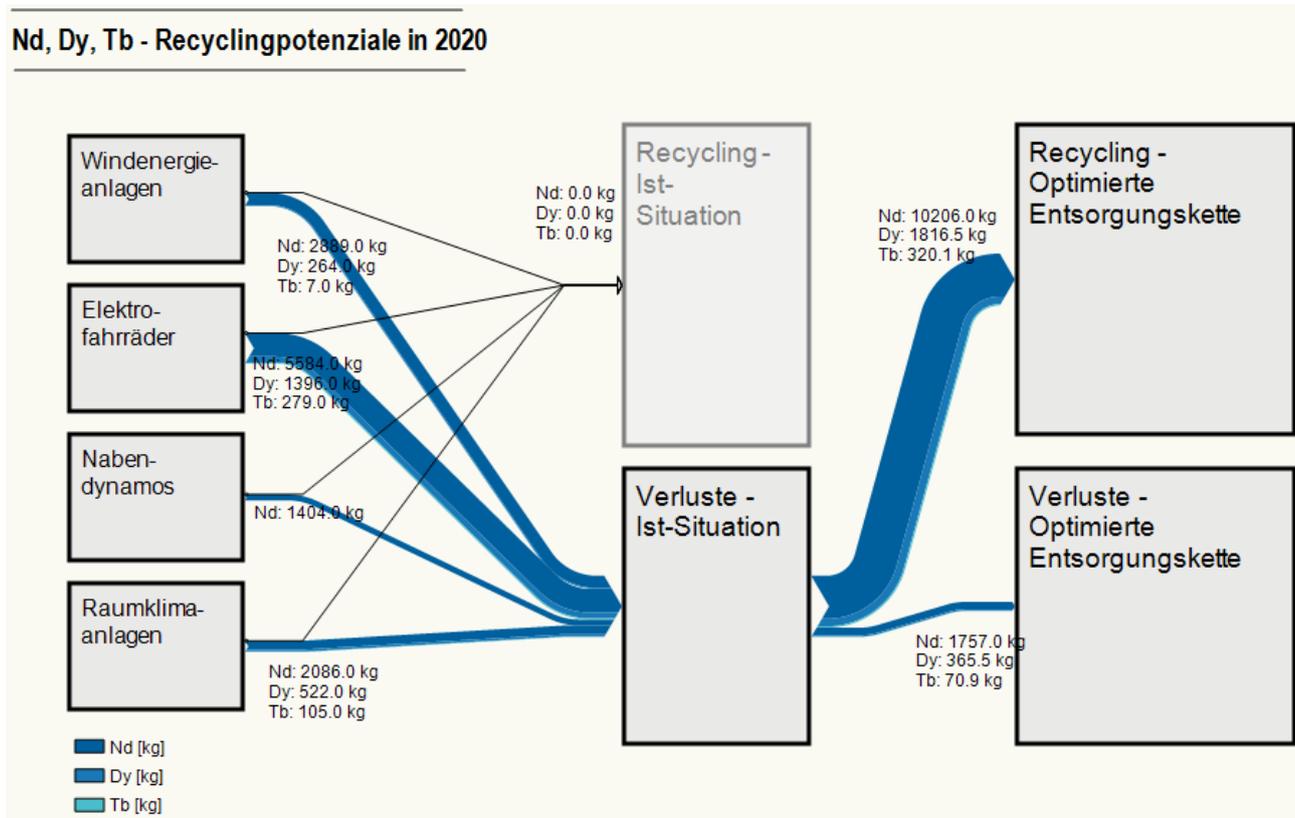


Abbildung 66: Mengenströme von Cer, Lanthan und un spezifizierten Seltenen Erden in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette

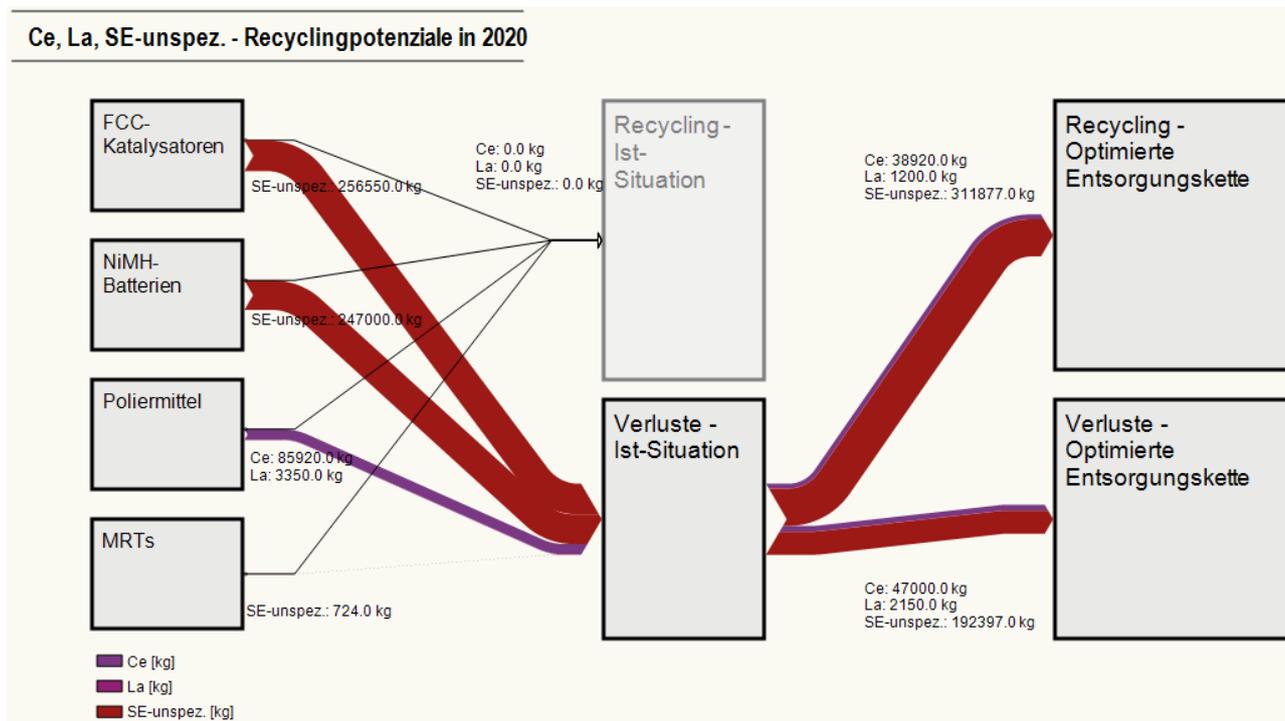
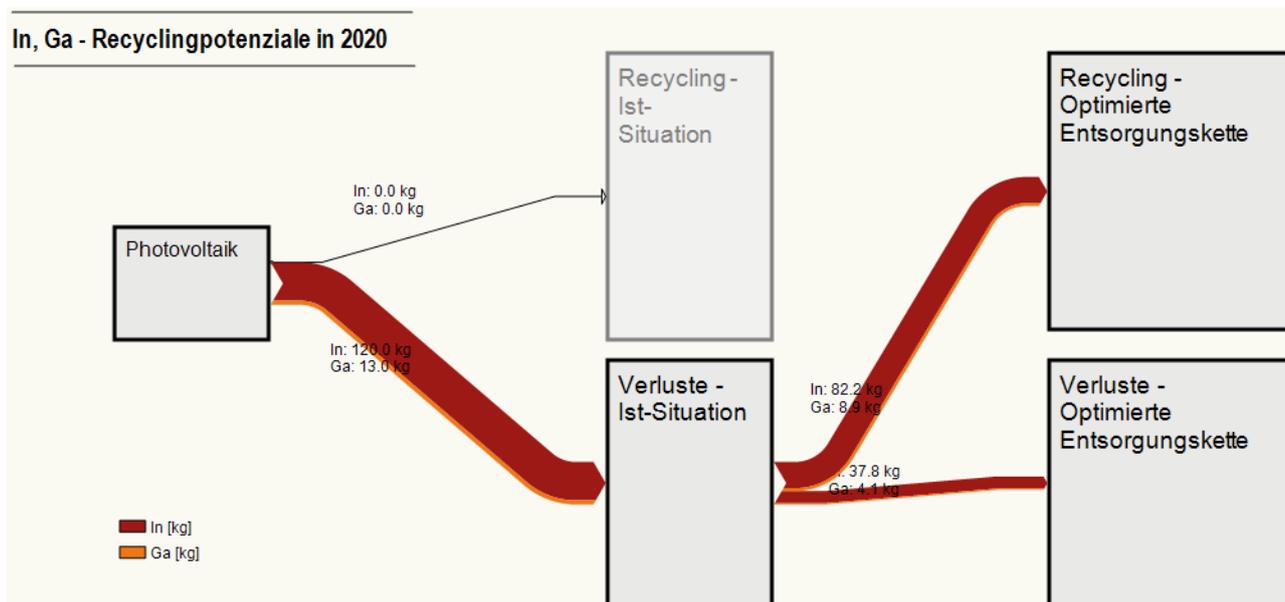


Abbildung 67: Mengenströme von Indium und Gallium in Ist-Situation und optimierter Entsorgungskette



6.3 Überblicksdarstellung spezifischer Hemmnisse bei der Optimierung der untersuchten Entsorgungsketten

Im Rahmen der Analyse der Entsorgungsketten (siehe Kapitel 6.2) wurden unter anderem Hemmnisse analysiert, die einer Optimierung der Entsorgungskette in Bezug auf eine Rückgewinnung strategischer Metalle im Wege stehen. Informationsquellen zu den Hemmnissen waren Literatur-

und Internetrecherche, Befragungen der jeweiligen Technologieanbieter und Austausch mit anderen Forschungsgruppen. Berücksichtigt wurden je nach Zusammenhang ökonomische (Kosten, Logistik, Effizienz) und technische (Machbarkeit, Wirksamkeit) Aspekte.

Spezifische Hemmnisse, die für die jeweilige Entsorgungskette relevant sind, wurden in den jeweiligen Unterkapiteln des Kapitels 6.2 thematisiert, die in der folgenden Tabelle noch einmal zusammengefasst sind. Im folgenden Kapitel werden dann übergeordnete Aspekte der Hemmnisse zusammenfassend dargestellt.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 233: Altproduktspezifischer Überblick der identifizierten Hemmnisse

Altprodukt	Problem bei der Sammlung	Hemmnis bei der Sammlung	Problem bei der Vorbehandlung	Hemmnis bei der Vorbehandlung	Problem bei der Rückgewinnung	Hemmnis bei der Rückgewinnung
Pd-Chemie-katalysatoren	Verluste durch unvollständige Erfassung	geringe Mengen von Katalysatoren je Einsatzstelle; Aufwand-Nutzen für Anwender nicht positiv	/	/	/	/
Umweltkatalysatoren	Verluste durch unvollständige Erfassung	Informationsdefizit, geringe Mengen von Katalysatoren je Einsatzstelle, lange Nutzungszeiten	/	/	/	/
FCC Katalysatoren	/	/	keine rentablen Rückgewinnungsverfahren und entsprechende Vorbehandlung verfügbar	geringe Erlöse für La&Ce	Rückgewinnungsverfahren nur im Labor-/Pilotmaßstab	geringe Erlöse für La&Ce
Autokatalysatoren	Verluste bei Sammlung und Transport beschädigter Katalysatoren durch nicht-optimierte Logistik bzw. Sammel-systeme	Die Rahmensetzungen beim Transport und die Wahl der Transportsysteme erfolgt durch individuelle ökonomische Abwägung ggf. durch mangelnde Kenntnisse.	Verluste beim Öffnen und der mechanischen Behandlung der Katalysatoren, teilweise keine Absaugung mit Staub-/Feinkornabscheidung	Die Rahmensetzungen erfolgt durch individuelle ökonomische Abwägung ggf. beeinflusst durch mangelnde Kenntnisse.	Rückgewinnungsverfahren sind selektiv auf PGM ausgerichtet (und hierfür effektiv und mit geringen Verlusten) aber nicht auf La&Ce.	geringe Erlöse für La&Ce
Automobilkomponenten	/ (Anmerkung: Sammlung bezieht sich hier auf die Erfassung von Komponenten aus den Altfahrzeugen, die in D demontiert wurden.)	/	keine Demontage Fehlende Demontagegerechte Konstruktion (DfD) führt zu hohem technischen Aufwand bei der Separation von SE-Magneten.	keine oder geringe Erlöse für ReStra-Komponenten; keine Informationen über das Vorhandensein von SE in konkreten Altfahrzeugen	keine Rückgewinnungsverfahren für SE-Komponenten großtechnisch verfügbar	geringe Mengen in der Vergangenheit, fehlende Zuverlässigkeit in Bezug auf den Inputstrom wg. fehlender rechtlicher Rahmensetzungen, fehlende Rentabilität,

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Altprodukt	Problem bei der Sammlung	Hemmnis bei der Sammlung	Problem bei der Vorbehandlung	Hemmnis bei der Vorbehandlung	Problem bei der Rückgewinnung	Hemmnis bei der Rückgewinnung
				Aufwand für DfD beim Hersteller, aber kein Benefit des Herstellers aus dem DfD		Henne-Ei-Problem
Spezialgläser	keine getrennte Erfassung	fehlende Erlöse, radioaktive Belastung von Strahlenschutzgläsern, fehlende Rückgewinnung	keine Vorbehandlung wg. fehlender Rückgewinnung	fehlende Erlöse, fehlende Rückgewinnung	keine großtechnischen Verfahren verfügbar	hoher Energieaufwand und Kosten für Rückgewinnung bei sehr geringen Erlösen
Photovoltaik	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 niedrig und nicht differenziert nach Gerätarten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen, geringe Mengen an Altmodulen	teilweise keine Vorbehandlung zur Vorbereitung der Rückgewinnung von ReStra-Zielmetallen (CIGS, In in CdTe soweit vorhanden) Lösung der Materialverbunde	fehlende Rückgewinnungsverfahren und fehlende Erlöse sehr stabile und dauerhafte Materialverbunde sichern eine lange technische Lebensdauer	keine Rückgewinnungsverfahren für In und Ga	geringe Mengen und für In zukünftig sinkende Mengen durch Substitution von ITO
Hitzeschutzkeramiken	keine Getrenntsammlung der Abfälle	keine Rückgewinnungsverfahren und keine Rentabilität	spezifische Verfahren zur Vorbereitung der Rückgewinnung werden nicht durchgeführt	keine Rückgewinnungsverfahren	keine großtechnischen Rückgewinnungsverfahren, Hydrometallurgie im Labormaßstab für andere Y-haltige Abfälle, prinzipiell hoher Aufwand im Verfahren, wg. unedlem Charakter der SE	fehlende Rentabilität wg. geringer Metallkonzentrationen und geringe Gesamtmengen; Rückgewinnungskonflikt mit Nickelrückgewinnung (SE-Verluste im Ni-Rückgewinnungsverfahren)

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Altprodukt	Problem bei der Sammlung	Hemmnis bei der Sammlung	Problem bei der Vorbehandlung	Hemmnis bei der Vorbehandlung	Problem bei der Rückgewinnung	Hemmnis bei der Rückgewinnung
Mischmetall in der Metallurgie	keine produktspezifische Sammlung (differenziert nach Einsatz von Mischmetall und anderen Gussprodukten)	Vielfalt der Produkte, in denen Mischmetall eingesetzt wird, starke Diversifizierung der Einsatzfelder, geringe Mengen je Anfallstelle, fehlendes Wissen über Vorhandensein der Mischmetalle	keine Vorbehandlung	keine Rückgewinnung	keine Recyclingverfahren verfügbar; denkbar wäre eine Kreislaufführung der Gussqualitäten zu vergleichbaren Einsatzgebieten	keine Rentabilität
Batterien	Sammlung entsprechend den Anforderungen des BattG, geringe Sammelquote	hoher Aufwand für intensivierte Sammlung und fehlende Rechtsgrundlage hierfür	Identifikation von chemischen Batteriesystemen bei zerstörten Batterien aus der EAG-Aufbereitung	keine Durchsetzung von allgemeinen Anforderungen zur zerstörungsfreien Separation von Batterien aus EAG	teilweise keine Zuführung in Rückgewinnungsprozesse für SE	Recyclingquoten können auch ohne SE-Rückgewinnung erreicht werden
Poliermittel	vollständige Erfassung als Produktionsabfall aber keine Getrenntsammlung	keine Rentabilität der getrennten Erfassung und keine Getrenntsammlungspflicht	keine Vorbehandlung, Unterschiede bei den Verunreinigungen der Poliermittel	keine Rückgewinnung	keine Rückgewinnung	keine Rentabilität
Laseranwendungen	keine Getrenntsammlung	keine Rückgewinnung	keine spezifische Vorbehandlung zur Rückgewinnung	keine Rentabilität	keine Rückgewinnung	sehr geringe Mengen in stabiler Matrix eingebunden, hoher Energieaufwand für Trennung der ReStra-Zielmetalle aus der Glasmatrix, keine Rentabilität

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Altprodukt	Problem bei der Sammlung	Hemmnis bei der Sammlung	Problem bei der Vorbehandlung	Hemmnis bei der Vorbehandlung	Problem bei der Rückgewinnung	Hemmnis bei der Rückgewinnung
Windenergie	keine Getrennthaltung von Komponenten mit ReStra-Zielmetallen	keine rechtlichen Anforderungen an die Getrennthaltung von Komponenten mit ReStra-Zielmetallen, keine rechtlichen Anforderungen an die Zuführung zur Verwertung, keine entsprechenden ökonomischen Treiber	keine Vorbehandlung	fehlende Rückgewinnung, , keine Verpflichtung zur Zuführung zu spezifischen Verwertungsverfahren, Verwertung	keine Rückgewinnung	geringe Mengen in der Vergangenheit, fehlende Zuverlässigkeit in Bezug auf den Inputstrom wg. fehlender rechtlicher Rahmensetzungen, fehlende Rentabilität, Henne-Ei-Problem
MRT	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 niedrig und nicht differenziert nach Gerätearten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen	keine spezifische Vorbehandlung	fehlende Rückgewinnung, keine Verpflichtung zur Zuführung zu spezifischen Verwertungsverfahren, Verwertung	keine Rückgewinnung	fehlende Zuverlässigkeit in Bezug auf den Inputstrom wg. fehlender rechtlicher Rahmensetzungen, fehlende Rentabilität, Henne-Ei-Problem
Röntgengeräte	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 niedrig, nicht differenziert nach Gerätearten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen	keine spezifische Vorbehandlung	fehlende Rückgewinnung, keine Verpflichtung zur Zuführung zu spezifischen Verwertungsverfahren, Verwertung	keine Rückgewinnung	geringe Mengen, fehlende Rentabilität
Brennstoffzellen	ggf. keine spezifische Separation (fehlende Praxisdaten, da Altproduktmengen sehr gering)	fehlende Rückgewinnung	keine spezifische Vorbehandlung	fehlende Rückgewinnung	keine Rückgewinnung	geringe Altproduktmengen, hoher Energieaufwand für die Trennung Y und Zr, fehlende Rentabilität

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Altprodukt	Problem bei der Sammlung	Hemmnis bei der Sammlung	Problem bei der Vorbehandlung	Hemmnis bei der Vorbehandlung	Problem bei der Rückgewinnung	Hemmnis bei der Rückgewinnung
Glasfaserkabel	ggf. keine Getrennhaltung (fehlende Praxisdaten, da Altproduktmengen sehr gering)	fehlende Rückgewinnung	keine spezifische Vorbehandlung	fehlende Rückgewinnung	keine Rückgewinnung	geringe Altproduktmengen, geringe Konzentration von Ge in Altprodukt
Erbiumdotierte Faserverstärker	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 nicht differenziert nach Gerätearten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen	keine spezifische Vorbehandlung	fehlende Rückgewinnung	keine Rückgewinnung	geringe Mengen (Altprodukte und Erbiumgehalte)
LEDs	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 niedrig, nicht differenziert nach Gerätearten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen	keine spezifische Vorbehandlung zur Separation einer Fraktion mit erhöhten Konzentrationen von ReStra-Zielmetallen	fehlende Rückgewinnung	keine Rückgewinnung	geringe Mengen (Altprodukte und Gehalte von ReStra-Zielmetallen)
Raumklimaanlagen	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 niedrig und nicht differenziert nach Gerätearten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen	Fehlende Demontagegerechte Konstruktion (DfD) führt zu hohem technischen Aufwand bei der Separation von SE-Magneten.	Aufwand für DfD beim Hersteller, aber kein Benefit des Herstellers aus dem DfD	keine großtechnisch etablierte Rückgewinnung	geringe Mengen in der Vergangenheit, fehlende Zuverlässigkeit in Bezug auf den Inputstrom wg. fehlender rechtlicher Rahmenseetzungen fehlende Rentabilität, Henne-Ei-Problem

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Altprodukt	Problem bei der Sammlung	Hemmnis bei der Sammlung	Problem bei der Vorbehandlung	Hemmnis bei der Vorbehandlung	Problem bei der Rückgewinnung	Hemmnis bei der Rückgewinnung
Elektrofahrräder (Pedelecs)	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 niedrig und nicht differenziert nach Geräteearten fehlende Informationen über Vorhandensein von SE-Magneten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen kein entsprechender Rechtsrahmen	Fehlende Demontagegerechte Konstruktion (DfD) führt zu hohem technischen Aufwand bei der Separation von SE-Magneten.	Aufwand für DfD beim Hersteller, aber kein Benefit des Herstellers aus dem DfD	keine großtechnisch etablierte Rückgewinnung	geringe Mengen in der Vergangenheit fehlende Zuverlässigkeit in Bezug auf den Inputstrom wg. fehlender rechtlicher Rahmensetzungen fehlende Rentabilität Henne-Ei-Problem
Nabendynamos	Sammlung üblicherweise als Fe-Schrott	kein entsprechender Rechtsrahmen zur Getrennthaltung fehlende Informationen über Vorhandensein von SE-Magneten	keine Separation des Nabendynamos aus dem Fahrrad bzw. der SE-Magnete aus dem Dynamo Fehlende Demontagegerechte Konstruktion (DfD) führt zu hohem technischen Aufwand bei der Separation von SE-Magneten.	fehlende Rentabilität Aufwand für DfD beim Hersteller, aber keine Benefit des Herstellers aus dem DfD fehlende Information	keine großtechnisch etablierte Rückgewinnung	geringe Mengen in der Vergangenheit fehlende Zuverlässigkeit in Bezug auf den Inputstrom wg. fehlender rechtlicher Rahmensetzungen fehlende Rentabilität Henne-Ei-Problem
Schleifkeramiken	ggf. keine Getrennthaltung nach SE-Schleifkeramiken	keine ökonomischen Anreize und kein entsprechender Rechtsrahmen	Vorbehandlung auf Trennung Kühlschmierstoff und Feststoff bzw. Separation der Metallanteile ausgerichtet	keine ökonomischen Anreize und kein entsprechender Rechtsrahmen	keine Rückgewinnung	geringe Konzentration von Y in Abfallfraktion keine Rentabilität kein entsprechender Rechtsrahmen

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Altprodukt	Problem bei der Sammlung	Hemmnis bei der Sammlung	Problem bei der Vorbehandlung	Hemmnis bei der Vorbehandlung	Problem bei der Rückgewinnung	Hemmnis bei der Rückgewinnung
Absorbermaterial und Kontrollstäbe in Kernreaktoren	/	/	keine Vorbehandlung	Strahlenbelastung	keine Rückgewinnung	Strahlenbelastung
Hochtemperatursupraleiter	keine Getrennthaltung von Kabeln mit HTS keine Getrennthaltung von Generatoren mit HTS zu MRT siehe oben Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 niedrig und nicht differenziert nach Gerätearten	kein entsprechender Rechtsrahmen für die Getrennthaltung von Kabeln mit HTS Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen	keine auf ReStra-Zielmetalle ausgerichtete Vorbehandlung	keine Rückgewinnung	keine Rückgewinnung	keine Rentabilität geringe Mengen
Rechenzentren	Sammelziel entsprechend den Anforderungen des ElektroG2, nicht differenziert nach Gerätearten Fehlende Informationen über Vorhandensein von SE-Magneten	Vorgaben der EU-Richtlinie, keine Ausschöpfung der Möglichkeit, national höhere Quoten zu setzen kein entsprechender Rechtsrahmen	Fehlende Demontagegerechte Konstruktion (DfD) führt zu hohem technischen Aufwand bei der Separation von SE-Magneten.	Aufwand für DfD beim Hersteller, aber kein Benefit des Herstellers aus dem DfD	keine großtechnisch etablierte Rückgewinnung	fehlende Zuverlässigkeit in Bezug auf den Inputstrom wg. fehlender rechtlicher Rahmensetzungen fehlende Rentabilität Henne-Ei-Problem

6.4 Übergeordnete Hemmnisse

6.4.1 „Henne-Ei-Problem“

Ein wesentliches Hemmnis bei der Stärkung der Kreislaufführung von ReStra-Zielmetallen stellt das „Henne-Ei-Problem“ dar. Kern dieses Hemmnisses ist es, dass keine Verwertungsanlagen etabliert werden, solange die entsprechenden Abfallfraktionen nicht zur Verfügung stehen und keine Separation der Abfallfraktionen erfolgt, solange keine Abnahme durch eine Verwertungsanlage sichergestellt ist. Die Entwicklung von Lösungsansätzen in Kombination mit der Analyse der einzelnen Problemkomponenten erfolgt exemplarisch für die Optimierung der Rückgewinnung von SE-Magnetrohstoffen im Kapitel 7.2 „Dualer Ansatz am Beispiel von Magnetanwendungen“.

6.4.2 Transportaufwand

Die Analysen der Entsorgungsketten (siehe Kapitel 6.2.3) haben gezeigt, dass der Transportaufwand für die Altprodukte bzw. Fraktionen aus der Aufbereitung der Altprodukte wesentlichen Einfluss auf die Verwertung hat:

- Abfallmenge je Anfallstelle: Für verschiedene ReStra-Altprodukte (z. B. Umweltkatalysatoren (siehe Kapitel 0)) ist die Altproduktmenge je Anfallstelle gering. Spezifische Transporte nur für diese Abfälle sind unter den gegebenen Rahmenbedingungen ökonomisch unvorteilhaft.
- Räumlichen Strukturen bzw. Verteilungen von Anlagen von Entsorgungsketten: Durch die Lage der Anlagen, die im Rahmen von Entsorgungsketten zusammenarbeiten, wird der Transportaufwand bestimmt. Im Beispiel der Verwertung von CdTe-PV-Modulen wird die einzige europäische Anlage zur Aufbereitung der Module in Eisenhüttenstadt in Deutschland betrieben. Die dabei gewonnenen Fraktionen, die die strategischen Rohstoffe enthalten, werden im selben Bundesland verwertet.
- Rentabilitätsschwellen der Anlagen: Das Verhältnis der anfallenden Altproduktmengen zu den Rentabilitätsschwellen der Aufbereitungs- oder Rückgewinnungsanlagen bestimmt die Transportaufwände über die daraus resultierende Anzahl der Anlagen (Balance zwischen einer aus wirtschaftlichen Erwägungen erforderlichen Anlagenkapazität und den Transportaufwendungen von den verteilten Anfallstellen). Im Beispiel der SE-Magnete zeigte die Mengenabschätzung, dass die anfallenden Mengen aus Deutschland nur für eine Anlage zur Überschreitung der Rentabilitätsschwelle ausreichen würden und somit die spezifischen Transportaufwendungen hoch wären.
- Zeitliche Entwicklung der Abfallmengen: Das Beispiel der PV-Module (Kapitel 6.2.3.4) zeigte, dass die zeitliche Entwicklung der Abfallmengen eine dynamischen Struktur der Entsorgungsketten verlangt (Zusammenspiel aus Erfassungsstellen und Sammelpunkten, an denen Einzelmengen zusammengeführt werden (bulking) sowie den Aufbereitungs- und Rückgewinnungsanlagen).

Die Beispiele zeigen die Bedeutung von optimierten Logistikkonzepten für das Erreichen einer optimierten Kreislaufführung für strategischen Rohstoffe.

6.4.3 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen und Finanzierung

Vorhersagen darüber zu treffen, wann Produkte dem Recycling in welcher Menge zur Verfügung stehen, ist zwar von vielen Faktoren abhängig, aber durch Modellierung grundsätzlich möglich (siehe auch Kapitel 5.1). Das fehlende Wissen über zukünftige Materialströme, Ungenauigkeiten der Prognosen und die Ungewissheit darüber, inwieweit die als Abfall anfallenden Metallfrachten tatsächlich in geordnete Verwertungswege eingehen werden, führt zu einer geringen Bereitschaft von Recyclingunternehmen, in neue Anlagen zu investieren, da unklar ist, ob und wann sich diese rentieren werden. Gleichzeitig führen volatile Preisentwicklungen, wie sie für strategische Rohstoffe in den vergangenen Jahren zu beobachten waren (siehe auch Kapitel 6.6.2), zu zusätzlichen Unsicherheiten auf der Erlösseite der Entsorgungsanlagen. Handelshemmnisse wie z. B. Zölle, Subventionen oder Exportrestriktionen können das Marktgeschehen durch politische Vorgaben wesentlich beeinflussen.

Es wurden in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen zahlreiche Verfahren von kleinen und mittelständischen Unternehmen entwickelt (siehe Kapitel 6.1). Diese beklagen teilweise fehlende Fördermöglichkeiten, um die für die industrielle Umsetzung der Verfahren erforderlichen Investitionen tätigen zu können. Dadurch verbleiben viele Verfahren im Entwicklungsstadium.

6.4.4 Zielvorgaben in den rechtlichen Rahmensetzungen

Gesamtmassenbezogene Recyclingquoten/-ziele (z. B. bezogen auf das Gewicht eines Altproduktes) sind für das Recycling strategischer kritischer Metalle eher wirkungslos, da jene Metalle meist in nur sehr geringen Mengen bzw. Konzentrationen im Produkt vorhanden sind (z. B. relevant für Altprodukte, die SE-Magnete enthalten). Spezifische und auf die besondere Situation hinsichtlich Konzentration und Menge ausgerichtete Recyclingziele für ReStra-Zielmetalle sind bisher nicht etabliert.

6.4.5 Wissen über die Anforderungen aus REACH

Derzeit besteht seitens der Recycler eine gewisse Unsicherheit, inwieweit die Regelungen aus VO (EG) Nr. 1907/2006 (REACH-VO) einer wirtschaftlichen Rückgewinnung strategischer Metalle aus Abfällen entgegenstehen. Es wird befürchtet, dass ein zusätzlicher unangemessener Aufwand von den Unternehmen geleistet werden muss, was dazu führt, dass sie mit ihren Materialien im Abfallregime verbleiben, was die Rückgewinnung und anschließende Vermarktung strategischer Metalle behindert.

Zwar ermöglicht Artikel 3 (2) der REACH-VO dieses Vorgehen, indem hier Abfälle explizit von den Regelungen ausgenommen werden. Gleichzeitig hat der Gesetzgeber aber auch deutlich gemacht, dass bei Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft ein Produkt den Regeln der Verordnung in vollem Umfang unterliegt. Dennoch enthält REACH einige Regelungen, die dazu führen, dass die meisten Anforderungen an Recycler entfallen.

Artikel 2 (7d) ermöglicht eine Ausnahme von der Registrierung unter REACH. Dies ist ein Privileg für Recycler, die von Registrierungspflichten befreit werden, wenn der Stoff bereits von irgend-

einem anderen Akteur registriert wurde. Dies ist für die meisten Metalle der Fall und wurde federführend von Eurometaux als europäischer Verband organisiert⁶⁵. Damit entfallen für Recycler die Hauptkosten für den Markteintritt mit ihren Produkten, die unter REACH im Wesentlichen durch den Erwerb eines sogenannten „Letter of Access“ für den Erwerb für die Registrierung nötiger Stoffdaten und Gebühren gegenüber der ECHA einmalig fällig würden. Andere Prozesse der REACH-VO wie Zulassung oder Beschränkung enthalten keine Ausnahmen für Recycler. Gleichwohl stehen auch diese nicht einem wirtschaftlichen Recycling entgegen. Hierfür gibt es folgende Gründe:

- **Beschränkung:** Eine Beschränkung unter REACH gilt für einen fest umrissenen Scope von Erzeugnissen, Verwendungen oder anders gesagt Situationen in denen der Einsatz bestimmter Stoffe verboten (beschränkt) ist. Dabei ist es unerheblich, ob ein Stoff in Form von Abfall in ein Produkt gelangt oder im Rahmen der Verwendung eines Stoff/Gemischs unter REACH. Werden die Bedingungen der Beschränkung nicht eingehalten, ist der Verbleib im Abfallregime kein Vorteil, da auch Abfälle in solchen Prozessen in Bezug auf das Ergebnis die Beschränkung erfüllen müssen.
- **Zulassung:** Die Zulassung unter REACH verbietet die Verwendung von bestimmten Stoffen ohne explizite und einzelfallbezogene Genehmigung (Zulassung). Die Zulassung muss im Rahmen eines formalen Verfahrens beantragt werden. Ziel der Zulassung ist gezielt besonders besorgniserregende Stoffe⁶⁶ aus Verwendungen nach und nach durch sicherere Stoffe zu substituieren. Dabei befassen sich die Behörden im Vorfeld bereits mit dem Anwendungsspektrum der Stoffe und ihrem Risikopotenzial. Kommen sie zu dem Schluss, dass die Verwendung eines strategischen Metalls einer Zulassungspflicht unterliegen sollte, würde dies auch auf Recyclingmaterialien zutreffen. Gleichzeitig würde der Gesetzgeber aber aller Wahrscheinlichkeit dann auch Regelungen treffen, die eine Weiterverwendung dieses Metalls über den Einsatz von Abfällen ebenfalls verhindern würde (z.B. indem er eine entsprechende Beschränkung für ein Endprodukt eines Verfahrens, in dem der Abfall eingesetzt werden würde, erlasse).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Verbleib mit den Materialien im Abfallregime für die Akteure keine Vorteile bringt. Der grundsätzliche Marktzugang mit recycelten Metallen im Rahmen von REACH ist nicht mit erheblichen zusätzlichen Kosten verbunden. In Fällen in denen REACH weitergehende Regulierung erlässt, ist damit zu rechnen, dass diese Anforderungen auch den Einsatz von Abfallmaterialien beschränken würden. In solchen Fällen ist dann aber auch ge-

⁶⁵ <http://www.reach-metals.eu/>

⁶⁶ Besonders besorgniserregende Stoffe sind krebserregende, reproduktionstoxische und mutagene Stoffe sowie solche die persistent bioakkumulierend und toxisch (PBT) oder sehr persistent und sehr bioakkumulierend (vPvB) sind, sowie Stoffe mit „gleichermaßen besorgniserregenden Eigenschaften“, worunter derzeit vornehmlich atemwegssensibilisierende und hormonwirksame (endokrine) Stoffe verstanden werden. Metalle sind natürlich als anorganische Stoffe per se persistent, werden aber unter REACH nicht als PBT betrachtet, sondern unterliegen einer angepassten Form der Risikobewertung.

nau das Ziel des Gesetzgebers diese Stoffe vom EU-Markt zu verdrängen, sodass hier auch entsprechende Regelungen für den Abfallbereich zu erwarten sind und ein Verbleib im Abfallrecht lediglich temporäre Vorteile mit sich brächte. Es ist daher sogar zu konstatieren, dass der Wechsel in das REACH-Regime den Recyclern den Vorteil brächte, mit den Primärmetallen in einem Markt zu sein.

6.5 Pfadabhängigkeiten in den Entsorgungsketten

Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes wird untersucht, inwieweit Verluste bei der Erfassung und beim Recycling der in Kapitel 6.2 als relevant identifizierten Produkte durch eventuelle Pfadabhängigkeit in einem bestimmten Punkt der Entsorgungskette eintreten. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Erfassung der Produkte bzw. der Zuführung zu Prozessen der Entsorgungskette, die eine Kreislaufführung der enthaltenen strategischen Metalle ermöglichen.

6.5.1 Definition des Begriffs der „Pfadabhängigkeit“

Prozessmodelle, deren zeitlicher Verlauf strukturell einem Netz von Wegen ähnelt, werden mit dem analytischen Konzept „Pfadabhängigkeit“ beschrieben. Aus mehreren Alternativen wird eine Variante gewählt. Dieser einmal eingeschlagene Weg wird durch positive Feedback-Effekte breiter, eine sog. „stabile Phase“ tritt ein und die Variante wird beibehalten, auch wenn rückblickend evtl. bessere Alternativen vorlagen.

Die Existenz von Pfadabhängigkeiten in einem dynamischen System kann nach Arthur (1989) und Balmann (1994) einige wesentliche ökonomische Implikationen haben:

- dauerhafte Auswirkungen (kleiner) historischer Ereignisse,
- kaum mögliches - und wenn, dann teures - Verlassen eines einmal eingeschlagenen Pfades,
- variierende Vorhersagbarkeit der zukünftigen Entwicklung, in Abhängigkeit davon, ob ein stabiler Zustand erreicht wurde,
- potenzielle Ineffizienz eines solchen Systems.

Werle (2007) definiert den Begriff „Pfadabhängigkeit“ im Hinblick auf die Bedeutung der Historie des Prozesses und möglicher Implikationen zusammenfassend als *„vergangenheitsdeterminierter Prozess relativ kontinuierlicher bzw. inkrementeller Entwicklungen. Die im Prozess erreichten Zustände können kollektiv ineffizient oder suboptimal sein, ohne dass der Prozess deshalb notwendigerweise zum Erliegen kommt oder radikal geändert wird“*.

6.5.2 Methodische Herangehensweise

Die Betrachtung von Pfadabhängigkeiten macht für solche Produktgruppen Sinn, bei denen Materialverluste in relevanter Größenordnung bestehen. Hierfür wurde auf die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1 zurückgegriffen. Entsprechend wurden folgende Produktgruppen zur Analyse bezüglich vorhandener Pfadabhängigkeiten, die einer Kreislaufführung im Wege stehen ausgewählt:

- Industriekatalysatoren,
- Automobile,
- Photovoltaikzellen,

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

- Schleifkeramiken,
- keramische Hitzeschutzbeschichtungen,
- Batterien,
- Poliermittel,
- Brennstoffzellen,
- Elektrofahrräder,
- Rechenzentren.

Bei den Produkten bzw. Produktgruppen Laseranwendungen, optische Faseranwendungen und Spezialgläser liegen prinzipiell zwar auch hohe bzw. teilweise vollständige Verluste der enthaltenen strategischen Metalle vor, aufgrund der insgesamt jedoch vergleichsweise geringen Mengen strategischer Metalle, die aus diesen Produkten innerhalb des Untersuchungszeitraums zu erwarten sind, wurde bzgl. dieser Produkte keine nähere Betrachtung vorgenommen. Für Raumklimaanlagen und Windenergieanlagen, die verschiedene Anwendungsfelder von Permanentmagneten darstellen, wurde keine weitere Betrachtung von Pfadabhängigkeiten vorgenommen, da bei beiden Produkten noch keine Abfallströme mit relevanten Mengen strategischer Metalle anfallen. Sowohl direkt angetriebene Windenergieanlagen als auch Raumklimaanlagen mit Neodympermanentmagneten sind relativ junge Produkte, für die noch kein Entsorgungspfad existiert.

Zur systematischen Analyse der ausgewählten Produkte bzw. Produktgruppen vorliegender Pfadabhängigkeiten wurde ein Vorgehen entwickelt, das sich auf folgende Punkte und Leitfragen stützt:

1. Ist es überhaupt sinnvoll beim Entsorgungspfad des betrachteten Produkts auf Pfadabhängigkeiten zu schauen?
 - a) Gibt es bereits einen dominierenden Pfad in der Entsorgung? Dies ist der Fall, wenn die Entsorgung zum größten Teil auf eine bestimmte Art und Weise, also innerhalb eines dominierenden Systems, geschieht. Wenn nein, dann ist die Betrachtung einer Pfadabhängigkeit gegenstandslos, da Alternativen zur Verfügung stehen.
 - b) Wenn ein dominierender Pfad besteht, ist er durch Ineffizienz gekennzeichnet? Nur dann ist eine weitere Untersuchung zielführend, da nur dann eine Ablösung dieses Pfads anzustreben ist. Ineffizienz ist hier vor allem als mangelnde Kreislaufführung strategischer Metalle oder hohe Umweltbelastung zu verstehen. Durch das Vorgehen zur Auswahl der zu betrachtenden Produkte auf Basis der Verluste strategischer Metalle entlang der Entsorgungskette (Ergebnisse des Kapitels 6.1) wurde diese Frage im Prinzip bereits beantwortet. Ökonomische Ineffizienz könnte höchstens als Folge einer Fehlregulierung entstehen, ist aber im Projektkontext zweitrangig, solange Ausbeute und Umweltbelastung stimmen.
2. Wenn 1) mit Ja beantwortet wurde, gilt es zunächst zu untersuchen, ob es jemals Alternativen für den jetzt dominierenden Pfad gab.
 - a) Hat es seit erster Inverkehrbringung der Produkte jemals alternative Entsorgungspfade gegeben, d.h. solche Systeme, die einen relevanten Massenstrom hätten aufnehmen können und für die mindestens Anlagen im Pilotmaßstab existierten?
 - b) Wenn nein, ist das vermutlich der Hauptgrund für die Pfadabhängigkeit: ohne Alternativen kein Pfadwechsel. Hier lassen sich gegebenenfalls Gründe für die Abwesenheit

von Alternativen identifizieren. Dafür kommen ggf. die nun folgenden Fragen in Betracht. Eine prinzipielle Schwierigkeit besteht dabei jedoch darin, dass es sehr schwer zu begründen sein kann, warum etwas NICHT geschehen ist, warum also gar nicht erst Alternativen entwickelt wurden.

3. Wenn 2) mit Ja beantwortet: was hat zum Misserfolg (oder Absterben) dieser alternativen Pfade geführt? Bzw.: Was hat den dominierenden Pfad so verstärkt, dass alternative Pfade keine Chance auf Erfolg hatten?
 - a) Es gibt **Standards, Normen oder Regulierungen** die einen Pfadwechsel verhindern. Beispielsweise könnte die Festlegung von metallunspezifischen und massebasierten Recycling- bzw. Verwertungsquoten für PKW eine Regulierung darstellen, die einen Wechsel auf solche Entsorgungspfade verhindert, die eine höhere Ausbeute an strategischen Metallen ermöglichen würden. Arbeitsschutz- oder Umweltauflagen könnten ebenso eine solche Wirkung haben, auch wenn diese natürlich gerechtfertigt sind.
 - b) Es gibt einen „**Bandwagon**“-Effekt: Wenn sich erst mal eine Reihe von Entsorgern auf einen bestimmten Entsorgungspfad für ein Produkt festgelegt haben, ist es für Mitbewerber ökonomischer, sich diesem Pfad anzuschließen. Dahinter steckt die Annahme, dass sich dieser Pfad „ohnehin durchsetzt“, also eine bestimmte Bewertung der zukünftigen Entwicklung.
 - c) Es gibt einen **Netzwerkeffekt**: Der Wechsel zu einem bestimmten Entsorgungspfad oder einer bestimmten Technologie (z.B. Shreddern statt Zerlegen) erhöht die Chancen eines Akteurs im Entsorgungssektor auf wirtschaftlichen Austausch mit anderen Akteuren. Beispiel (etwas konstruiert): Ein Unternehmen, das die Altprodukte schreddert, kann seine Fraktionen leicht an einen Metallrecycler verkaufen. Ein Zerlegebetrieb kann keine Abnehmer für seine Fraktionen (oder Teile davon) finden bzw. erzielt keine guten Preise bei den Abnehmern, weil die Mengen zu klein sind. Wenn dann also kein Betrieb mehr zerlegte Altprodukte anbietet, ist es auch für einen potenziellen Verwerter der Zerlegefraktionen nicht mehr lukrativ seine Verwertung am Markt anzubieten: Er erhält ja keinen Input mehr.
 - d) Es gibt **Hysterese-Effekte**: Es gibt ökonomische Schwellen für bestimmte Verfahren, z.B. erzielbare Preise für bestimmte Outputfraktionen, die bei deren Entwicklung zwar noch erfüllt waren, sodass alternative Entsorgungspfade aufgebaut wurden. Ist die Schwelle dann aber erst mal unterschritten, werden diese Pfade und die damit verbundenen Betriebe/Anlagen aus ökonomischen Gründen stillgelegt. Später, wenn die Schwelle wieder überschritten ist, ist ein Wiederaufnehmen des Pfades erschwert/unmöglich wegen der nötigen Anfangsinvestition. Übrig bleibt nur der nun dominante Pfad.

Beispiel für eine Pfadabhängigkeit aufgrund des Zusammenspiels verschiedener Effekte: Der QWERTY (Quasi)Standard für PC-Tastaturen verhindert einen Wechsel auf effizientere (ergonomischere) Tastatur-Layouts. Dass sich QWERTY als Standard etablieren konnte, war aber wiederum Folge von Netzwerk- und Bandwagon-Effekten.

6.5.3 Darstellung der Entsorgungspfade und Abhängigkeiten

6.5.3.1 Industriekatalysatoren

PGM-haltige Industriekatalysatoren

Bei den PGM-haltigen Industriekatalysatoren hat sich bereits ein System durchgesetzt, das eine weitgehende Kreislaufführung der enthaltenen strategischen Metalle gewährleistet (vgl. Kapitel 6.1). Eine Ablösung des bestehenden Systems ist entsprechend nicht anzustreben, weshalb für die verschiedenen betrachteten PGM-haltigen Industriekatalysatoren keine nähere Betrachtung vorgenommen wird. Einzige Ausnahme stellen hier Umweltkatalysatoren dar, bei denen relevante relative Materialverluste bestehen, auch wenn die absoluten Mengen strategischer Metalle in Abfallströmen hier keine relevante Größenordnung erreichen (0,1 % bezogen auf die aus Industriekatalysatoren anfallende PGM-Menge; vgl. Kapitel 5). Hier besteht jedoch kein dominierendes System, das nur schwer abgelöst werden kann (vgl. Kapitel 6.1; siehe auch Hagelüken et al. 2005); vielmehr stellt das Anwenderverhalten die Ursache für die fehlende Kreislaufführung dar. Eine nähere Untersuchung von Pfadabhängigkeiten in der Entsorgung PGM-haltiger Industriekatalysatoren ist entsprechend nicht zielführend.

SE-haltige Industriekatalysatoren / FCC-Katalysatoren

Wie in Kapitel 6.1 dargestellt, existiert für FCC-Katalysatoren ein Entsorgungspfad, der eine weitgehende Sammlung ermöglicht, während es in den folgenden Schritten der Entsorgungskette zu einem vollständigen Verlust der enthaltenen strategischen Metalle kommt. Entsprechend kann der existierende Entsorgungspfad bezüglich einer Kreislaufführung strategischer Metalle als ineffizient bezeichnet werden.

Möglichkeiten zur ökonomischen Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden bestehen bisher nicht (auch wenn prinzipiell Verfahren zur Rückgewinnung vorliegen wie beispielsweise die hydrometallurgische Rückgewinnung durch Laugung mit sauren Lösungen (siehe Technologiescreening), wobei hierbei unklar ist, inwieweit diese Verfahren bereits Praxisreife aufweisen); stattdessen werden die Katalysatoren deponiert oder werden ohne SE-Rückgewinnung verwertet (bspw. im Straßenbau oder der Zementindustrie; vgl. Abschnitt 0).

Hier kann jedoch nicht davon gesprochen werden, dass eine grundsätzliche Dominanz des bestehenden Systems existiert. Eine Ablösung des derzeitigen Entsorgungspfades erscheint prinzipiell möglich. Vielmehr ist das bestehende System fehlenden Wegen zur ökonomischen Rückgewinnung der Seltenen Erden aus FCC-Katalysatoren geschuldet. Während mit der Verwertung im Straßenbau oder der Zementindustrie Wege der Weiterverwertung zur Verfügung stehen, die ihre ökonomische Tragbarkeit gezeigt haben, erscheint es eher unwahrscheinlich, dass in absehbarer Zeit Verfahren verfügbar werden, die das technologisch anspruchsvolle Problem der Rückgewinnung von SE aus dem hier untersuchten Abfallstrom auf ökonomische Weise lösen können. Zudem weisen die hier untersuchten Seltenen Erden Cer und Lanthan, auch verglichen mit anderen SE vergleichsweise geringe Preise auf, was die Schwelle für einen Wechsel des Entsorgungspfades erhöht (siehe bspw. Naumov 2008; Kingsnorth 2014).

Sollten Verfahren zur wirtschaftlichen Rückgewinnung der SE aus FCC-Katalysatoren jedoch verfügbar werden oder entsprechende regulative Maßnahmen, die auf eine Rückgewinnung abzielen, ergriffen werden, ist nicht davon auszugehen, dass das bestehende System aufgrund von Pfadabhängigkeiten nicht oder nur schwer verlassen werden kann.

Ge-haltige Industriekatalysatoren / Polymerisationskatalysatoren

Bei germaniumhaltigen Polymerisationskatalysatoren kommt es zu einem vollständigen Verlust strategischer Metalle. Diese liegen jedoch nicht in der Entsorgung, sondern in der Dissipation der strategischen Metalle in der Nutzungsphase begründet. Bezüglich der Entsorgung existieren entsprechend keine Pfadabhängigkeiten, die für die fehlende Kreislaufführung verantwortlich sind.

6.5.3.2 Automobile

Der bestehende Entsorgungspfad für Altfahrzeuge orientiert sich neben den betriebswirtschaftlichen Zielsetzungen vor allem an den Anforderungen der Altfahrzeugverordnung. Die darin gesetzten gesamtmassenbezogenen Verwertungsziele berücksichtigen nicht die Rückgewinnung von ReStra-Elementen. Auch die für 2015 vorgesehenen höheren Verwertungsziele erzeugen in diesem Zusammenhang keine veränderten Impulse.

Die bestehenden Entsorgungspfade haben geringere Kosten als z. B. die Demontage von Schlüsselkomponenten, durch die eine hohe Rückgewinnungsrate der ReStra-Elemente erreicht werden kann.

Aufgrund der Zusammensetzung von Fahrzeugen (Vielstoffgemisch mit komplexem und variierendem Aufbau) und den etablierten Verwertungswegen für Fraktionen aus der Altabautenbehandlung (z. B. Stahlwerk, Kupferhütte, Aluminiumhütte) wird auch in Zukunft die mechanische Zerlegung vorgenommen werden. Da die hierzu verwendeten Großschredder mengenrelevant auch für andere Altprodukte genutzt werden, ist von einer großen Stabilität dieses Entsorgungspfades auszugehen. Durch Beteiligung an diesem Entsorgungspfad kann der einzelne Altfahrzeugbehandler seine Altfahrzeuge in den großen und etablierten Mengenstrom einschleusen. Hierdurch sind die Lieferanforderungen großer Hütten hinsichtlich Stabilität und Umfang der Liefermengen erfüllbar.

Aktivitäten, die die Rückgewinnung von ReStra-Metallen mit größerer Effektivität ermöglichen, sind eher als ergänzend und nicht als alternative Pfade zu sehen. So kann vor dem Shreddern eine Demontage besonders werthaltiger Komponenten erfolgen.

Ergänzende Entsorgungspfade, die ReStra-Metalle zurückgewinnen, sind in vielen Fällen etabliert und werden durch vergleichbare Fraktionen aus anderen Herkunftsbereichen gespeist (z. B. Elektroaltgeräte). Von einigen Akteuren werden auch edelmetallhaltige Komponenten aus Altfahrzeugen repariert und in solche etablierten Pfade eingespeist. Dies erfolgt in einigen Fällen im Zusammenhang mit Abfallkomponenten aus Produktionsprozessen (Versuchsfahrzeuge, Produktionsausschuss, Testreihen, etc.), wodurch Masseneffekte erzielt werden.

Hinsichtlich der meisten Seltenen Erden, so auch derer die für die Produktgruppe „Automobile“ näher betrachtet wurden, sind Rückgewinnungspfade bisher nicht etabliert. Daher kann im Falle der Altfahrzeuge nur bedingt von einer Pfadabhängigkeit im eigentlichen Sinn gesprochen werden.

6.5.3.3 Photovoltaikzellen

Entsprechend den Analysen in dem Abschnitt 6.2.3.4 werden potenzielle Pfadabhängigkeiten für CdTe und andere PV-Modultypen hier getrennt betrachtet.

Aufgrund ihrer Gehalte an Cd und der Nutzerstrukturen erfolgt eine getrennte Sammlung und Behandlung der CdTe-Module von anderen Modularten. Die existierenden Strukturen führen zu einer Separation der aktiven Materialien (Halbleitermaterialien) von den Trägerwerkstoffen (v.a.

Glas), wobei es sich hierbei nicht um ReStra Metalle handelt. Anzumerken ist, dass kein rechtlicher Rahmen besteht, der diese Situation verpflichtend macht, sondern zumindest die Separation der aktiven Materialien auf freiwilliger Basis im Rahmen einer individuellen erweiterten Herstellerverantwortung durchgeführt wird.

Für CIGS- und a-Si-Module existieren keine vergleichbaren freiwilligen Aktivitäten. Die bestehenden Entsorgungswege (Schreddern als massenrelevantester Weg) führen zu einem Verlust der ReStra-Elemente und werden aufgrund ökonomischer Treiber verfolgt. Eine zunehmende zukünftige Mengenentwicklung (siehe Analyse in Kapitel 6.2.3.4) führt nicht zwingend zu einer Pfadänderung, auch wenn alternative Verfahren, die auch aktive Substanzen für die Rückgewinnung separieren, durch größere Mengen potenziell rentabler werden.

Die Konstruktion von PV-Elementen, bei der eine sehr stabile und dauerhafte Verbindung der Trägerstrukturen vorliegt, macht die Separation der aktiven Substanzen aufwendig. Eine veränderte Produktgestaltung, die im Sinne einer recyclinggerechten Konstruktion die Trägerschichten besser trennbar macht, ist bisher noch nicht entwickelt worden, da alle Ansätze das Risiko einer verkürzten Lebensdauer des Produktes (Wettereinflüsse, Eindringen von Feuchtigkeit) vergrößern. Eine Beeinflussung von Pfadabhängigkeiten über eine veränderte Produktgestaltung ist daher nach bisherigem Kenntnisstand nicht zu erwarten.

Weiterhin besteht eine Pfadabhängigkeit durch das Fehlen von großtechnischen Rückgewinnungsverfahren für einige aktive Substanzen aus CIGS-Modulen.

6.5.3.4 Schleifkeramiken

Der derzeit bestehende Entsorgungspfad der Schleifkeramiken stellt sich so dar, dass die keramischen Schleifmittel als Schleifrückstände zusammen mit Kühlschmierstoffen und Metallspänen aus dem Metallbearbeitungsprozess ausgetragen und aufbereitet werden (vgl. Kapitel 6.1). Während die Metallspäne dabei in eine metallurgische Verwertung gehen, gelangen die Schleifmittelrückstände als Füllstoff in den Straßenbau oder in die thermische Verwertung, wo sie vermutlich in die Asche gelangen. Dieser Pfad ist in Bezug auf die Metallspäne und die Kühlschmierstoffe als effizient zu betrachten, aber höchst ineffizient in Bezug auf die SE-haltigen keramischen Rückstände.

Derzeit sind keine (wirtschaftlich einsetzbaren) Alternativen für die Rückgewinnung der Metalle aus der keramischen Phase bekannt (vgl. Ausführungen in Kapiteln 6.1). Die Gründe liegen hauptsächlich in der extremen thermodynamischen Stabilität der Keramiken und der dadurch bedingten hohen Energieintensität, die ein potenzielles Aufbereitungs- und Recyclingverfahren mit sich brächte.

Grundsätzlich spricht für das Zustandekommen eines alternativen Entsorgungspfades mit höherer SE Ausbeute zunächst die etablierte Trennung von Öl- oder Wasserfraktion, Metallspänen und keramischen Rückständen. Dennoch konnte sich bisher kein Verfahren etablieren, das zu einer Rückgewinnung von SE geführt hätte. Hauptgrund ist zunächst die thermodynamisch schwierige und daher energetisch und ökonomisch teure Rückgewinnung von SE-Oxiden aus den Keramiken, gepaart mit einem geringen Preis für SEO. Im Gegenzug bietet der bestehende Entsorgungspfad über thermische Verwertung (mit dem Rest von Kühlschmierstoff als Energieträger) oder Füllmaterial energetische Gewinne, bzw. kaum zusätzliche Aufwendungen. Ein weiteres Hindernis ergibt sich aus den Abläufen bei den Anwendern, wo in der Regel verschiedenste Schleifmittel eingesetzt werden, von denen nur ein Teil SE-Anteile enthält. Die Sammlung der Abfälle erfolgt

jedoch gemeinsam, wodurch die ohnehin geringe Konzentration von SE im Abfallstrom zusätzlich abnimmt.

Damit liegt die Schwelle für einen Pfadwechsel relativ hoch. Es ist auch infrage zu stellen, ob es überhaupt ökobilanzielle Vorteile einer Rückgewinnung gibt. Ohne energetische, ökonomische oder ökologische Vorteile ist die Aussicht auf einen alternativen Entsorgungspfad gering. Da alternative Technologien darüber hinaus eine Markteintrittsschwelle zu überwinden haben, aufgrund der zunächst kleinen Anlagengröße, wenig Erfahrung der Entsorger mit der Technologie, bzw. Unwissenheit über deren Existenz, etc., ist die Etablierung eines alternativen Pfads nur mit deutlichen Einstiegshilfen zu erwarten.

6.5.3.5 Keramische Hitzeschutzbeschichtungen

Analog zur Analyse der Materialverluste entlang der Entsorgungskette können auch bei der Betrachtung der Pfadabhängigkeiten die beiden untersuchten Anwendungen keramischer Hitzeschutzbeschichtungen, stationäre Gasturbinen und Flugzeugtriebwerke, gemeinsam betrachtet werden. Zu unterscheiden ist jedoch zwischen der Entsorgung der Beschichtungsabfälle, die im Rahmen von Wartungsarbeiten anfallen und der Entsorgung der kompletten beschichteten Komponenten an deren Lebensende.

Der Entsorgungspfad von Beschichtungsabfällen aus der Wartung stellt sich so dar, dass die über verschiedene Verfahren entfernten Beschichtungen gesammelt werden, teilweise gemeinsam mit anderen Strahlmittelabfällen, und anschließend deponiert oder verbrannt werden. Die Sammlung und weitere Entsorgung erfolgt hierbei nicht getrennt nach in den Abfällen enthaltenen Metallen, sondern in Abhängigkeit vom angewandten Verfahren (vgl. Abschnitt 6.2.3.5). In der derzeitigen Praxis der Unternehmen sowie der Entsorger, die die Abfälle abnehmen, spielen Erwägungen zur Rückgewinnung der enthaltenen Seltenen Erden keine Rolle, der Entsorgungspfad kann entsprechend als ineffizient bezüglich der Kreislaufführung strategischer Metalle bezeichnet werden.

Für die Kreislauffineffizienz gibt es verschiedene Gründe. Die Rückgewinnung Seltener Erden aus Keramiken mit bisher verfügbaren Verfahren ist prinzipiell nur schwer durchzuführen bzw. vergleichsweise energieintensiv und in der Regel nicht wirtschaftlich (vgl. Kapitel 6.2.3). Dies wird dadurch erschwert, dass die Konzentration der strategischen Metalle in den Abfällen gering, die gesammelten Abfälle eine Vielzahl verschiedener Metalle (und Nicht-Metalle) beinhalten (Burmeister und Döbber 2013) und die insgesamt anfallenden Abfallmengen vergleichsweise gering sind. Die Situation stellt sich somit ähnlich dar, wie bei der Produktgruppe der Schleifkeramiken sowie den FCC-Katalysatoren. Der bestehende Entsorgungspfad ist daher primär fehlenden wirtschaftlichen Alternativen geschuldet, wobei die Schwelle hierbei als vergleichsweise hoch einzuschätzen ist. Bei Änderungen der Verfügbarkeit von Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Rückgewinnung oder entsprechender Regulierungen, die eine Rückgewinnung bewirken sollen, ist nicht davon auszugehen, dass Pfadabhängigkeiten einer Änderung des Systems entgegenstehen.

Bei der Entsorgung der kompletten beschichteten Komponenten werden diese entweder an die Turbinenhersteller zurückgeschickt, die häufig Noch-Eigentümer der Komponenten sind, da die Komponenten von den Nutzern häufig geleast werden (Seitz 2013b) oder sie gehen ins Metallrecycling (vgl. Abschnitt 6.2.3.5). Für den ersten Fall ist nicht näher bekannt, wie die weitere Verwertung der Komponenten erfolgt. Von einer Rückgewinnung der strategischen Metalle ist jedoch nicht auszugehen. Im zweiten Fall kommt es ebenfalls zum Verlust der Metalle; eine vorheilige Entfernung der Beschichtung mit anschließender Rückgewinnung der Seltenen Erden ist, wie

bereits für die Abfälle aus der Wartung beschrieben, nicht wirtschaftlich durchführbar. Die Kreislaufführung ist als ineffizient zu bezeichnen.

Auch hier bestehen allerdings neben den ökonomischen (bzw. technologischen) Hindernissen keine Pfadabhängigkeiten, die das bestehende System begünstigen. Änderungen in den Abläufen bei den Unternehmen, in denen die Abfälle anfallen, sind prinzipiell möglich. So kann eine Entfernung der Beschichtung der EOL-Komponenten analog zur Entfernung der Beschichtung in der regulären Wartung durchgeführt werden, die benötigten Anlagen sind vorhanden. Die Sammlung der hierbei anfallenden SE-haltigen Abfälle erfolgt zudem ohnehin zunächst getrennt, bevor die Abfälle im Folgenden mit anderen Strahlmittelabfällen vermischt werden. Einen kritischen Punkt können hierbei jedoch die insgesamt geringen absoluten Mengen dieser Abfälle im Einzelnen Unternehmen darstellen. Der mit einer getrennten Sammlung einhergehende Aufwand (organisatorisch wie ökonomisch) lässt es fraglich erscheinen, ob hier eine getrennte Sammlung mit anschließender Rückgewinnung tatsächlich durchsetzbar ist.

6.5.3.6 Batterien

Die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus NiMH-Batterien ist eine sehr junge Entwicklung. Im derzeit mengendominanten Entsorgungspfad (Rückgewinnung der Hauptbestandteile Eisen und Nickel und Verlust der Seltenen Erden, siehe Kapitel 6.2.3.7). Eine Beibehaltung des etablierten Entsorgungspfades in der Zukunft kann sich durch ökonomische Treiber (geringerer Preis der Stahlroute) etablieren. Pfadabhängigkeiten durch Auswirkungen auf die Mengenströme in der Stahlroute sind aufgrund der im Vergleich zum Gesamtmassenstrom Stahl und Nickel vergleichsweise geringen Mengen aus NiMH-Batterien nicht zu erwarten.

6.5.3.7 Poliermittel

Die Poliermittel werden in der Regel nach Gebrauch vollständig und getrennt erfasst und gesammelt (siehe Kapitel 6.2.3.8). Allerdings werden die zunächst sortenreinen Poliermittel im Zuge der weiteren Entsorgung mit anderen Poliermitteln und ähnlichen Abfällen vermischt, insbesondere solchen, die keine SE enthalten, was eine Rückgewinnung der SE-Oxide erschwert. Es wird dabei nicht nur die Konzentration der SE-Oxide verringert, sondern es entstehen auch thermodynamisch ungünstige Materialkombinationen, wie beispielsweise durch Al-haltige Poliermittel, bei denen die seltenen Erden im Aluminium als (z.T. ungewolltes) Legierungselement für eine weitere Nutzung verloren gehen (siehe das „Metal Wheel“ in Kapitel 6.6).

Sowohl im Labormaßstab (Luidold et al. 2013, Poscher et al. 2013, Kato et al. 2000, Ozaki et al. 1999), als auch im industriellen Maßstab (Konica Minolta 2014) gibt es Verfahren zur Rückgewinnung von Cer- und Lanthan-Oxid bzw. des originalen Poliermittels.

Die Hauptbestandteile der SE-haltigen Poliermittel sind Cer- und Lanthanoxid, welche einen eher geringen Marktpreis haben, sodass die Rückgewinnung aus den vermischten Poliermittelabfällen zurzeit ökonomisch nicht darstellbar ist. Die Mengen, die pro Anwender anfallen, sind ebenfalls gering, sodass erst durch eine entsprechende Zusammenführung von Einzelmengen (Pooling) eine ökonomisch tragfähige Recyclinglösung entstehen könnte. Das Industriekonsortium SPECTARIS-Industriekonsortium „Seltene Erden“ rechnet mit einer Mindestmenge von 50t/Jahr, um eine wirtschaftlich interessante Option für Recyclingunternehmen zu bieten (SPECTARIS 2011). Allerdings haben sich nach Bekunden dieses Konsortiums die Bedingungen für ein Recycling von Ceroxid aus Poliermittelrückständen durch die Entspannung auf dem Weltmarkt wieder verschlechtert (SPECTARIS 2012). Scheinbar gibt es hier also eine Schwelle für den Markteintritt eines Verwertungspfades mit Rückgewinnung der Metalle, welche allerdings von Marktpreisen abhängt und

bisher nicht überschritten wurde. Selbst wenn die hier genannten Mengen technisch verfügbar wären, müssten Marktbedingungen und Verfügbarkeit lange genug aufrechterhalten bleiben, damit sich Recyclingunternehmen auf diese einstellen können und entsprechende Rückgewinnungstechnologien aufbauen. Dies scheint derzeit nicht der Fall zu sein.

Die historische Entwicklung der Abfallbezeichnungen, aufbauend auf ihrem Entstehungsort (statt ihrer Zusammensetzung), hat vermutlich ebenfalls einen Einfluss gehabt auf das nun weit verbreitete Vermischen von unterschiedlich zusammengesetzten Poliermitteln. Es liegt für den Entsorger nahe, diese metallurgisch unterschiedlichen Fraktionen zusammenzuführen, solange es keine weiteren ökonomischen Anreize für eine getrennte Verwertung gibt. Ohne sortenrein angebotene Poliermittelfraktionen, und bei tendenziell wieder rückgängigen Preisen für SE, wird sich aber auch kein Verfahren am Markt etablieren können, welches die seltenen Erden zurückgewinnt.

6.5.3.8 Brennstoffzellen

Für Brennstoffzellen sind noch keine Entsorgungspfade etabliert. Vergleichbare Pfade für ähnliche (Alt-)Produkte bestehen nicht. Daher erfolgt keine weitere Analyse von Pfadabhängigkeiten für Brennstoffzellen.

6.5.3.9 Elektrofahrräder

Derzeit besteht aufgrund der geringen Mengenrelevanz kein etablierter Entsorgungspfad für Elektrofahrräder. Für vergleichbare Produkte (Fahrräder ohne Eigenantrieb) ist der Entsorgungspfad üblicherweise der Großshredder. Würden Elektrofahrräder über diesen Weg entsorgt, wäre von einem weitgehenden Verlust der ReStra-Elemente auszugehen.

Eine Gegenteilstendenz zur Einschleusung von Elektrofahrrädern in diesen Entsorgungspfad kann sich ggf. durch Anforderungen der Schadstoffentfrachtung ergeben, bei der über Demontageanforderungen der Batterie das Fahrrad aus dem gemischten Entsorgungsmaterial (Mischschrott) getrennt wird. Für den weiteren Entsorgungspfad nach der Entfrachtung besteht jedoch kein Steuerungsimpuls in Richtung einer Rückgewinnung von ReStra-Elementen. Die Impulse der Steuerung in Richtung des Entsorgungspfades „Großschredder“ sind vergleichbar denen der Altfahrzeuge (siehe Kapitel 6.5.3.2). Allerdings bilden die Fahrräder einen geringen Massenstrom, sodass die Notwendigkeit, sich an gemeinsamen Entsorgungspfaden zu beteiligen um Mengenanforderungen der großen Hütten zu erfüllen („Netzwerkeffekt“) noch größer ist.

6.5.3.10 Rechenzentren

Die Analyse in Kapitel 6.2.3.21 zeigte auf, dass die bestehenden Entsorgungspfade im Prinzip für die Rückgewinnung der ReStra-Elemente geeignet sind, jedoch Unterschiede bei der Rückgewinnungseffizienz bestehen. Pfade mit sehr hoher Effizienz und Pfade mit hoher Effizienz existieren nebeneinander. Eindeutige Pfadabhängigkeiten sind nicht festzustellen.

6.5.4 Zusammenfassung der identifizierten Pfadabhängigkeiten

Die zuvor für die einzelnen Produkte beschriebenen Pfadabhängigkeiten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 234: Zusammenfassung der Pfadabhängigkeiten

Produkt	Dom. Pfad etabliert?	Ineffizienz?	Alternativen vorhanden?	Gründe für Dominanz (a-d; siehe S. 389 Kapitel 6.5.2)
PGM Industriekatalysatoren	✓	✗		
SE Industriekatalysatoren	✓	✓	(✗)	Schwellen
Ge Industriekatalysatoren	✓	✓	✗	
Automobile	✓	✓	(✓)	Regulierung, Netzwerk, Skaleneffekt
Photovoltaikzellen CdTe	✓	✓	(✓)	Schwellen
Photovoltaikzellen CIGS/a-Si	✓	✓	✓	Schwellen
Schleifkeramiken	✓	✓	✗	Schwellen
Keramische Hitzeschutzbeschichtungen	✓	✓	✗	Schwellen
Batterien	✓	✓	✓	Regulierung, Schwellen, Skaleneffekt
Poliermittel	✓	✓	✓	Regulierung, Schwellen
Brennstoffzellen	✗			
Elektrofahrräder	(✗)	(✓)	(✓)	Regulierung, Netzwerk, Schwellen
Rechenzentren	✓	✓	✓	Skaleneffekt

6.6 Kosten und Umweltbelastung der Metallrückgewinnung im Vergleich zur Primärgewinnung

Im folgenden Kapitel werden Kosten und Umweltbelastungen der Primär- und Sekundärerzeugung betrachtet, um die Wirtschaftlichkeit und den erzielbaren Umweltentlastungseffekt des Recyclings durch Substitution von Primärrohstoffen für die einzelnen Metalle abzuschätzen.

Zunächst erfolgt hierzu eine Betrachtung der Kosten der Primärgewinnung und der Preisentwicklungen (Abschnitt 6.6.1). Soweit verfügbar wird hierbei auch auf mögliche zukünftige Preisentwicklungen eingegangen. Die Rohstoffpreise bzw. deren Volatilitäten stellen eine Orientierung bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Recyclingverfahren dar.

Hieran anschließend werden die ökonomischen Kosten der Sekundärgewinnung betrachtet (Abschnitt 6.6.2), wobei hier eine insgesamt schlechte Datenverfügbarkeit festzustellen ist und kaum Informationen bezüglich Kosten und Wirtschaftlichkeit verfügbar sind. Hier erfolgt auf Grundlage der verfügbaren Informationen eine qualitative Abschätzung der Rentabilität der Rückgewinnung, die sich sowohl an den Metallen als auch den untersuchten Produkten orientiert.

Anschließend wird im Kapitel 6.6.3 der kumulierte Energieaufwand der Primär- und Sekundärrohstoffgewinnung dargestellt.

6.6.1 Preisentwicklung und Kosten der Primärgewinnung

6.6.1.1 Gallium

Die folgende Tabelle stellt die Preisentwicklung von Gallium im Zeitraum von 2003 bis 2015 dar. Der Mittelwert im Betrachtungszeitraum lag bei 458 US\$/kg.

Tabelle 235: Galliumpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in US\$ pro kg)

Element	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ga	411	550	538	443	530	579	449	600	781	383	290	235	166

Quelle: US Geological Survey (2013a), Deutsche Agentur für Rohstoffe (2013)

Gallium wird (wie Indium) vor allem als Nebenprodukt bei der Verarbeitung von Bauxit, Zinkblende, Zinn- und z. T. Silbererzen gewonnen. Die größte Relevanz hat die Gewinnung als Nebenprodukt in der Aluminium- (Anteil 90 %) und Zinkproduktion (Strategic Metal Report, 2012). Aluminium und Zink sind anderen Markttreibern als Gallium ausgesetzt. Dies hat zur Folge, dass Marktmechanismen bzw. Preissignale hier nur bedingt zu einer Balance zwischen Angebot und Nachfrage führen: Steigt die Nachfrage nach Gallium, so zieht dies nicht zwingend eine Erhöhung des Galliumangebots nach sich, solange nicht gleichzeitig und gleichermaßen die Nachfrage nach dem Hauptprodukt Aluminium steigt. Auch hierdurch kann eine hohe Volatilität bei der Preisentwicklung von metallurgischen Nebenprodukten wie Gallium erzeugt werden, was die Verfügbarkeit von Gallium wesentlich beeinträchtigen kann (Edison Investment Research 2011). Gerade bei Gallium hat man in den vergangenen Jahren einen Preisverfall aufgrund der hohen Nachfrage nach bzw. Angebot von Aluminium bemerkt (Strategic Metal Report 2012).

Die zukünftige Preisentwicklung wird daher nicht nur davon abhängen, wie sich der Bedarf der Mikroelektronikindustrie und der optischen Industrie entwickelt (Gallium Einsatz als Halbleiter), sondern auch von der Markt- und Preisentwicklung von Aluminium und Zink.

Die Produktionskosten von Gallium sind wie oben genannt abhängig vom Ausgangsrohstoff: Als Nebenprodukt der Aluminiumproduktion kann eine bestimmte Menge Gallium zu relativ niedrigen Kosten gewonnen werden, bei größeren Bedarfsmengen käme es durch veränderte Ausgangsstoffe und Gewinnungsprozesse zu stark ansteigenden Kosten (Wittmer et al. 2010). In Unternehmensberichten erfolgt in der Regel keine Angabe zu den Produktionskosten des Nebenprodukts Gallium, stattdessen wird der Gewinn aus Galliumverkäufen den Total Cash Costs des Hauptprodukts (z. B. Zink, Aluminium) zugerechnet (Hill 2008).

6.6.1.2 Germanium

Die folgende Tabelle stellt die Preisentwicklung von Germanium im Zeitraum von 2003 bis 2015 dar. Der Mittelwert im Betrachtungszeitraum lag bei 1.056 US\$/kg.

Tabelle 236: Germaniumpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in US\$ pro kg)

Element	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ge	380	600	660	950	1.240	1.490	940	1.200	1220	1.214	1.314	1.314	1.204

Quelle: US Geological Survey (2013a), ab 2011: Deutsche Agentur für Rohstoffe (2013)

Nach einem Abfall der Preise in 2009 durch die Weltwirtschaftskrise sind die Preise für Germanium bereits 2010 wieder deutlich angestiegen. Der Preisanstieg ist nicht nur durch eine gestiegene Nachfrage zu erklären, sondern basiert auch auf weiteren Faktoren, wie der Einführung einer chinesischen Exportsteuer auf Germanium-Dioxid, die Schließung einiger chinesischer Produktionsstätten aufgrund von Umweltproblemen sowie der stark gestiegenen Germaniumnachfrage in Japan nach dem Tsunami von 2011. Diese Faktoren werden voraussichtlich auch in Zukunft eine Rolle spielen, jedoch begannen im Jahr 2012 zwei Stätten in den USA mit der Produktion von Germanium, was zu einer Diversifizierung des Angebots beiträgt (US Geological Survey 2013b). Bis ins Jahr 2015 blieben die Preise jedoch vergleichsweise stabil.

Ähnlich wie bei Gallium sind auch bei der Produktion von Germanium die Kosten abhängig vom Ausgangsrohstoff. Reine Germanium-Lagerstätten gibt es nicht und es wird vorrangig als Koppelprodukt der Zinkgewinnung aus dem Mineral Zinkblende gewonnen. Auch in Kohlelagerstätten ist es zu geringen Anteilen vorhanden und kann aus Flugaschen gewonnen werden. In Unternehmensberichten erfolgt in der Regel keine Angabe zu den Produktionskosten des Nebenprodukts Germanium, stattdessen wird der Gewinn aus Germaniumverkäufen den Total Cash Costs des Hauptprodukts (vorrangig Zink) zugerechnet (Hill 2008) (siehe auch oben zu Gallium).

6.6.1.3 Gold

Die folgende Tabelle stellt die Preisentwicklung von Gold im Zeitraum von 2003 bis 2015 dar. Der Mittelwert im Betrachtungszeitraum lag bei 31,36 US\$/kg.

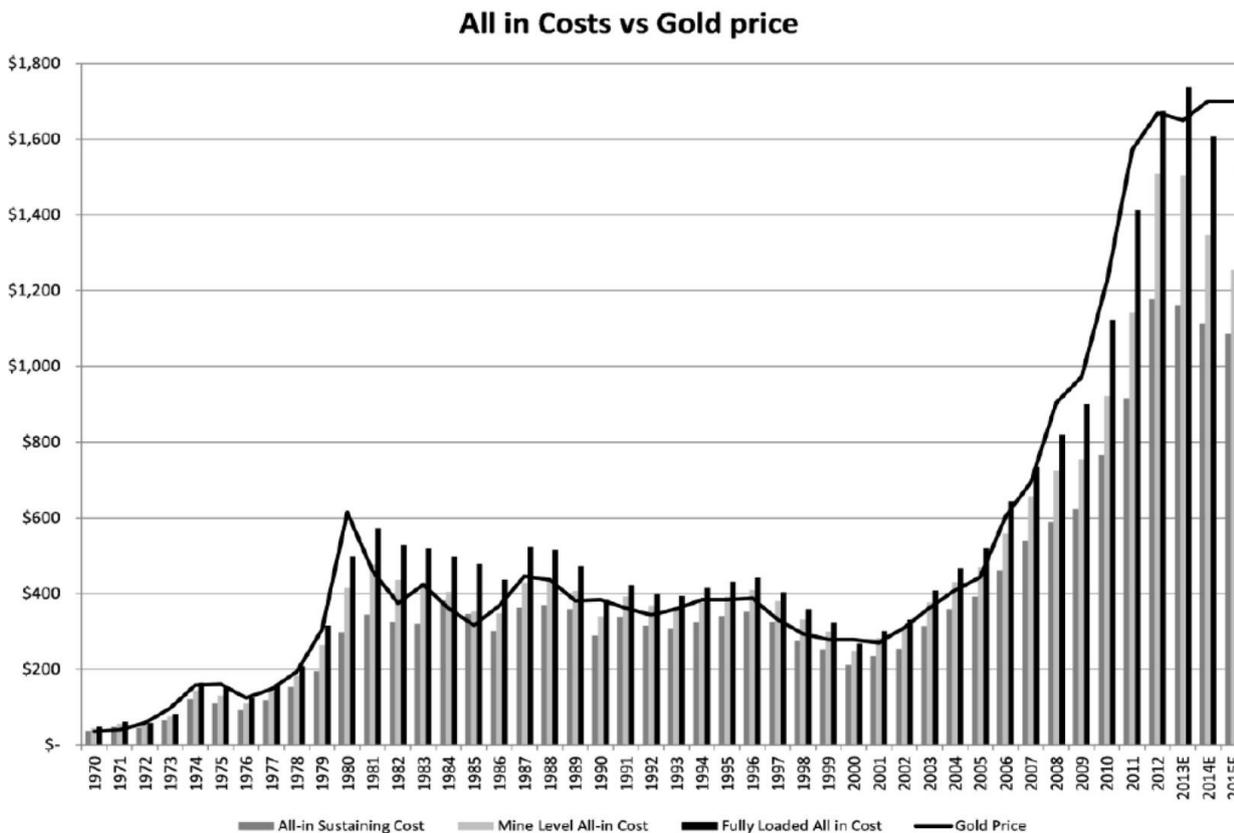
Tabelle 237: Goldpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in Tausend US\$ pro kg)

Element	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Au	11,7 2	13,1 9	14,3 4	19,4 7	22,4 7	28,0 8	31,3 3	39,4 6	50,4 8	53,6 7	45,3 7	40,7 2	37,3 3

Quelle: US Geological Survey (2013a), ab 2011: Deutsche Agentur für Rohstoffe (2013)

Wie in Tabelle ersichtlich, war von 2003 bis 2012 ein stetig ansteigender Goldpreis zu beobachten. Anleger sind in relevantem Umfang verunsichert und investieren so eher in substantielle Werte wie Gold. Danach fiel der Goldpreis stark, was den Spekulationscharakter der Preise betont. Die Einflussfaktoren auf die zukünftige Preisentwicklung sind vielfältig und neben der wirtschaftlichen Entwicklung auch durch Geldzinsen (Stütze für den Goldpreis), Währungseffekte (Wechselkurs Euro-Dollar, da Gold in US-Dollar notiert ist) oder Inflationsängste (Preissteigerung von Gold) beeinflusst. Bis zum Jahr 2020 kann von einer weiteren Verringerung des Goldpreises ausgegangen werden.

Abbildung 68: Gewinnungskosten im Vergleich zum Goldpreis



Quelle: Christie 2013

Total Cash Costs = direkte Kosten (inkl. Verhüttungs-, Transport-, Verkaufskosten und Nebenprodukte; exkl. Abschreibung, allgem. Betriebskosten usw.); All-In Sustaining Costs = Total Cash Costs + Abschreibung + Explorationskosten + allgemeine Betriebskosten

Die Total Cash Costs der Goldgewinnung liegen laut Angaben verschiedener Bergbauunternehmen 2013 bei durchschnittlich 672 US\$/oz (= 21.605 US\$ pro kg). Die All-In Sustaining Costs, ein aussagekräftigeres Maß der tatsächlichen Produktionskosten, liegen dagegen bei 1.086 US\$/oz (= 43.725 US\$ pro kg). Der langfristig haltbare Goldpreis müsste daher in etwa 1.250 US\$/oz (= 40.188 US\$/kg) betragen (Christie 2013).

6.6.1.4 Indium

Die folgende Tabelle stellt die Preisentwicklung von Indium im Zeitraum von 2003 bis 2015 dar. Der Mittelwert im Betrachtungszeitraum lag bei 623 US\$/kg.

Tabelle 238: Indiumpreisentwicklung 2003 bis März 2015 (in US\$ pro kg)

Element	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
In	156	587	946	919	795	685	503	565	693	527	596	718	412

Quelle: US Geological Survey (2013a), ab 2011: Deutsche Agentur für Rohstoffe (2013)

Indium wird vor allem als Nebenprodukt der Zinkerzeugung gewonnen. Die Preisentwicklung von Indium kann daher von der Zinkproduktion beeinflusst werden, wenn die Verfügbarkeit von Indium betroffen wäre (Edison Investment Research 2011). Es wird erwartet, dass der Indiumbedarf in den nächsten Jahren durch die Verwendung in der Elektronikindustrie weiter ansteigen wird. Obwohl Indium auf allen Kontinenten vorkommt, wird es nur von wenigen Ländern (China, Russland, Brasilien) produziert (Polinares 2012). Strukturelle Probleme in diesen Ländern sowie künstliche Verknappung durch Exportrestriktionen können die Verfügbarkeit an Indium daher maßgeblich beeinflussen (Edison Investment Research 2011) (siehe auch Kapitel 4).

Da Indium als Nebenprodukt gewonnen wird, sind die Kosten abhängig vom Ausgangsmaterial. Ausgangspunkt der Primärgewinnung sind Nebenprodukte der Schmelzprozesse der Zinkgewinnung (in geringeren Mengen auch Blei- und Zinnengewinnung); aufgrund niedriger Ausgangskonzentrationen und natürlicher Schwankungen der Zinkerze sind die Kosten der Indiumgewinnung stark abhängig von der Zusammensetzung dieser Nebenprodukte (wie Gallium und Cadmium). Lediglich ca. 50 % des Indiums, das zur Indiumgewinnung geeigneten Prozessen zugeführt wird, kann heute gewonnen werden (Wittmer et al. 2010).

In Unternehmensberichten erfolgt in der Regel keine Angabe der Produktionskosten des Nebenprodukts, stattdessen wird der Gewinn aus Indiumverkäufen den Total Cash Costs des Hauptprodukts (Zink) angerechnet.

6.6.1.5 Platingruppenmetalle

Die folgende Tabelle stellt die Preisentwicklung für die untersuchten Metalle der Platingruppe (Palladium, Platin, Rhodium) im Zeitraum von 2003 bis 2015 dar.

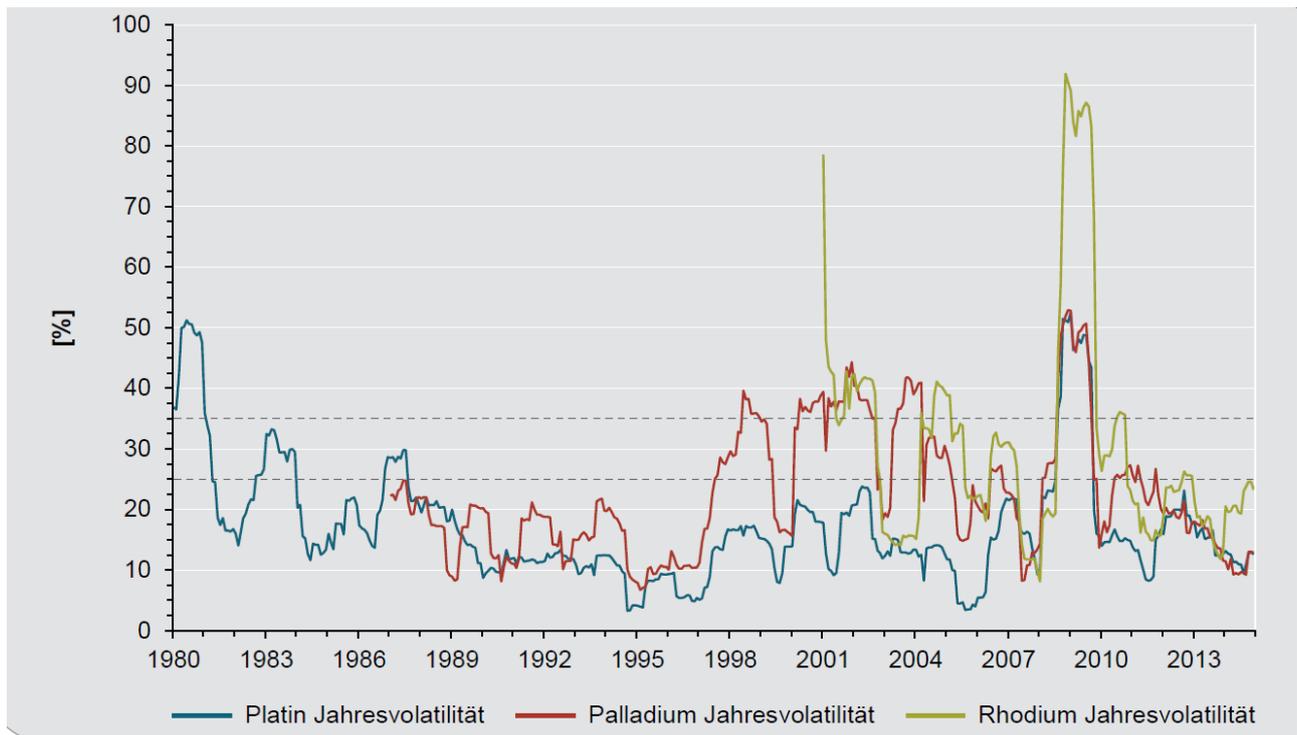
Tabelle 239: Preisentwicklung Platingruppenmetalle 2003 – 2015 (in Tausend US\$ pro kg)

Element	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Mittelwert
Pd	6,5	7,5	6,6	10,4	11,5	11,4	8,6	17,1	23,6	20,7	23,3	25,8	22,2	15,0
Pt	22,3	27,3	28,9	36,8	42,1	50,7	38,8	52,0	55,4	49,9	47,8	44,5	33,9	40,8
Rh	17,0	30,2	66,2	146,6	199,4	210	51,2	79,1	65,1	41,0	33,7	37,1	30,7	77,5

Quellen: US Geological Survey (2013a); Deutsche Agentur für Rohstoffe (2013)

Die Preisvolatilität für die drei Elemente wird in der folgenden Grafik verdeutlicht.

Abbildung 69: Preisvolatilität von Pd, Pt und Rh von 1980 bis 2013



Monatsdurchschnittspreise von Platin (99,5 % LME warehouse), Palladium (99,5 % LME warehouse) und Rhodium (99,9 % LME warehouse), Quelle: Schmidt, M. (2015)

Für die Platingruppenmetalle wird von einer verstärkten zukünftigen Nachfrage ausgegangen. Es wird mit einer gesteigerten Nachfrage durch die Automobilbranche gerechnet (Katalysatoren) und mit stabiler Nachfrage im Bereich Schmuck und Banken. Für Palladium wird von einer sinkenden Nachfrage im Bereich Elektronik (vor allem Keramik Kondensatoren) ausgegangen, die Nachfrage im Bereich Banken wird als stark schwanken eingeschätzt (Schmidt 2015).

Die Kosten der Primärgewinnung nordamerikanischer PGM-Produzenten sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Total Cash Costs südafrikanischer Produzenten werden als deutlich höher eingeschätzt.

Tabelle 240: Kosten US-amerikanischer PGM-Produzenten 2010 bis 2013 (geschätzt)

Bezugsgröße	2010	2011	2012	2013E
Total cash costs / oz	397	420	484	560
Total cash costs/ kg	12.764	13.503	15.560	18.004

Die Total Cash Costs sind im Zeitraum 2007 - 2012 durchschnittlich um 8 % (Nordamerika) bzw. 15% (Südafrika) gestiegen.

Zukünftig ist aufgrund folgender Faktoren mit einem weiteren Kostenanstieg zu rechnen (Stillwater Mining Company 2013):

- Lohnerhöhungen
- steigende Energiekosten
- sinkende Erzkonzentrationen
- tieferliegende Minen

6.6.1.6 Seltene Erden

Seltene Erden werden als Oxide oder Metalle (z.T. auch Mischmetalle) gehandelt. Es existiert kein Börsenhandel und somit sind auch keine offiziellen Preisstatistiken verfügbar; Preise und Qualitätsanforderungen werden direkt zwischen Anbieter und Käufer vereinbart (Elsner 2011). Daher ist die Datenverfügbarkeit nicht für alle Elemente der Seltenen Erden gleichermaßen gegeben. Im Folgenden wird zwischen Seltenen-Erd-Oxiden und -Metallen unterschieden.

Die Preisentwicklung von Seltenen Erden (Metalle) wird in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 241: Preisentwicklung Seltene Erden- Metalle 2003 bis März 2013 (in US\$/kg)

Element	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Jan 13	Feb 13	Mar 13
Ce	3.5	3.5	4.75	4.7	8.8	7.1	7.9	51.5	--	--	--	--	--
Dy	32	50	70	100	123	144.5	147.5	400.0	2850	895.5	730.0	755.0	755.0
Er	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Eu	560	560	550	450	585	785.0	785.0	785.0	--	--	--	--	--
Gd	--	--	--	--	29.75	20.3	18.3	54.5	--	--	--	--	--
La	3.2	3.5	4.05	4.25	7.6	11.3	10.1	60.5	--	--	--	--	--
Nd	6.4	8.2	12.5	28.55	34.75	18.5	29.5	113.5	303.4	98.4	93.0	75.5	75.1
Sm	11.3	12	10.75	11.75	14.95	20.8	20.8	60.5	150.0	46.7	43.0	43.0	43.0
Tb	238	430	430	660	750	600.0	540.0	770.0	4000	2130.5	1980	1980	1961.0
Y	29.5	26	26	24	41	40.0	40.0	78.0	169.5	69.8	62.5	62.5	62.5

Quelle: US Geological Survey (2013a), Deutsche Agentur für Rohstoffe (2013)

Die Preisentwicklung von Oxiden der Seltenen Erden stellt die folgende Tabelle dar.

Tabelle 242: Preisentwicklung von Seltene Erden-Oxiden 2003 bis März 2013 (in US\$/kg)

Element	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Jan 13	Feb 13	Mär 13
Ce	--	--	--	--	--	4.4	4.5	40.3	65.0	18.5	12.5	12.5	12.5
Dy	--	--	--	--	--	110.0	100.0	261.3	2187.0	748.0	675.0	675.0	658.3
Er	--	--	--	--	--	--	--	89.0	224.6	79.2	70.0	70.0	70.0
Eu	--	--	--	--	--	475.0	450.0	573.0	3775.0	1713.5	1575.0	1500.0	1356.0
Gd	--	--	--	--	--	110.0	100.0	295.0	--	--	190.0	172.0	164.0
La	--	--	--	--	--	7.8	6.3	39.3	94.0	22.5	18.5	18.5	18.1
Nd	--	--	--	--	--	27.0	14.0	64.0	243.0	78.7	75.5	75.5	75.1
Sm	--	--	--	--	--	--	--	34.0	78.4	24.8	37.0	23.5	23.5
Tb	--	--	--	--	--	650.0	350.0	569.5	2787.5	1275.0	1180.0	1180.0	1161.0
Y	--	--	--	--	--	--	--	43.3	115.0	38.6	33.0	33.0	33.0

Quelle: Metal Pages (2012), Ökoinstitut / The Greens – EFA Group (2011a), Institut für Seltene Erden und Metalle (2013)

Eine differenzierte und homogene Datengrundlage liegt für die Jahre ab 2011 von der DERA vor (BGR 2015), die in der folgenden Tabelle wiedergegeben ist.

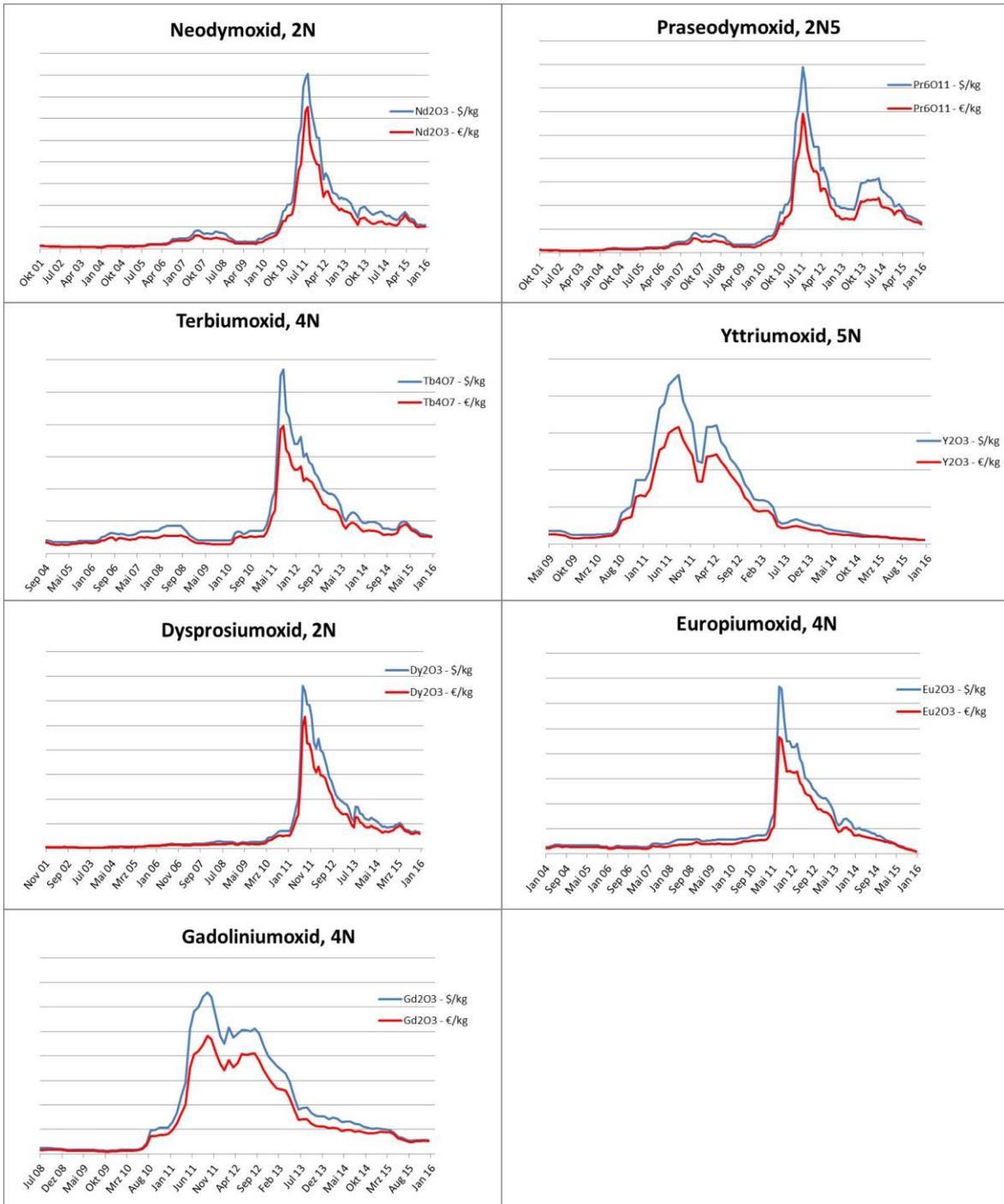
Tabelle 243: Preisentwicklung von Seltene Erden-von 2011 bis 2013 (in US\$ /kg)

Rohstoff / Spezifikation	2011	2012	2013	2014	2015
Cerium (oxide), min. 99 %, fob China	97,72	24,97	7,90	4,90	2,39
Dysprosium (metal), min. 99 % fob China	1.921,91	1.673,58	698,65	514,55	360,65
Dysprosium (oxide), min. 99 % fob China	1.480,99	1.203,47	557,03	372,56	270,73
Erbium (oxide), min. 99 %, fob China	234,51	150,66	67,86	67,02	42,92
Europium (oxide), min. 99 % fob China	2.862,63	2.610,08	1.101,96	771,38	269,31
Lanthanum (oxide), min. 99 %, fob China	98,20	25,97	7,91	5,36	2,68
Lanthanum (oxide), min. 99,999 %, fob China	140,80	57,77	20,39	9,25	5,83
Neodymium (metal), min. 99 % fob China	317,18	163,11	90,93	91,41	63,30
Neodymium (oxide), min. 99 % fob China	247,57	124,09	72,05	65,05	47,33
Praseodymium (metal), min. 99 %, fob China	251,67	168,17	104,59	163,50	101,73
Praseodymium (oxide), min. 99 %, fob China	202,18	117,67	91,74	118,00	67,40
Samarium (metal), min. 99 % fob China	155,96	107,22	37,42	28,39	17,41
Samarium (oxide), min. 99 % fob China	104,16	58,02	14,55	5,95	2,50
Scandium (oxide), mind. 99,5 %, China	23.785,74	26.277,78	22.507,94	18.961,23	11.352,79
Terbium (metal), min. 99 %, fob China	2.890,85	3.063,45	1.356,06	857,70	718,81
Terbium (oxide), min. 99,9 %, fob China	2.298,79	2.034,65	925,29	657,24	546,61
Yttrium (metal), min. 99 %, fob China	166,79	150,70	58,71	60,31	44,38
Yttrium (oxide), min. 99,999 %, fob China	141,38	110,20	25,87	15,28	6,81

Quelle: DERA Preismonitor verschiedene Jahre

Die langfristigen Preisvolatilitäten werden in den folgenden Grafiken dargestellt.

Abbildung 70: Volatilität der Preise von Seltenen Erden



Quelle: Tradium 2016

Preisprognose

Die Preise für Seltene Erden sind in den vergangenen Jahren stark. Prognosen zu Folge wird in Zukunft die Preisentwicklung von leichten und schweren Seltenen Erden immer stärker auseinander gehen. Durch die Öffnung neuer Produktionsstätten, vor allem in Australien und den USA, ist

bei den leichten SE zukünftig weltweit von einer Überproduktion auszugehen. Bei den schweren seltenen Erden wird dagegen die Produktion weiter unter der nachgefragten Menge liegen, was voraussichtlich zur Folge haben wird, dass a) Seltene Erden in Magneten und anderen Anwendungen zunehmend durch alternative Materialien ersetzt werden und so die Nachfrage sinkt und / oder b) weitere Produktionsstätten erschlossen werden. Insgesamt bleibt davon auszugehen, dass die Preise für die meisten schweren SE steigen werden und sich dann im Vergleich zu den leichten SE auf höherer Ebene stabilisieren.

In China hat seit 2011 ein Kurswechsel stattgefunden: 2012 wurden nur 40 % der festgesetzten Exportquote überhaupt ausgenutzt, die Quote hatte also keinen Einfluss auf das Angebot an Seltenen Erden. Zusätzlich wurden Subventionen für die Produktion Seltener Erden beschlossen. Diese neue Herangehensweise wird die Preisvariabilität vermutlich in Zukunft reduzieren. Von bewussten Exportkürzungen durch China ist nicht länger auszugehen, dennoch werden Japan und andere große Konsumenten Seltener Erden vermutlich versuchen, durch weitere Produktionsstätten das Angebot zu diversifizieren (Goldman Sachs 2013).

Unsicherheit besteht in Bezug auf folgende Einflussfaktoren, welche die obigen Einschätzungen beeinflussen könnten (Goldman Sachs 2013):

- Chinesische Strategien und Policen in Bezug auf Produktion, Export, und Vorräte
- Illegale Exporte aus China (die zurzeit ca. 20 % der in Verkehr gebrachten Menge an SE ausmachen)
- Nachfrageentwicklung (abhängig von bspw. Entwicklung der Windenergiebranche, Elektroautos, Touchscreens etc.)

Weiterhin ist mit einer Konsolidierung des Markts zu rechnen; von den 250 Seltene Erden-produzierenden Firmen im Jahr 2013 wird vermutlich eine relevante Anzahl entweder schließen oder von größeren Firmen vereinnahmt werden. Dies wird insbesondere den Bereich der leichten Seltenen Erden betreffen. Die von Japan auf dem Meeresboden entdeckten Vorkommen werden in absehbarer Zeit vermutlich keine wichtige Rolle spielen, da die Produktion von Seltenen Erden außerhalb von China zunimmt und so die Preislage stabilisiert werden wird, besonders was leichte Seltene Erden betrifft. Eine Reihe von Produktionsstätten u.a. in Australien, USA, Brasilien, Kanada und Grönland befindet sich bereits in der Erkundungs- bzw. Planungsphase (KPMG 2012).

Kosten der Primärgewinnung

Zu den Produktionskosten Seltener Erden liegen kaum Daten vor. Da diese zum Großteil in China produziert werden, wo umfassende Unternehmensberichte mit Angabe der Kostenstrukturen unüblich sind, ist die Datenlage hier sehr schlecht (Westphal 2013). Die folgenden Angaben stammen von Molycorp, einem US-amerikanischen Produzenten Seltener Erden und beziehen sich auf Schätzungen der chinesischen Durchschnittskosten sowie des australischen Konkurrenten Lynas Corp (Allen 2011). Demnach lagen die durchschnittlichen Produktionskosten von Seltene Erden-Oxiden je kg zwischen 2,77 \$ (Molycorp) und 10,11 \$ (Lynas). In derselben Quelle wurden durchschnittliche Produktionskosten von Seltene Erden-Oxiden in China 5,58 \$ je kg angegeben. In einer vorläufigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung südafrikanischer Vorkommen geht Frontier Rare Earth (2013) von 13,08 US\$ an durchschnittlichen Produktionskosten je kg SE-Oxid aus.

6.6.2 Kosten der Sekundärproduktion

Ausgehend von der insgesamt unbefriedigenden Datenverfügbarkeit zu konkreten Kosten der Gewinnung von Sekundärrohstoffen, sollen in der nachfolgenden Betrachtung qualitative Abschätzungen zur Rentabilität der Sekundärgewinnung der relevanten strategischen Metalle vorgenommen werden. Ziel ist es dabei zu beurteilen, wie sich die Wirtschaftlichkeit der Sekundärgewinnung der Metalle je nach Anwendungsgebiet und insgesamt von Metall zu Metall unterscheidet. Die dabei zugrunde gelegte Annahme lautet, dass die Existenz von Recyclingunternehmen bzw. -systemen für Metalle und insbesondere Produktabfälle am Markt als Indikator für eine bereits heute, unter den aktuell geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen gegebene Rentabilität gewertet werden kann. Bei Verfahren, die den Entwicklungsstand von Demonstrations- oder teilweise auch Pilotanlagen erreicht haben, lässt sich zumindest eine gewisse Wahrscheinlichkeit für eine mittelfristige Rentabilität vermuten. Diese Einschätzungen sind zwar mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, ermöglichen jedoch eine erste Klassifizierung der in ReStra betrachteten Metalle und ihrer Anwendungsbereiche.

Ausgangslage der Untersuchung ist die empirische Recherche zum Entwicklungsstand von Recyclingtechnologien für ReStra-Zielelemente (siehe Kapitel 6.1.2). Zusätzlich wurden weitere Quellen zu aktuellen Marktentwicklungen ausgewertet. Zur Interpretation der folgenden Einschätzungen sind zwei grundsätzliche Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Rentabilität der Rückgewinnung einzelner Metalle ist in nahezu keiner der betrachteten Metall-/Produktkombinationen isoliert für ein einzelnes Metall bewertbar. Wenn für einzelne Metalle von einer wirtschaftlichen Rückgewinnung gesprochen werden kann, so ist dies nicht allein der Rückgewinnung eines einzelnen Metalls geschuldet, sondern auf die Gesamtheit der zurückgewonnenen Metalle mit hoch spezifizierten technologischen Verfahren und Verfahrenskombinationen zurückzuführen.
- Eine detaillierte Bewertung der Rentabilität müsste zwischen notwendigen Investitionskosten in Anlagen zur Separierung und Rückgewinnung sowie laufenden Kosten differenzieren. Dies ist bei vielen der betrachteten Produkte von besonderer Relevanz, da sie zurzeit noch nicht in den notwendigen Mengen als Abfall anfallen, die Investitionen in Behandlungs- und Rückgewinnungsanlagen rechtfertigen würden.

6.6.2.1 Gallium (Ga)

Die Rückgewinnung von Gallium aus Produktionsabfällen ist bereits ein etablierter Prozess und ersetzt einen relevanten Teil des Primäreinsatzes (bis zu 50 % (Thema und Irrek 2010)).

Laut einer Studie des Bio Intelligence Service aus dem Jahr 2011 ist die Rückgewinnung von Gallium aus Photovoltaik-Modulen derzeit noch nicht rentabel (BioIS 2011). Dies liegt in erster Linie darin begründet, dass das anfallende Abfallvolumen in diesem Bereich noch zu klein ist. Ein im Jahr 2003 initiiertes Pilotprogramm der Deutschen Solar zu kristallinen Siliziummodulen wurde inzwischen aufgrund der niedrigen anfallenden Mengen wieder gestoppt. Es wird geschätzt, dass das Recycling siliziumbasierter Zellen ab einer anfallenden Menge von etwa 20.000 Tonnen pro Jahr ökonomisch attraktiv würde. Für das Jahr 2014 wird von einer Menge in der Größenordnung von 5.000 t ausgegangen.

Insgesamt ist die zukünftige Anwendbarkeit sich in Entwicklung befindlicher Recyclingtechnologien zurzeit noch schwer einzuschätzen. Die hierdurch recycelten Produkte sind nur bedingt re-

präsentativ und die tatsächliche ökonomische Rentabilität des PV-Recyclings ist abhängig von zukünftiger Forschung und Entwicklung im Bereich Solarpanels sowie Anstrengungen, die zu Test und Inbetriebnahme entsprechender Recyclingtechnologien unternommen werden. Mit der Rückgewinnung von Gallium aus CIGS-Photovoltaikmodulen beschäftigen sich in Deutschland derzeit vier Unternehmen: Saperatec in Bielefeld und Loser Chemie in Langenweißbach betreiben jeweils Pilotanlagen, Solarcyle in Bitterfeld plant den Bau einer Recyclinganlage, während Lobbe in Espenhain Versuche im Labormaßstab fährt⁶⁷. Weiterhin wurden in der Vergangenheit mit Förderprogrammen wie beispielsweise „Resolve“ Rahmenbedingungen für die Untersuchung entsprechender Recyclingverfahren geschaffen. Angesichts der Zukunftsrelevanz von Solaranlagen einerseits und deren Erfassung als Monofraktion andererseits (Vorteil zum Beispiel gegenüber Elektroaltgeräten, die mit einer Vielzahl unterschiedlicher Produkte in Sammelgruppen erfasst werden) ergeben sich hier zukünftig relevante Mengenpotenziale und damit eine günstige Ausgangslage für eine wirtschaftliche Etablierung der Recyclingtechnologien.

Die Rückgewinnung von Gallium aus LED in Anzeigetafeln wird jedoch im Betrachtungszeitraum des ReStra-Projektes nicht rentabel werden, da eine Separation einer ausreichend hoch konzentrierten galliumreichen Fraktion derzeit nicht möglich ist. Trotz der hohen Anzahl von LEDs je Anzeigetafel wird wegen der geringen Gesamt mengenrelevanz (äußerst geringe Menge pro Stück) und des fehlenden Mitnahmeeffekts eines LED-Recyclings in anderen Bereichen keine wirtschaftliche Rückgewinnung bis 2020 erwartet. Die LED-Beleuchtungstechnik wird inzwischen zwar nahezu überall eingesetzt, größere Rücklaufmengen werden aber wegen ihrer jungen Marktrelevanz und der außerordentlich langen Lebensdauer von LEDs im Betrachtungszeitraum des ReStra-Projektes nicht erwartet. Je nach Anwendungsbereich wird zwar bereits in den nächsten Jahren ein kontinuierlicher Rücklauf von Produkten beginnen (z. B. Laptop mit LED-Hintergrundbeleuchtung), eine signifikante Mengenrelevanz ist jedoch nicht absehbar. Die Entwicklung einer spezifischen Recyclingtechnologie für die Rückgewinnung strategischer Metalle in LEDs zeigt daher insgesamt bisher keine markttechnische Rechtfertigung und wird daher erst langfristig an Bedeutung gewinnen.

6.6.2.2 Germanium (Ge)

Mehr als die Hälfte des Germaniums am Markt stammt aus dem Recycling (bis zu 60 %, Thema und Irrek 2010). Allerdings wird der Sekundärrohstoff überwiegend aus Produktionsabfällen gewonnen, wie etwa die Germaniumrückgewinnung im Produktionsprozess von Glasfaserkabeln, eine Rückgewinnung aus EoL-Produkten wird derzeit nicht praktiziert⁶⁸. Beispielsweise erweist sich die Rückgewinnung von Germanium aus Polymerisationskatalysatoren als praktisch unmöglich, da das Metall während der Nutzung im Produkt vollständig dissipativ verteilt wird. Eine Rückgewinnung von Germanium aus optischen Fasern ist aufgrund der stabilen Einbindung in eine kristalline Matrix nur mit hohen Energieaufwendungen möglich. Hier ist daher auch bis 2020 keine wirtschaftliche Praxis der Germaniumrückgewinnung zu erwarten.

⁶⁷ Siehe Kapitel 6.2.3.4.

⁶⁸ Siehe Kapitel 6.1.

6.6.2.3 Gold (Au)

Die Sekundärgewinnung von Gold aus ReStra-Altprodukten kann in hoch-technisierten Anlagen, wie etwa bei Umicore oder Boliden, bereits wirtschaftlich durchgeführt werden⁶⁹. Rahmenbedingungen sind dabei die bestehenden Sammel- und Aufbereitungssysteme für Altprodukte, bei denen z. B. für Elektronikaltgeräte Synergien aus der Sammlung von anderen Geräten und dem Recycling von anderen Rohstoffen erreicht werden. Hierdurch kann in den Rückgewinnungsanlagen Gold auch aus solchen Elektronikkomponenten rentabel recycelt werden, die geringe Goldgehalte haben.

Der Goldgehalt in Rechnerplatinen und Kontakten von Rechenzentren ist so hoch, dass eine Rückgewinnung auch bei der Einbeziehung der Kosten aus Rückbau, Transport und (oft manueller) Separation rentabel ist. Für Platinen mit einem erhöhten Aufwand für die Separation (z. B. aus Festplatten) ist eine Rentabilität des Recyclings auch bei manueller Separation gegeben, wenn Synergien aus der erzielbaren höheren Reinheit anderer Fraktionen (z. B. Aluminium) genutzt werden können. Bei Platinen aus Flachbildschirmen ist z. B. ein Synergieeffekt aus der Entfrachtung möglich, wenn die Bildschirme eine quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung enthalten.

Im Gegensatz dazu ist die Rückgewinnung von Gold aus LED (z. B. aus Anzeigetafeln), ähnlich wie bei Gallium, in absehbarer Zeit nicht als wirtschaftlich einzuschätzen. Geringe Rücklaufmengen in ganz unterschiedlichen Produkten und äußerst geringe Mengen pro LED-Chip machen eine ökonomische Rückgewinnung auch in Zukunft wenig wahrscheinlich, da der Aufwand für die Aufkonzentration für eine rentable Verarbeitung in Rückgewinnungsverfahren zu hoch ist bzw. entsprechende Techniken nicht zur Verfügung stehen (siehe auch Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2.3).

6.6.2.4 Indium (In)

Das bisher eingesetzte Sekundärindium stammt zu 99 % aus dem Recycling von Produktionsabfällen (UNEP 2011). Dabei ist die Indiumrückgewinnung grundsätzlich technisch umsetzbar. Allerdings ist eine Separation des Indiums aus dem Geräte- bzw. Komponentenverbund notwendig, um eine ausreichend hohe Konzentration im Inputmaterial der Hydrometallurgie zu erreichen. In Anbetracht des dominierenden Einsatzes von Indium in Form von ITO in Flachbildschirmen (Anteil von 74 % an der Gesamtnachfrage, Oakdene Hollins 2011) ergeben sich hier zukünftig ggf. relevante Recyclingpotenziale. Die Untersuchungen von Böni (2015) zeigen jedoch, dass eine rentable Rückgewinnung unter marktüblichen Kostenbedingungen derzeit nicht realisierbar ist.

Das Recycling von Photovoltaikmodulen befindet sich derzeit noch im Entwicklungsstadium. Ob bis 2020 die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit bei der Rückgewinnung von Indium überschritten wird, ist unklar. Hier sind zum einen die Kosten des Verfahrens selbst und mögliche Synergien aus der Rückgewinnung anderer Rohstoffe von Bedeutung, aber auch die Frage, welche Mengen Photovoltaik-Altmodule in andere Verfahren laufen, bei denen die Kosten geringer sind (z. B.: einfache Schredderverfahren zur Rückgewinnung von Glas in niedrigwertigeren Produkten wie

⁶⁹ Siehe Kapitel 6.1.

z. B. Glasisoliermaterial). Einfluss hat auch die Substitution von Indium, die z. B. in CdTe-Modulen von FirstSolar in aktuellen Produkten bereits realisiert ist.

Das Recyclingpotenzial der LED-Chips aus LED-Anzeigetafeln ist für Indium als sehr gering einzuschätzen (der Indiumwert einer LED liegt unter 0,03 Cent, Thema und Irrek 2010) und eine wirtschaftliche Konstituierung bis 2020 daher unwahrscheinlich (siehe *Gallium*).

6.6.2.5 PGM

Die Rückgewinnung von Rhodium, Palladium und Platin aus Autokatalysatoren erfolgt in langjährig etablierten ausgereiften Verfahren. Spezialisierte Anlagen wie etwa Umicore gewinnen mit pyrometallurgischen Prozessen die Platingruppenmetalle zurück⁷⁰. Insgesamt können PGM aus den relevanten Katalysatorarten bereits gegenwärtig wirtschaftlich zurückgewonnen werden.

Das Recycling von Brennstoffzellen zur Rückgewinnung von PGM erfolgt bisher größtenteils im Labormaßstab oder beschränkt sich auf einzelne Pilotanlagen. Eine Überschreitung der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen wird bei ausreichend großen Rücklaufmengen aufgrund der hohen Preise für PGM erwartet. Beispielsweise hat Umicore ein Rücknahmesystem für Brennstoffzellen etabliert und sichert sich damit entsprechende Mengen für einen wirtschaftlichen Betrieb ihrer Verwertungsanlage, die ebenfalls Edelmetalle zurückgewinnt.

Auch aus Rechenzentren werden PGM bereits im Industriemaßstab zurückgewonnen. Die Wiedergewinnung von PGM aus Elektroaltgeräten wird wirtschaftlich mit Rückgewinnungsraten von über 90 %, bezogen auf die Metallrückgewinnung, praktiziert.⁷¹ Der tatsächliche Wirkungsgrad der Prozesse hängt von der Inputfraktion ab: Das Maß der erzielten Aufkonzentrierung der Metalle stellt dabei die wesentlichen Anforderungen an den Rückgewinnungsprozess. Je größer der Reinheitsgrad der Inputfraktion ist, desto effizienter der Rückgewinnungsprozess. Demzufolge kann eine Optimierung der Demontage und Vorsortierung hinsichtlich der Erzeugung einer Konzentration der Wertstoffe die Wertstoffausbeute des Metallrückgewinnungsprozesses erhöhen. Die Mehrkosten einer manuellen Demontage, die im Vergleich zur maschinellen Demontage heute i.d.R. hochgradigere Wertstofffraktionen erzeugen kann, werden allerdings derzeit nicht durch die potenziell höheren Rückgewinnungsraten kompensiert. Die zunehmende Substitution von PGM in Elektronikkomponenten (beispielsweise Keramikkondensatoren) und die fortschreitende Miniaturisierung führen zu einer Verringerung der Menge der PGM je Elektronikgerät. Die Auswirkungen dieser Tendenz (bei gleichzeitigem erhöhten Durchsatz der Anzahl von Geräten z. B. durch verringerte Nutzungsdauern) werden allerdings für den Betrachtungszeitraum des ReStra-Projektes als gering erachtet.

6.6.2.6 Seltene Erden

Recyclinganlagen und -technologien für das Recycling Seltener Erden sind bisher insgesamt nur in seltenen Einzelfällen bereits zur Marktreife entwickelt, gleichzeitig standen sie in den letzten

⁷⁰ Siehe Kapitel 6.2.3.

⁷¹ Siehe Kapitel 2.2.21.3.

Jahren jedoch im Fokus einer Vielzahl von Pilot- und Forschungsprojekten (siehe auch Kapitel 6.1 dieses Berichts). Bisherige Recyclingverfahren arbeiten mit Produktionsabfällen. Abfälle aus dem Post-Consumer-Bereich werden nicht großtechnisch verwertet. Dies ist unter anderem auf die Heterogenität der Post-Consumer-Abfälle bei gleichzeitiger dissipativer Anwendung Seltener Erden, die relativ geringen bzw. sehr volatilen Preise für die meisten dieser Metalle und die komplexen Rückgewinnungsprozesse zurückzuführen.

Aufgrund der starken Mengenzuwächse und der strategischen Relevanz der betrachteten Metalle laufen jedoch derzeit eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, deren Fokus vor allem auf Magneten, Batterien, Leuchtmitteln sowie Katalysatoren liegt. In einigen Unternehmen werden jedoch auch großtechnische Recyclingtechnologien entwickelt ohne Details der individuellen Prozesse zu veröffentlichen, da diese grundsätzlich als Wettbewerbsvorteil gesehen werden und somit urheberrechtlich geschützt bleiben sollen (EPA 2012). Grundsätzlich sind die Recyclingprozesse für Seltene Erden sehr komplex. Oftmals ist eine aufwendige Separation der Seltenen-Erden-Komponenten Voraussetzung für ein Recycling (wie z. B. bei Magneten aus Festplatten). Gleichzeitig trägt das Investment in Recyclinganlagen aufgrund der volatilen Preisentwicklungen bei den strategischen Rohstoffen zurzeit ein hohes Risiko für Investoren. Gründe dafür sind zum einen, dass die meisten Recyclinganlagen aufgrund der komplexen Technologien eine langfristige Investition erfordern; zum anderen gibt es eine Vielzahl an Abbauprojekten, deren Umsetzung noch nicht sicher ist. Sollte eine hohe Zahl an Projekten realisiert werden, könnten die Preise für Seltene Erden mittel- bis langfristig erneut sinken, was der Recyclingwirtschaft die ökonomische Basis entziehen würde. Gleichzeitig sind verlässliche Daten über die Nachfrage- und Angebotssituation selten, die Vorräte Seltener Erden von Unternehmen und Nationen nicht bekannt und Spekulationen auf die Preise Seltener Erden möglich, die Turbulenzen auf dem Markt verursachen könnten (Öko-Institut 2011).

6.6.2.7 Zusammenfassung

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Rentabilität der Sekundärgewinnung der Metalle zusammengefasst. Eingeflossen sind dabei neben den Untersuchungen aus den Kapiteln 6.1, 6.2, 6.3, 6.5 und 6.6 vor allem Gespräche mit Experten der jeweiligen Verwertungsverfahren.

Dabei wird die Sekundärgewinnung als unwirtschaftlich eingeschätzt, wenn sie mit einem „-“ gekennzeichnet ist, als an der Grenze zur Wirtschaftlichkeit bis 2020, wenn sie mit „0“ versehen ist und als wirtschaftlich, wenn sie mit „+“ bewertet wurde. In einzelnen Fällen wurde eine Bandbreite angegeben (von ... bis ...), wenn sich die Rentabilität wie z. B. wie im Elektronikbereich stark zwischen einzelnen Produkten unterscheidet.

Tabelle 244: Rentabilität der Sekundärgewinnung von ReStra-Zielelementen aus ReStra-Altprodukten - qualitative Abschätzung

ReStra Altprodukt	Au	Ce	Dy	Er	Gd	Ga	Ge	In	La	Pd	Pt	Rh	Sm	Tb	Y
Autokatalysatoren		-/0							-/0	+	+	0			-
Automobilkomponenten			0											-	
Batterien		0							0				-		
Brennstoffzellen									0						0
Faseroptik				-											
Haushaltsanwendungen			0											-	
Hitzeschutzkeramiken															-
Hochtemperatursupraleiter															-
Industriekatalysatoren							-		-	0/+	0/+	-			-
Laseranwendungen				-											-
LED	-					-		-							-
Metallurgie															
MRT			0												
Optisches Glas				-			-								
Photovoltaik								-/0							
Poliermittel		-							-						
Rechenzentren	+									+	+				
Röntgengeräte					-										
Schleifkeramiken															+
Spezialgläser		-													
Strahlenschutzgläser		-													
Windenergieanlagen			+											+	

Anmerkung: Die Tabelle stellt die Situation für die Auswahl der ReStra-Zielelemente dar (siehe Kapitel 4). Aufgrund der Abschneidekriterien (siehe Methodenbeschreibung in Kapitel 5.1) wurde Neodym nicht als Fokusmetall ausgewählt. Zur Verdeutlichung von Mengenströmen wurde Neodym jedoch teilweise mit in die Betrachtung einbezogen, da hierfür teilweise eine bessere Datenlage verfügbar war und es oftmals in bekannten Massenverhältnissen zu anderen Seltenerdmetallen eingesetzt wird. Da Seltene Erden aus Magneten in der Regel gemeinsam zurückgewonnen werden, wird in den Handlungsempfehlungen ebenfalls Neodym mit betrachtet.

Die Wirtschaftlichkeit der Sekundärgewinnung ist einerseits massiv von der Anwendung abhängig. Andererseits - und dies wird in der oben dargestellten Matrix nicht erfasst - auch von der zurückgewonnenen Materialvielfalt. In vielen Fällen rechnet sich der Betrieb einer komplexen Rückgewinnungsanlage - aber auch von einigen Behandlungsschritten zur Separation von Komponenten - dann, wenn mehrere ReStra-Zielelemente im Fokus sind oder wenn die ReStra-Zielelemente als „Beifang“ bei dem Recycling anderer gewinnbringender Rohstoffe gewonnen werden können (z. B. Kupfer als Wertträger beim Recycling von Elektronik oder die Gewinnung von einer reinen Aluminiumfraktion bei dem Recycling von Festplatten).

6.6.3 Umweltbelastungspotenzial der Primär- und Sekundärproduktion

6.6.3.1 Kumulierter Energieaufwand KEA

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) gibt nach VDI 4600 die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwandes an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA_H), die Nutzung (KEA_N) und die Entsorgung (KEA_E) des ökonomischen Guts dar, wobei für diese Teilsummen anzugeben ist, welche Vor- und Nebenstufen mit einbezogen sind: $KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$.

Nach den Korrelationsanalysen von Giegrich et al. (2012) kann der KEA in erster Näherung als repräsentativer Indikator für Umweltbelastungen herangezogen werden.

6.6.3.2 Allokationsfragen

Um die Umwelteinflüsse von Material- und Energieflüssen eines Produkts zu bestimmen, bedient man sich der Methode des Life Cycle Inventory (LCI). Dabei hat die Allokation (Zuordnung) einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis (Ekvall und Finnveden 2000).

Die Definition der Allokation ist: Die Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem oder zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen (DIN EN ISO 14040). Allokationsverfahren werden benötigt, um Systeme zu verrechnen, die mehr als ein Produkt bereitstellen (z. B. Koppel- und Nebenprodukte) oder Zwischenprodukte oder Rückstände verwerten.

Das erste Allokationsproblem meint einen multifunktionalen Prozess, der eine oder mehrere Funktionen im Lebenszyklus des untersuchten Produkts erfüllt und gleichzeitig eine oder mehrere Funktionen im Lebenszyklus anderer Produkte einnimmt. Die Frage, die sich hier stellt, ist, welcher Anteil an Umweltbelastungen (Ressourcenverbrauch, Emissionen, Abfall) die durch den multifunktionalen Prozess entstehen, dem untersuchten Produkt zugeordnet werden soll (Ekvall und Finnveden 2000).

Das zweite Allokationsproblem tritt im sogenannten „open-loop“-Recycling auf. Hier wird Material, das einem Produktlebenszyklus zugeordnet ist, recycelt und anschließend in einem anderen Produktlebenszyklus eingesetzt. Somit erfüllen die Primärproduktion, das Recycling und das Abfall-Management des Materials im untersuchten Produktlebenszyklus auch eine Funktion für die zeitlich darauffolgenden Produktlebenszyklen. Hier stellt sich die Frage, wie die Umweltbelastungen, die entlang des untersuchten Produktlebenszyklus auftreten, zwischen den Kaskaden-Produkten verteilt werden sollen (Ekvall und Finnveden 2000). Die Behandlung von Recyclingströmen in der Ökobilanz stellt eine Frage der Zuordnung dar. Daher ist - wenn die Lebenszyklengrenzen überschritten werden - über eine Verteilung der Lasten nachzudenken und eine nachvollziehbare begründete Entscheidung zu treffen (Baitz und Kreisig 2007).

Die beiden Allokationsfragen haben verschiedene Aspekte gemein. Multifunktionale Prozesse wie auch das open-loop-Recycling sind Multifunktionssysteme. Genauer gesagt, sind die Primärproduktion, das Recycling und das Abfall-Management des open-loop-Recyclings multifunktionale Prozesse, da sie für verschiedene Produktlebenszyklen verschiedene Funktionen erfüllen: Primärmaterial für den ersten Lebenszyklus und das recycelte Material für die nachfolgenden Lebenszyklen. Es gibt verschiedene Ansätze die Allokationsprobleme zu lösen, allerdings variieren sie in den Ergebnissen und den daraus gewonnen Informationen (Ekvall und Finnveden 2000).

6.6.3.3 Energieaufwand der Produktion strategischer Metalle

Die Sekundärproduktion von ReStra-Zielelementen hat im Vergleich zur Primärproduktion ein deutliches Potenzial für einen verringerten Energieaufwand. Die verfügbaren Daten zum KEA bei Primär- und Sekundärrohstoffen erlauben bei aller Lückenhaftigkeit die generelle Aussage, dass sich die Rückgewinnung von Metallen in modernen Prozessen in der Regel deutlich energieeffizienter darstellt als das Schmelzen von Metallen aus Erzen (vgl. UNEP 2011, 2013). Damit verursacht das Recycling nur einen Bruchteil der CO₂ Emissionen und hat bezüglich Landnutzung und gefährlicher Emissionen signifikante Vorteile im Vergleich zum primären Abbau. So benötigt beispielsweise die vergleichsweise gut dokumentierte Produktion von einem Kilogramm Aluminium durch Recycling nur ein Zehntel oder weniger der Energie, welche für die Primärproduktion aufgewandt wird, und vermeidet gleichzeitig 1,3 kg Bauxitabfälle, 2 kg CO₂-Emissionen und 0,011 kg SO₂-Emissionen (EPA 2012). Für den Bereich Kupfer zeigt die folgende Tabelle, dass auch hier mit dem Einsatz von Sekundärrohstoffen deutliche Umweltentlastungspotenziale verbunden sind.

Tabelle 245: Vorteile und Auswirkungen des Recyclings von Kupfer aus Gewerbe-, Industrie- und Abbruchabfällen (pro Tonne). Vorteile werden negativ, Auswirkungen positiv dargestellt.

Auswirkungskategorie	Einheit	Recyclingprozessauswirkungen	Vermiedene Prozessauswirkungen			Nettonutzen des Recyclings
			Sammlung und Deposition	Produktion von Primärmaterial	Gesamt vermiedene Auswirkungen	
		Sammlung, Sortierung und Wiederverwertung				
Globale Erwärmung	t CO ₂	1,85	-0,01	-5,27	-5,28	-3,43
Kumulativer Energieaufwand	GJ LHV	21,24	-0,13	-57,20	-57,34	-36,09
Wasserverbrauch	kL H ₂ O	1,79	0,00	-7,76	-7,76	-5,97
Feststoffabfall	t	0,09	-1,00	-0,19	-1,19	-1,10

Quelle: EPA 2012

Für Edelmetalle sind die Verringerungen von Emissionen durch das gegenwärtige Recycling sogar teilweise noch deutlich höher, als beispielsweise für die Metalle Kupfer und Aluminium. Laut Schüler et al. (2011) liefert das Recycling von Seltenen Erden verglichen mit der Primärproduktion entscheidende Vorteile in Bezug auf Emissionen, Grundwasserschutz, Versauerung, Eutrophierung und Klimaschutz. Speziell bei den Seltenen Erden kommt hinzu, dass das Recycling keine radioaktiven Bergbauabfälle verursacht, wie es bei primärer Produktion teilweise der Fall ist.

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Energieaufwendungen im Bereich der Sekundärproduktion sind, dass die Metalle häufig bereits in metallischer Form vorliegen, weniger Verarbeitungsstufen notwendig sind und die energieaufwendigen Prozesse der Erzaufbereitung (Brechen, Mahlen) entfallen.

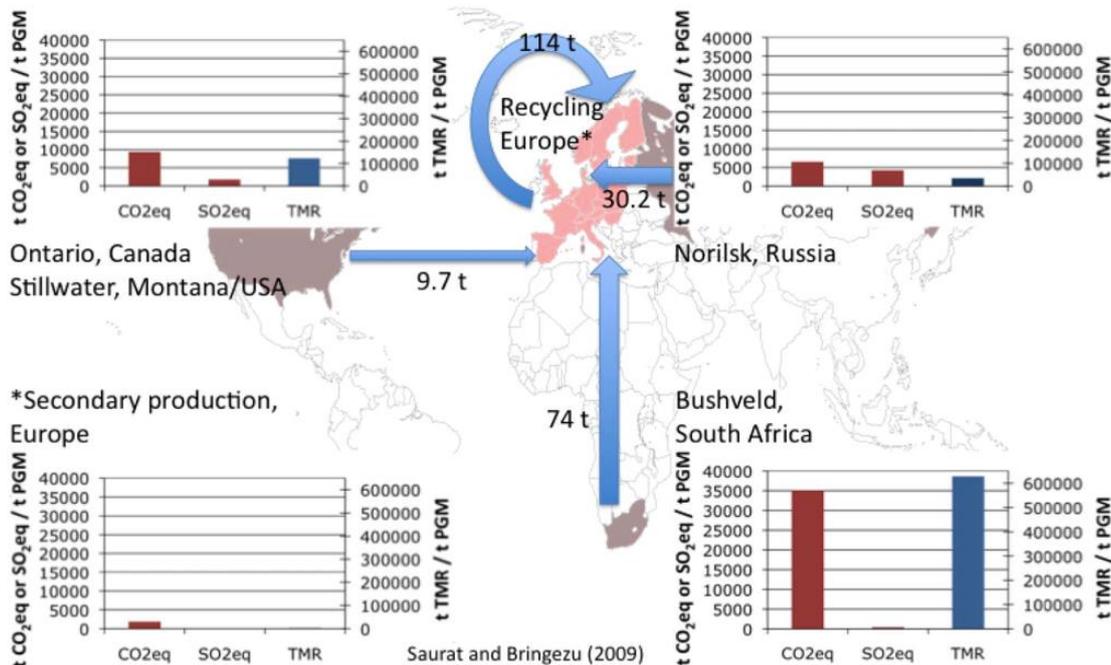
Im Bereich der Sekundärproduktion ist oftmals die Altproduktelogistik ein Schritt mit wesentlichem Energieverbrauch insbesondere wenn es sich hierbei um lokal weit verteilte end of life-Produkte handelt. Der Energieaufwand für die Sammlung und Sortierung von NiCd-Batterien liegt

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

bei 37 % des Gesamtenergieaufwandes für die gesamte Entsorgungskette (1,8 MJ/kg Produkt vs. 4,9 MJ/kg/Produkt, UNEP 2013b)). Der Energieaufwand der Aufbereitung wird wesentlich dadurch bestimmt, in welchem Materialverbund die Zielelemente vorliegen und wie hoch die Konzentration der Zielelemente im Input der Aufbereitung im Vergleich zur benötigten Mindestkonzentration in der Rückgewinnung bereits ist. Hier kann die getrennte Erfassung von Monofractionen einzelner Altprodukte oder Gruppen vergleichbarer Altprodukte wesentlichen Einfluss haben.

Mit Blick auf die bei der Produktion sekundärer Rohstoffe vorhandenen Datenunsicherheiten ist festzuhalten, dass auch auf der Primärseite ähnliche Probleme zu bewältigen sind, so unterscheiden sich z. B. die Umwelteinwirkungen pro Tonne Rohstoff massiv je nach dessen Herkunft, was sich exemplarisch am Beispiel der Platingruppenmetalle (PGM) zeigen lässt. PGM werden hauptsächlich aus vier verschiedenen Quellen bezogen: Russland, Südafrika, Kanada und aus Recyclingprozessen in Europa. Da die südafrikanische PGM-Produktion von günstigem Strom profitiert, ist sie größtenteils elektrifiziert (z. B. werden elektrische Öfen verwendet). Gleichzeitig werden 92 % des in Südafrika generierten Stroms in eher ineffizienten Kohlekraftwerken generiert, was zu einer vergleichsweise hohen Emission von $\text{CO}_{2\text{eq}}$ führt. Die russische Produktion funktioniert im Hinblick auf $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen besser. Norilsk Nickel (Russland) schneidet jedoch bei der Betrachtung von $\text{SO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen am schlechtesten ab. Die folgende Abbildung verdeutlicht die deutlichen Unterschiede in der Umwelteinwirkung für eine Tonne PGM je nach Herkunft (vgl. Saurat/ Bringezu 2009).

Abbildung 71: Regionale Disparität von Umweltbelastungen: PGM-Produktion für den europäischen Markt



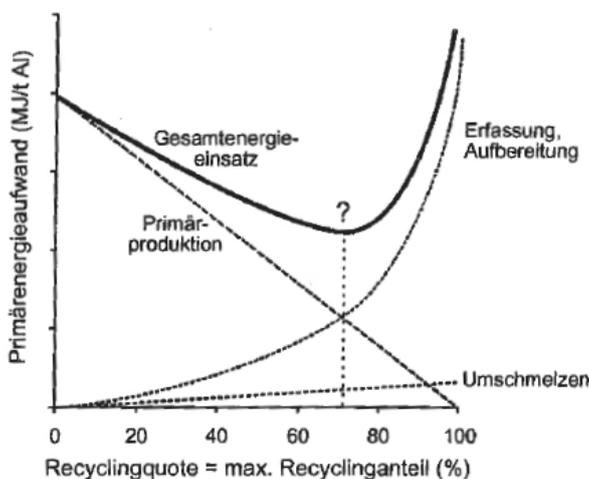
Quelle: Bringezu 2013

Für die Zukunft weisen Untersuchungen darauf hin, dass diese ökologischen Vorteile der Sekundärproduktion für einige Elemente noch weiter an Bedeutung gewinnen werden: Da in der Primärproduktion zunehmend auch Lagerstätten mit immer niedrigeren Erzkonzentrationen angegangen werden, steigt der damit verbundene Aufwand der Erzgewinnung. Zu beachten ist, dass

dies jedoch nicht notwendigerweise auf ReStra-Zielelemente zutrifft, die als Nebenprodukte gewonnen werden, wie z. B. In, Ga und Ge.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Betrachtungen der ökologischen Lasten des Recyclings mit Blick auf die in ReStra dargestellten Recyclingansätze nur produktspezifisch bewertet werden können. Das Zusammenspiel von Erfassung, Aufbereitung und Umschmelzen ist maßgeblich für die Effizienz der Recyclingprozesse bzw. den Energieaufwand pro erzeugtem Sekundärmetall. Dieser Zusammenhang ist für Massenmetalle wie Aluminium und Kupfer gut dokumentiert (siehe bspw. Rombach 2003) und lässt sich prinzipiell auch auf ReStra-Zielmetalle übertragen. Rombach (2003) beschreibt das prinzipielle Vorhandensein einer optimalen Recyclingquote in Bezug auf den notwendigen Energieeinsatz. Die Bestimmung dieser optimalen Recyclingquote ist qualitativ in Abbildung 72 dargestellt.

Abbildung 72: Qualitative Bestimmung einer optimalen Recyclingquote



Quelle: Rombach 2003

Während der spezifische Energieeinsatz durch die steigende Menge erzeugten Sekundärmetalls zunächst sinkt, führt eine Steigerung der Recyclingquote ab einem bestimmten Grenzwert zu einem stark steigenden Energieverbrauch, der aus dem hohen Aufwand für Erfassung und Aufbereitung resultiert (Rombach 2003). Dabei sind je nach Konzentrationen der Elemente in den Altprodukten (im Vergleich zur Konzentration in den Erzen) sicherlich unterschiedliche „optimale Recyclingraten“ zu erwarten. In der Konsequenz bedeutet dies zum einen, dass es nicht zwingend sinnvoll ist, Stoffkreisläufe um jeden Preis zu schließen (Rombach 2003). Zum anderen verweist Rombach (2003) darauf, dass ein optimales Verhältnis für den Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen nur mit Blick auf die produktspezifischen Aufwendungen in der Erfassung und Aufbereitung bestimmt werden kann.

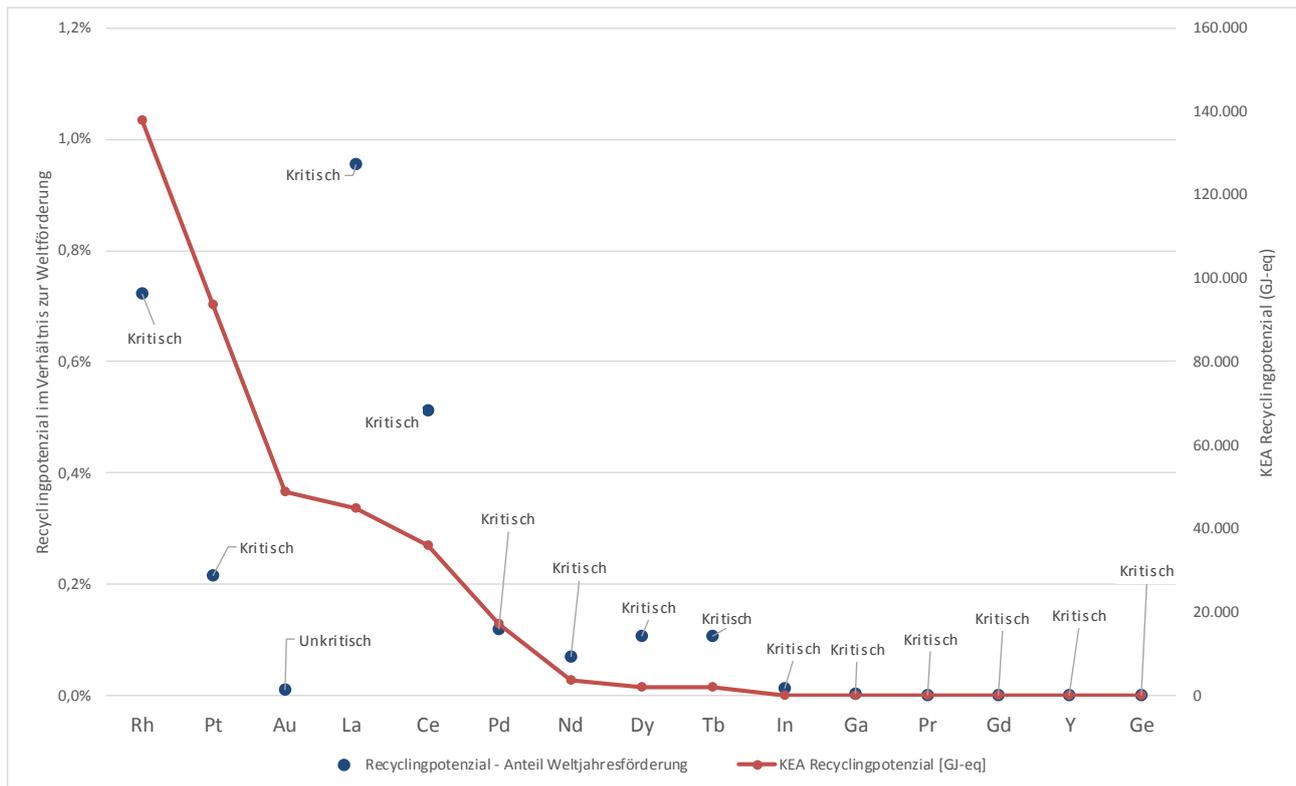
6.6.3.4 Umweltentlastungspotenziale

Die im Folgenden dargestellte Abschätzung der Umweltentlastungspotenziale aus dem Recycling von ReStra-Zielmetallen aus den fokussierten Altprodukten basiert auf Literaturangaben (Nuss 2014). Sie sind vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Zusammenhänge und der Heterogenität der ReStra-Altprodukte und -prozesse als Orientierungswerte zu verstehen.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Dabei wurden die Materialpotenziale je Altprodukt aus der Differenz von Ist-Zustand und optimierter Entsorgungskette (siehe Kapitel 6) gebildet und dem Indikator KEA des jeweiligen ReStra-Zielmetalls zugeordnet. Die Betrachtung geht davon aus, dass der gewonnene Sekundärrohstoff einen Primärrohstoff substituiert (avoided burden approach). Energieaufwendungen, die in den Literaturwerten für die Primär- und die Sekundärproduktion nicht enthalten sind, werden bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.⁷²

Abbildung 73: KEA-Minimierungspotenziale durch optimierte Kreislaufführung von ReStra-Altprodukten



Datengrundlagen: KEA nach Nuss (2014), Versorgungsrisiko und Vulnerabilität nach Graedel et.al. (2015), Kritikalität nach EU (2014)

⁷² Seltene Erden, die in Kapitel 6.2 als SE-unspezifisch bilanziert wurden, wurden hier entsprechend Goonan (2001) überschlägig in 1/3 Ce und 2/3 La aufgeteilt.

Tabelle 246: Umweltentlastungspotenziale durch optimierte Kreislaufführung von ReStra-Altprodukten berechnet auf der Grundlage Nuss (2014)

	GWP Recyclingpotenzial [t CO2-eq]	KEA Recyclingpotenzial [GJ-eq]	TAP Recyclingpotenzial [kg SO2-eq/kg]	FEP Recyclingpotenzial [kg P-eq]
Rh	7.090	137.966	1.050.400	30.300
Pt	4.813	93.555	847.000	19.635
Au	2.931	48.776	28.140	53.935
La	2.301	44.975	9.832	941
Ce	1.843	36.010	7.859	714
Pd	916	17.157	401.200	2.360
Nd	179,6	3.511	765	69
Dy	108	2.125	454	42
Tb	95	1.863	416	38
In	8,4	141	99	12
Ga	1,8	27	4	1
Y	0,0	0	0	0
Gd	0,0	0	0	0
Pr	0,0	0	0	0
Ge	0,0	0	0	0

Die höchsten Entlastungspotenziale bezogen auf den KEA sind für Au, Pt, Pd und Rh erreichbar. Alle vier Elemente sind in der Primärproduktion überwiegend Hauptprodukte, der „avoided burden approach“ ist hier realistisch. Für La und Ce, deren optimierte Kreislaufführung ebenfalls sehr hohe KEA- und GWP Entlastungspotenziale zeigen, sind eher als Nebenprodukte einzustufen. Hier steht in der mittelfristigen Perspektive die intergenerationelle Gerechtigkeit als Bewertungskriterium im Vordergrund. Zu beachten ist allerdings, dass sich die Mengenverhältnisse bezogen auf die Angebotssituation der untersuchten Elemente durch eine verstärkte Kreislaufführung und in der Nachfragesituation durch verstärkte Substitutionsbemühungen zukünftig deutlich ändern können. Dies gilt z. B. für Nd, Dy und Tb. Hierdurch würde sich auch eine Wirkung auf die Verfügbarkeit von La und Ce als Nebenprodukte aus der Primärförderung von SE-Magnetrohstoffen ergeben.

Die Umweltentlastungspotenziale durch die dargestellten Recyclingpotenziale im Jahr 2020 aus anderen Elementen sind vergleichsweise gering. Die oftmals durch fehlende Aufbereitungs- und Rückgewinnungstechniken verursachten geringen Mengenströme in den beschriebenen Recyclingpotenzialen können jedoch durch zukünftig veränderte Mengenströme (über das Jahr 2020 hinaus) und neue Recyclingtechnologien mittelfristig ebenfalls einen relevanten Beitrag zur Rohstoffsicherung liefern.

7 Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel werden im folgenden Kapitel Handlungsempfehlungen für eine ressourceneffiziente Gestaltung der Entsorgungsketten für die Produkte bzw. Produktgruppen entwickelt. Die in den Kapiteln 6 analysierten Hemmnisse und Pfadabhängigkeiten sowie die Abschätzungen zu Wirtschaftlichkeit und Umweltbelastungspotenzial in den Kapiteln 6.6 wurden bei der Entwicklung der Handlungsoptionen berücksichtigt.

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 überdacht werden, insbesondere in Hinsicht auf die strategische Bedeutung der meisten im Projekt ReStra betrachteten Elemente für eine technologieorientierte Wirtschaft. Die Sicherstellung einer teilautarken Versorgung mit diesen Elementen aus heimischen „Rohstoffquellen“ und die damit verbundene größere Robustheit gegenüber Rohstoffengpässen und Flexibilität bei technologischen Entwicklungen müssen hier berücksichtigt werden, auch wenn sich diese Faktoren 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 (politisch gesetzten) Rahmenbedingungen und der derzeitigen Marktsituation ergebenden Wirtschaftlichkeit verstärkt die Aspekte von prospektiver Versorgungssicherheit und Umweltentlastung berücksichtigt werden. Diese werden bisher aufgrund nicht-internalisierter externer Kosten nicht monetär abgebildet. Unter diesen Aspekten können Ansätze zur Kreislaufführung sinnvoll sein, selbst wenn die Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung noch nicht in allen Fällen gegeben ist.

7.1 Altproduktbezogene Ansätze

Die folgenden Kapitel stellen Handlungsansätze für eine optimierte Rückgewinnung von ReStra-Zielmetallen für solche Altprodukte dar, für die in Kapitel 6.2.3 Optimierungspotenziale identifiziert worden sind. Dementsprechend werden die folgenden Altprodukte hier nicht weiter betrachtet:

- Raffineriekatalysatoren,
- Katalysatoren der Salpetersäureproduktion,
- Katalysatoren der Blausäureproduktion,
- Pulverkatalysatoren,
- Fest- und Wirbelbettkatalysatoren,
- Spezialgläser,
- Mischmetalle,
- Laseranwendungen,
- Brennstoffzellen,
- Optische Faseranwendungen,
- LED,
- Schleifkeramiken,
- Absorbermaterial und Kontrollstäbe in Kernreaktoren,
- Hochtemperatursupraleiter.

7.1.1 Homogene Katalyse

Im Fokus stehen entsprechend der durchgeführten Untersuchungen die Verluste von Palladium durch die unvollständige Erfassung der Katalysatoren. Wesentlicher Hemmnisfaktor ist die kleine Pd-Menge pro Einsatzstelle. Derzeit ist keine Sammlung/Erfassung bekannt, bei der die Erlöse aus dem Recycling kostendeckend sind. Ansätze zur Optimierung der Erfassung müssen entsprechend vor dem Hintergrund der geringen Mengenrelevanz betrachtet werden (Verluste von 0,3 % des ReStra-Abfallpotenzials bezogen auf Palladium, ca. 0,005 % der Welt-Jahresproduktion).

Eine Verbesserung der Informationssituation bei den Anwendern ist mit vergleichsweise geringem Aufwand verbunden und kann ggf. für Teilmengen zu einer besseren Erfassung führen. Unter der Regie der Verbände der chemischen Industrie, der Hersteller von Katalysatoren und der Abfallentsorger sollte eine entsprechende Information (z. B. Leitfaden, Kampagne) durch UBA und BMUB initiiert werden.

Angesichts der relativ geringen Menge und der relativ guten Erreichbarkeit der homogenen Nutzerstrukturen erscheint die Etablierung ökonomischer Steuerungsinstrumente (z. B. Pfand) als unverhältnismäßig.

Sinnvoll erscheint jedoch die Prüfung der Festlegung einer Getrenntsammlungspflicht. Als rechtliche Basis steht prinzipiell das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) zur Verfügung. Eine spezifische Verordnung auf der Grundlage des KrWG ausschließlich für Katalysatoren der homogenen Katalyse würde angesichts der Palladiummenge zu unverhältnismäßigen Aufwänden im politischen und Rechtssetzungsprozess führen. Sinnvoller erscheint die Etablierung einer rohstoffbezogenen Verordnung, die Getrenntsammlungspflichten zu verschiedenen Altprodukten zusammenfasst. Da dieser Ansatz für verschiedene Altprodukte relevant ist, erfolgt eine übergeordnete Erarbeitung in Kapitel 7.4.

7.1.2 Umweltkatalysatoren

Auch bei den Umweltkatalysatoren stellt die unvollständige Erfassung den dominanten Verlustbereich in der Entsorgungskette dar. Wesentliche Einsatzfelder von Umweltkatalysatoren sind Blockheizkraftwerke (BHKW) und die katalytische Nachverbrennung (KNV). Letztere spielt beispielsweise in Kaffeeröstereien, Lackieranlagen und Druckereien eine Rolle (Hagelüken et al. 2005a). Das Anwendungsgebiet ist somit deutlich breiter, als z. B. bei den o.g. Katalysatoren der homogenen Katalyse.

Förderlich für eine weitergehende getrennte Erfassung sind spezifische Nutzungsmodelle (Produkt-Service-Systeme), bei denen die Lieferanten die Katalysatoren entgeltlich für die Nutzung bereitstellen und am Ende der Nutzungsphase zurückzunehmen bzw. austauschen. Auch hier wird unterstützend eine rechtlich etablierte Getrennsammlungspflicht als „Leitplankenansatz“ (siehe Kapitel 7.4) empfohlen.

Die Einrichtung eines Pfandmodells würde zu zusätzlichen ökonomischen und administrativen Aufwänden führen. Zwar bestehen durch verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten eines solchen Modells auch Spannbreiten in diesen Aufwänden⁷³. Aus gutachterlicher Sicht sollte jedoch zunächst die Wirkung eines veränderten Rechtsrahmens („Leitplanken“) und des optimierten Informationsflusses geprüft werden. Wenn das Monitoring der Materialflüsse aus dem Anwendungsfeld der Umweltkatalysatoren keinen entsprechenden positiven Effekt aufzeigt, sollte ein spezifisches Pfandmodell geprüft werden.

Informationen zu Inhaltsstoffen der Umweltkatalysatoren und der Getrennsammlung können hier durch die Hersteller/Lieferanten der Katalysatoren an die Nutzer herangetragen werden. Diese weisen als Marktakteure eine größere Kunden- bzw. Nutzernähe auf als z. B. staatliche Institutionen. Die Initiierung der Informationsflüsse sollte durch das UBA und BMUB erfolgen, z. B. über eine Vereinbarung von Informationsaktivitäten der Hersteller, die ggf. in einen übergeordneten Rahmen wie z. B. das „European Innovation Partnership on Raw Materials“ (EU-Kom 2015) eingebunden werden kann.

7.1.3 FCC-Katalysatoren

Die wesentlichen Verluste der enthaltenen Seltenerdmetalle Cer und Lanthan entstehen in der Entsorgungskette für FCC-Katalysatoren durch fehlende Rückgewinnungsverfahren. Technisch befindet sich die Rückgewinnung von Lanthan und Cer derzeit in der Entwicklung.

Der geringe Preis von Lanthanoxid und Ceroxid (beide 5,7 \$/kg am 1.3.2014 (metal-pages.com)) sowie die geringen Konzentrationen im Altprodukt (La + Ce je 2-3,5 %) erzeugen keine ökonomischen Treiber für die Rückgewinnung der Sekundärprodukte (siehe auch Kapitel 7.2 in diesem Bericht). Allerdings ist eine vergleichbar hohe Mengenrelevanz festzustellen (189-331 t in der Summe der Seltenen Erden Lanthan und Cer).

⁷³ Siehe z. B. Pfandmodell für Starterbatterien für Autos vs. Pfandmodell bei Verpackungen.

Die geringe Anzahl von Raffinerien in Deutschland (Gesamtzahl: 20 siehe auch Kapitel 6.2.3) begünstigt die getrennte Erfassung mit einer vergleichsweise hohen Menge und geringer Anzahl von Anfallstellen und einer geringen Anzahl von Akteuren, bei denen die Verfahrensanweisungen zur Getrenntsammlung umgesetzt werden müssen.

Eine Diskussion von Handlungsansätzen erfolgt in Kapitel 7.2 dieses Berichts im Kontext anderer Lanthan- und Cerströme.

7.1.4 Autokatalysatoren

Zur Frage der Rückgewinnung von Lanthan und Cer aus Autokatalysatoren wird auf die Diskussion zum Recycling dieser beiden Seltenen Erden in Kapitel 7.2 verwiesen.

Platin und Rhodium gehen vor allem aufgrund von nicht-optimalen Transport- und Behandlungsvorgängen verloren (siehe Kapitel 6.2.3).

Ansätze für eine optimierte Entsorgungskette wurden bereits in mehreren Studien diskutiert (z. B. Bringezu 2011). Um den Übergang bereits früher diskutierter Ansätze in die Praxis sicherzustellen, wird aus gutachterlicher Sicht die stärker rechtliche Verankerung verschiedener Ansätze empfohlen („Leitplankenansatz“).

Eine Vorgabe über maximale Verlustquoten in der Erfassungs- und Logistikkette würde ein komplexes Monitoring erfordern, das auch aufgrund der vielfältigen Zusammensetzungen von Autokatalysatoren aufwendig und mit deutlichen Datenunsicherheiten verbunden wäre. Angesichts solcher Datenunsicherheiten könnten nur Quoten festgelegt werden, die vergleichsweise große Sicherheitsspielräume hätten und ein entsprechend geringes Ambitionsniveau. Als zielführender wird die Entwicklung einer Best Practice Vorgabe für Transport und Behandlung angesehen, die z. B. Arten geeigneter Transportbehälter sowie Mindestanforderungen an die Behandlungsart definiert. Einen Anknüpfungspunkt für eine rechtliche Verankerung eines optimierten Handlings stellt das Abfallrecht dar. Die Altfahrzeugverordnung bzw. die EU-Altfahrzeugrichtlinie stellen bereits Anforderungen an die Behandlung von Altfahrzeugen.

Die Entwicklung dieser Best Practice- Vorgabe für Transport und Behandlung sollte unter Einbeziehung der beteiligten Akteure durch das UBA erfolgen. Ein Verankerungspunkt auf europäischer Ebene kann die Arbeit des JRC zu den Arbeiten im Bereich „Best Environmental Management Practice - Elaboration of a reference document for the Car Manufacturing sector“ (JRC 2015) darstellen, bei dem auch Fragen zur Entsorgung von Altfahrzeugen behandelt werden.

Eine zu entwickelnde Alternative zur Verankerung in der Altfahrzeugrichtlinie bzw. der Altfahrzeugverordnung kann eine rohstoffbezogene Verordnung auf der Basis der Verordnungsermächtigung in § 8 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sein, die Anforderungen an spezifische Verwertungstätigkeiten zentral regelt, wenn diese in den bestehenden rechtlichen Rahmensetzungen nicht enthalten sind (siehe zur Rohstoffverordnung auch Kapitel 7.4).

Bei dem Ansatz, Best Practice-Ansätze in einem rechtlichen Rahmen festzuschreiben, ist zu beachten, dass Verluste im Rahmen von illegalen Aktivitäten wie z. B. der Behandlung und Sammlung von Katalysatoren durch „Hinterhofwerkstätten“, die keine Abfallbehandlungsgenehmigung haben, auf diesem Weg nicht beeinflusst werden. Eine gewisse abschreckende Wirkung wird jedoch für solche Transporte erwartet, die als Abfalltransporte genehmigt sind und die dann als „nicht-legale“ Transporte eingestuft würden, wenn die Best Practice-Ansätze verbindlich gemacht würden.

Ergänzende Anmerkung zur Situation im Ausland (außerhalb des ReStra-Betrachtungsrahmens)

Als Systemgrenze der Untersuchung im Rahmen dieses Projekts wurde der geografische Raum „Deutschland“ festgelegt. Aufgrund der Mengenrelevanz der Exporte von Gebrauchtfahrzeugen sei hier jedoch auf die große Bedeutung der Optimierung in diesem Bereich hingewiesen:

Hinsichtlich des Verlustes von strategischen Metallen aus Automobilkatalysatoren im Ausland kann die Unterstützung von Optimierungsansätzen in den Empfängerstaaten erfolgen. Die Recyclingindustrie wird dabei als wichtigster Akteur für diese Aktivitäten gesehen. Vergleichbare Aktivitäten erfolgen seit mehreren Jahren im Bereich der Elektronikaltgeräte, wo auch Hersteller im Rahmen einer erweiterten Herstellerverantwortung aktiv sind (Sander 2010). Solange keine entsprechenden Strukturen zur Rückgewinnung strategischer Elemente in den Empfängerstaaten der Fahrzeuge aufgebaut sind, kann der Versand von Altkatalysatoren aus den Empfängerstaaten zu den Rückgewinnungsanlagen z. B. in Europa als Abfallexport erfolgen. Um die organisatorischen und rechtlichen Anforderungen für einen „Rückexport“ besser bzw. leichter erfüllen zu können, sollten die Exporteure der Altkatalysatoren durch die Anlaufstelle Baseler Übereinkommen unterstützt werden (siehe auch Sander 2010).

7.1.5 Automobilkomponenten

Für Automobilkomponenten wurde eine Mengenrelevanz für Gadolinium, Dysprosium sowie mit Einschränkung für Terbium identifiziert. In den als relevant identifizierten Seltenerdmetallen ist ebenfalls Neodym enthalten, das daher hier bei der Entwicklung von Handlungsansätzen ebenfalls berücksichtigt wird. Die wesentlichen Verluste innerhalb der Entsorgungskette erfolgen durch die fehlende Rückgewinnung und die fehlenden zugehörigen vorgeschalteten Maßnahmen. Hierzu zählt vor allem die Separation der Komponenten vor dem Schreddern der Altfahrzeuge, da bei diesem Vorgang die Magnetstoffe in die Outputfraktionen dissipieren (Eisen/Stahlfraktion, Schredderleichtfraktion, Schredderschwerfraktion) und nicht wieder separiert werden können. Darüber hinaus zeigte das Technologiescreening (siehe Kapitel 6.1) die fehlende Verfügbarkeit großtechnischer Rückgewinnungsanlagen für Seltenerd-Magnetrohstoffe. Wesentliches übergeordnetes Hemmnis ist die fehlende Rentabilität der Rückgewinnung über die Entsorgungskette.

Die Diskussion von übergeordneten Handlungsansätzen zur Rückgewinnung von Magnetrohstoffen erfolgt in Kapitel 7.2 dieses Berichts.

Für Automobilkomponenten wurde ein deutliches Informationsdefizit über die Verwendung strategischer Metalle festgestellt (ORKAM 2014). Um den Demontagebetrieben überhaupt eine informierte Entscheidung über mögliche Demontagen bzw. Veränderungen bei den Demontagekonzepten zu ermöglichen, müssen solche Informationen verfügbar gemacht werden. Derzeit ist für anerkannte Demontagebetriebe bereits das Informationssystem IDIS (International Dismantling Information System) verfügbar. Es stellt solche Informationen über Fahrzeuge zur Verfügung, die in Bezug auf das Erreichen der Recyclingquoten und die Umsetzung der Schadstoffentfrachtungsanforderungen der EU-Altfahrzeugrichtlinie bzw. der deutschen Altfahrzeugverordnung erforderlich sind. Oftmals sind diese Informationen den Demontagebetrieben bereits aus der täglichen Routine bekannt, wodurch das System oftmals im Alltag nicht aktiv genutzt wird. Zudem sei der Aufwand für eine spezifische Recherche in IDIS zu einer Modellvariante oftmals unverhältnismäßig zum erzielbaren Erlös aus dem Verkauf der Abfallfraktion, die separiert werden könne (ORKAM 2014a). In welchen Komponenten bei einem spezifischen Fahrzeug Seltenerdmetalle verwendet wurden, ist den Demontagebetrieben nicht in gleichem Maße bekannt, wie dies z. B. bei

Komponenten zur Entfrachtung der Fall ist. Dies liegt zum einen daran, dass solche Komponenten bei Altfahrzeugen (die in Deutschland durchschnittlich 13 Jahre alt sind (siehe Kapitel 5.3) „neu“ auftreten und nicht zum „Standard“ gehören, wie z. B. Katalysatoren. Zum anderen liegt dies jedoch auch daran, dass sich die Verwendung nach Sonderausstattungen, nach Modellvarianten und -versionen unterscheidet.

Um den Aufwand der Recherche für ein spezifisches Fahrzeug (inkl. Differenzierung nach Modell, Variante und Version) zu verringern, ist eine Identifikation des konkreten Fahrzeugs über die Fahrzeugidentifikationsnummer möglich. Diese muss ohnehin für den Verwertungsnachweis ermittelt werden.

Zusätzliche rechtlich verankerte komponentenspezifische Demontageanforderungen können als Impulsgeber für die Veränderung von Demontagekonzepten bei den Demontagebetrieben sinnvoll sein. Entsprechende Anpassungen der rechtlichen Regelung im Rahmen der Altfahrzeugverordnung können von UBA/BMUB initiiert werden und ggf. mit den Diskussionen zur EU-weit bestehenden rechtlichen Regelung verknüpft werden (Altfahrzeugrichtlinie).

Die Altfahrzeugrichtlinie bzw. die Altfahrzeugverordnung regeln unter anderem die Demontage von Komponenten. Anforderungen an eine weitere Behandlung der demontierten Komponenten im Sinne der Zielsetzung des Projektes ReStra und die Rückgewinnung von strategischen Rohstoffen aus den Komponenten ist bisher nicht vorgesehen. Als Alternative zur entsprechenden Ergänzung des Altfahrzeugrechts ist denkbar, dass die relevanten ausgebauten elektrischen bzw. elektronischen Komponenten, die verwertet werden sollen, in den Geltungsbereich des ElektroG2 fallen. Dies erscheint folgerichtig, da die Zusammensetzungen und Anforderungen an die Behandlung oftmals vergleichbar sind. So enthalten Elektro- und Elektronikaltgeräte ebenfalls Seltenerdminerale und die elektronischen Komponenten aus Fahrzeugen enthalten vergleichbare strategische Rohstoffe wie viele Elektronikaltgeräte. Die Schnittstelle zwischen den Rechtsbereichen Altfahrzeugverordnung und ElektroG2 kann z. B. in der Form geregelt werden, dass die Altfahrzeugverordnung die Pflicht zur Separation bestimmter festzulegender Komponenten regelt und die demontierten Komponenten dann in den Regelungsbereich des ElektroG2 fallen. Der Entwurf der Schweizer Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) hat einen vergleichbaren Ansatz in der Form umgesetzt, dass eine Liste der relevanten Komponenten aus Fahrzeugen (und Bauteilen) erstellt und regelmäßig aktualisiert wird (VREG 2013).

Eine veränderte Setzung im Rechtsrahmen kann auch auf die in Kapitel 6.5 beschriebenen Pfadabhängigkeiten wirken und über Separationsanforderungen eine Pflicht setzen, die die Rückgewinnung der ReStra-Zielmetalle fördert, ohne gegen die Notwendigkeit der Beteiligung an einem etablierten Entsorgungspfad wirken zu müssen (siehe Kapitel 6.5.3.2).

Die Wirtschaftlichkeit der Demontageprozesse kann verbessert werden, wenn Komponenten mit strategischen Metallen als Nebenprodukt aus der Separation anderer Komponenten gewonnen werden. Ein solcher Ansatz ist bei Festplatten von Computern bekannt, bei denen das reine, d. h. vollständig separierte Aluminiumgehäuse aus der Demontage höhere Erlöse erzielt und die Magnete als „Beifang“ separiert werden können. Denkbar wäre dies auch bei elektrischen Motoren von Fahrzeugen, wo bei der Separation von Aluminiumgehäusen und Kupferwicklungen als wertbringende Bestandteile Magnete mit Seltenen Erden separiert werden könnten. Eine demontagegerechte Produktgestaltung bzw. die Entwicklung automatisierter Verfahren können hier wesentliche Beiträge zur Verringerung des Aufwandes für die Separation und somit die Wirtschaftlichkeit der Kreislaufführung dieser strategischen Rohstoffe liefern.

Das Prinzip der „dualen Ansätze“ (siehe hierzu auch Kapitel 7.2) sollte hier durch korrespondierende Instrumente im Produktbereich z. B. in der Ökodesignrichtlinie und im Abfallbereich mit Demontage- und Separationsanforderungen realisiert werden. Die Hersteller von Fahrzeugen sind aufgrund der bestehenden Rechtsrahmen der erweiterten Herstellerverantwortung in der Altfahrzeugrichtlinie und der Altfahrzeugverordnung in der Position, entsprechende übergreifende Konstruktionen und Ansätze zu realisieren. Im Bereich der Elektrogeräte wurde dies z. B. durch die Hersteller von Raumklimaanlagen für die Kompressoren mit Seltenerdmetallen realisiert (Mitsubishi 2015).

Die Initiierung dieser Prozesse sollte durch das UBA/BMUB erfolgen und auf EU-Ebene in den Diskussionsprozess im Rahmen der Ökodesignrichtlinie und der Altfahrzeugrichtlinie eingespeist werden.

Hinsichtlich des Verbleibs von außer Betrieb gesetzten Fahrzeugen in Ländern, in denen keine adäquate Entsorgungsstruktur vorhanden ist, gilt das in Kapitel 7.1.4 als „Ergänzende Anmerkung“ gesagte sinngemäß.

7.1.6 Photovoltaik-Module

Im Bereich der Photovoltaikmodule sind die Dünnschichttechnologien CIGS, CdTe und a-Si sowie ihre Inhaltsstoffe Gallium, Indium und Germanium relevant.

Die Verluste werden bei dieser Produktgruppe vor allem durch die fehlenden Rückgewinnungsverfahren für Indium und Gallium aus den betreffenden Dünnschicht-Modultypen induziert (siehe hierzu auch Kapitel 6.5). Ein wesentliches Hemmnis ist die derzeit geringe Menge von Altmodulen zum Recycling sowie die fehlenden Recyclingverfahren für diese Elemente aus diesen Altprodukten.

Da PV-Module in den Geltungsbereich des ElektroG2 fallen, erfolgen im Sinne der Produktverantwortung Garantieleistungen für die zukünftige Entsorgung, wenn die Module in Verkehr gebracht werden. Spezifische Recyclingziele für ReStra-Zielmetalle bestehen derzeit nicht.

Mit Blick auf die zukünftig steigenden Mengen von Altmodulen ergeben sich für Steuerungsinstrumente zunächst folgende prinzipielle Ansatzpunkte:

- Behandlungsanforderungen: z. B. Zuführung zu einer Behandlung, die auf die Rückgewinnung von funktionalen Halbleitermaterialien wie Gallium und Indium abzielt,
- Setzung quantitativer Rückgewinnungsziele: z. B. Rückgewinnung von x% des Galliums. Hierbei muss bei der Bestimmung des Nenners berücksichtigt werden, dass wesentliche Unsicherheiten in der Bestimmung der Modul-Absolutmengen und der Gehalte an Indium und Gallium vorliegen. Außerdem spricht die Dynamik der Metallgehalte aufgrund von Materialeffizienz, Substitution und Technologieentwicklung gegen feste Rückgewinnungsquoten.

Hinsichtlich der Rückgewinnung von Indium aus den betrachteten Modultypen (CdTe, a-Si, CIGS) ist auch die weit fortgeschrittene Substitution von Indium in CdTe-Modulen, bzw. deren zunehmende Substitution in den a-Si-Modulen zu beachten, die die ökonomische Seite solcher Rückgewinnungsverfahren langfristig negativ beeinflussen würden. Daher sollte geprüft werden, ob eine Zusammenführung mit den Verfahren zur Rückgewinnung von Indium aus LCD-Bildschirmgeräten möglich ist.

Angesichts einer weltweiten Raffinadeproduktion von 820 t Indium (USGS 2015) und 440 t Gallium (USGS 2015a) und einem geschätzten Massenanteil von deutlich kleiner 1 ‰, der durch die Optimierung der Entsorgungskette erfasst werden kann, erscheint die Rückgewinnung von Indium und Gallium aus PV-Modulen nur als Nebeneffekt anderer Rückgewinnungstätigkeiten von PV-Modulen relevant. Hier ist vor allem das Potenzial für reinere Glasfraktionen zu benennen, die durch Separation der aktiven Substanzen von den Trägermaterialien erreicht werden können. Solches Glas ist für die Verwertung im Flachglasbereich geeignet und erzielt höhere Erlöse als Glas, das lediglich in der Isoliermaterialproduktion genutzt werden kann.

Als rechtliches Instrument wären hierbei spezifische Behandlungsanforderungen (Separationsanforderungen) im Rahmen der Behandlungsverordnung unterhalb des ElektroG2 denkbar.

7.1.7 Hitzeschutzkeramiken

Im Bereich der Hitzeschutzkeramiken wurde der Einsatz von Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid in der keramischen Hitzeschutzbeschichtung von stationären Gasturbinen und Flugzeugtriebwerken untersucht.

Für eine Optimierung der Entsorgungskette bei Hitzeschutzkeramiken müssten zunächst geeignete Verfahren zur Rückgewinnung des enthaltenen Yttriums am Ende der Entsorgungskette zur Verfügung stehen. Dies ist jedoch entsprechend den Ergebnissen des Technologiescreenings (siehe Kapitel 6.1) und der Untersuchungen zur Optimierung von Entsorgungsketten und den verbundenen Hemmnissen (siehe Kapitel 6.2.3.5) nicht absehbar ist.

Der Ansatz zur Verbesserung der Entsorgungssituation kann daher die Förderung der Entwicklung von Rückgewinnungsverfahren sein. Da bisher noch nicht einmal spezifische Rückgewinnungsverfahren für die Hitzeschutzkeramikabfälle im Labormaßstab verfügbar sind, wird der Schwerpunkt zunächst bei der Förderung der Verfahrensentwicklung (ggf. in Kombination mit Abfällen aus der Produktion) gesehen und nicht bei der Etablierung großtechnischer Anlagen. Dabei sollte auch geprüft werden, ob eine Zusammenführung von Yttrium-haltigen Produktionsabfällen (Overspray), die bisher ebenfalls nicht recycelt werden, realisiert werden kann, da diese oftmals am selben Ort wie die Abfälle am Produktlebensende, anfallen.

Weiterhin zu beachten ist, dass sich die end of life (EoL)-Menge der Hitzeschutzkeramiken sowohl aus Strahlabfällen aus der Triebwerkswartung als auch aus intakter Beschichtung an EoL-Turbinenkomponenten zusammensetzt. In letzterem Fall wäre für eine Zuführung zu einem geeigneten Rückgewinnungsverfahren zunächst eine Entfernung der Beschichtung notwendig (sofern die Turbinenkomponenten weiterhin der Nickelrückgewinnung zugeführt werden sollen).

7.1.8 NiMH-Batterien

In der Produktgruppe Batterien hat die Produktanalyse eine Relevanz von Nickelmetallhydridbatterien (NiMH) und eine Mengenrelevanz für Cer, Samarium und Lanthan aufgezeigt.

Eine Optimierung der Sammlung ist insbesondere bei Gerätebatterien notwendig, aber auch bei Industriebatterien ist Handlungsbedarf für eine weitere Optimierung der getrennten Erfassung erkennbar.

Ein Ansatz zur Verringerung der Verluste von NiMH-Consumer-Batterien durch unvollständige Getrenntsammlung wird in der verbesserten Information bzw. Motivation der Verbraucher durch Kommunikationskonzepte gesehen. Ein solches Konzept wird derzeit von GRS entwickelt.

Um sicherzustellen, dass die Batterien nicht über die Stahlroute als konkurrierendem Entsorgungsweg ohne Rückgewinnung strategischer Elemente entsorgt werden, sollte im BattG eine entsprechende Behandlungsanforderung implementiert werden. Das BattG schreibt derzeit nur pauschale gesamtmassenbezogene Verwertungsquoten vor. Die verpflichtende Zuführung von NiMH-Batterien zur Rückgewinnung, d. h. die verpflichtende Einspeisung in den Prozess der Rückgewinnung - nicht die bloße Zuführung zu Anlagen der Rückgewinnung - wird als notwendige Anforderung für eine Rückgewinnung der enthaltenen strategischen Elemente gesehen.

Die Trennung von Gerätebatterien bei Erstbehandlern ist laut ElektroG2 vorgeschrieben (Anlage 4 mit Bezug zum § 20 Abs. 2). Das BattG schreibt vor, dass bei der Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten anfallende Geräte-Alt-Batterien dem Gemeinsamen Rücknahmesystem zur Abholung bereitzustellen sind (§ 12 BattG). Die Rechtsrahmen und die Schnittstellen zwischen den Rechtsbereichen sind damit klar definiert. Optimierungsbedarf scheint in Bezug auf die Separation der Gerätebatterien aus dem Geräteverbund zu bestehen. Dabei kommt es teilweise zu derart erheblichen Beschädigungen der Batterien, dass beim Recycling das chemische System nicht erkannt werden kann und daher kein spezifisches Recycling erfolgen kann (Kohlmeyer 2016). Eine entsprechende Anforderung an die schonende Separation sollte im Rahmen der Entwicklung der Behandlungsverordnung nach ElektroG2 durch das UBA initiiert werden.

Für Industriebatterien, die in ReStra untersucht wurden, sollte eine Pfandlösung erwogen werden in Kombination mit einer verpflichtenden Zuführung zur Rückgewinnung von strategischen Rohstoffen wie oben bereits beschrieben. Die Pfandlösung sollte auch Batteriesysteme umfassen, die in ReStra nicht untersucht wurde, wie z. B. Batterien aus Mobilitätssystemen (E-car, E-bike, Hybridfahrzeuge). Eine solche Pfandlösung, wie sie bereits derzeit für Starterbatterien in Autos besteht (§ 10 BattG), enthält das Potenzial, die Sammlung und Zuführung auch dann in hohem Maße sicherzustellen, wenn der Wert der Inhaltsstoffe Sammlung, Vorbehandlung und Rückgewinnung von ReStra-Zielmetallen nicht finanzieren (wie dies derzeit der Fall ist). Wenn sich z. B. durch einen economy of scale-Effekt eine veränderte Erlössituation ergibt, sollte die Notwendigkeit eines solchen Pfandmodells überprüft werden.

7.1.9 Poliermittel

Poliermittel der optischen Industrie wurden als mengenrelevante Anwendungen Lanthan und Cer identifiziert.

Ihre Rückgewinnung aus den Abfällen der betrachteten Einsatzbereiche erfolgt derzeit vor allem aus wirtschaftlichen Gründen nicht. Die Analysen zeigten aber ein Interesse der Industrie an Recyclingsystemen auf. Zu allgemeinen Aspekten der Optimierung der Entsorgungsketten von Lanthan und Cer siehe auch Kapitel 7.2 dieses Berichts.

Ökonomische Instrumente, die die Nachfrage nach Recyclingrohstoffen in den hier untersuchten Bereichen induzieren (z. B. Marktnachfrage durch Sekundärrohstoff-Einsatzquoten) sind zwar denkbar, in ihrer Operationalisierung für die ReStra-Zielmetalle jedoch sehr komplex. Um die Grundanforderung eines level playing field für europäische und außereuropäische Länder sicherzustellen, müsste für eine Sekundärrohstoffeinsatzquote z. B. entweder ein internationaler Rechtsrahmen oder eine internationale Vereinbarung erreicht werden, oder die Erfüllung der Quote bei der In-Verkehr-Bringung in Europa nachgewiesen werden. Da die Abfall-Herkunft derjenigen Metalle, die hochrein im Produkt genutzt werden, in der Regel nicht durch deren Materi-

aleigenschaften nachgewiesen werden kann, müsste eine Rückverfolgung der Kette bis zum ursprünglichen Recyclingbetrieb, aus dem der Sekundärrohstoff kommt, etabliert werden (z. B. durch Zertifikate).

Einfacher umsetzbar ist die Setzung rechtlicher Rahmenbedingungen, die spezifische Recyclingaktivitäten verbindlich machen (z. B. im Rahmen einer rohstofforientierten Verordnung siehe Kapitel 7.4), die jedoch nicht als pull-Faktor im Markt wirken würde, sondern als push-Faktor das Angebot am Markt erhöhen würde. Als Voraussetzung für Aktivitäten der öffentlichen Hand wird die grundsätzliche politische Entscheidung über die Rückgewinnung der beiden Elemente gesehen (siehe zu allgemeinen Aspekten der Lanthan- und Cer-Rückgewinnung auch Kapitel 7.2 dieses Berichts).

Im Falle einer positiven Entscheidung würde eine Förderung von Investitionen mit Demonstrationscharakter für eine Recyclinganlage als Initiierung der Verwertung von Altpoliermittel mit entsprechender ökonomischer Unterstützung als sinnvoll angesehen. Hersteller von Spezialglasprodukten können dabei eine Leitrolle übernehmen.

Weiterhin sollte die Optimierung der Entsorgungskette für Abfälle aus der Glasproduktion in die Überarbeitung des „Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass“ berücksichtigt werden (Einspeisung in den Prozess durch UBA bzw. BMUB).

7.1.10 Medizintechnische Geräte (MRT, Röntgen)

Die Produktgruppenidentifizierung hat eine Mengenrelevanz von MRT-Geräten für Terbium und Dysprosium sowie von Gadolinium in Röntengeräten aufgezeigt.

Das Potenzial für eine sehr weitgehende Erfassung der Geräte ist aufgrund der geringen Anzahl der Altprodukte bei gleichzeitig hohem Wert und der vorhandenen Rücknahmeaktivitäten bzw. bestehenden Nutzungsstrukturen (vergleichsweise wenige Nutzer, langer Nutzungszeitraum, hoher Wert) gut. Durch Information der Endnutzer kann eine Verbesserung der Zuführung zu geeigneten Entsorgungssystemen erwartet werden, durch die die Geräte auch statistisch als gesammelt entsprechend den Anforderungen des ElektroG erfasst wären. Da für die Anwender ein ökonomischer Anreiz zur Entsorgung der Altgeräte über spezialisierte Entsorger besteht, ist für zusätzliche Informationsmaßnahmen von einem guten Erfolg auszugehen.

Zwar ist die Mengenrelevanz für ReStra-Elemente aus den Seltenerdmetallen in den Medizinprodukten vergleichsweise gering (vergleiche Kapitel 6.2.3.11). Im Kontext des vorgeschlagenen Poolings (siehe Kapitel 7.2 dieses Berichts) ist eine Verwertung dieser Mengen jedoch realistisch, da durch Zusammenführung die Mengenschwelle für eine rentable Rückgewinnung überschritten werden kann.

Durch eine entsprechende Behandlungsanforderung zur Separation von SE-Magneten sowie zur Zuführung zu geeigneten Rückgewinnungsverfahren in einer Behandlungsverordnung nach ElektroG2 kann der weitere Entsorgungsweg festgelegt werden. Die Anforderung sollte vom UBA im Rahmen der Empfehlungen zur Behandlungsverordnung aufgenommen werden.

Für das Recycling des Gadoliniums aus den Röntgenkomponenten (Szintillator) bestehen keine geeigneten Verfahren. Diese sollten in Zusammenarbeit mit den Herstellern dieser Komponenten wie z. B. Trixell oder Canon und den Herstellern der Röntengeräte (z. B. Philips Healthcare) entwickelt bzw. gefördert werden, da diese in die Rücknahmen der Geräte involviert sind und ggf. Kompetenzen in Bezug auf die Mitverwertung von Produktionsabfällen einbringen können. Hier sollte das UBA z. B. im Rahmen eines spezifischen Forschungsvorhabens initiativ werden.

7.1.11 Windenergieanlagen

Für die Produktgruppe Windenergieanlagen wurde eine Mengenrelevanz für Neodym und Dysprosium sowie mit Einschränkungen Terbium festgestellt.

Als wesentliche Schwachstellen der Entsorgungskette für Windkraftanlagen wurden die fehlende Separierung SE-haltiger Magnete und die fehlenden großtechnischen Verfahren zur Rückgewinnung von SE aus Magneten identifiziert (siehe Kapitel 6.2.3.10). Eine übergeordnete Diskussion zur Verwertung von Seltenerd-Magneten erfolgt in Kapitel 7.2.

Die Untersuchungen zum Abfallpotenzial aus Windenergieanlagen (siehe Kapitel 6.2.3.10) zeigen, dass die Menge von Seltenerd-Magneten im Bezugsjahr 2020 noch vergleichsweise gering sein wird. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Windenergieanlagen ist jedoch eine frühe Regelung der zukünftigen Entsorgung notwendig, wenn rückwirkende Anforderungen an den Betrieb von Windkraftanlagen und deren Entsorgung vermieden werden sollen. Daher sollten Verantwortlichkeiten und Separationspflichten für die zukünftigen Altanlagen bereits jetzt festgelegt werden. Allgemeine Rückbauanforderungen sind in der Regel in der Betriebsgenehmigung bzw. der baurechtlichen Genehmigung enthalten. Rücklagen für den Rückbau werden in einigen Fällen während der Laufzeit akkumuliert oder je nach Landesrecht bei Projektbeginn durch eine Bürgschaft abgesichert. Der Rückbau der Gondel ist mit vergleichsweise geringen Kosten verbunden (verglichen z. B. mit dem Rückbau von Fundamenten) und oftmals mit einem Erlös aus den Rohstoffen verbunden. Spezifische Separationsanforderungen für SE-haltige Magnete sind nicht bekannt. Im Rahmen der Rückbauanforderungen wären Anforderungen an die Separation der Seltenerd-Magnete bzw. der Komponenten, die diese Magnete enthalten und der Zuführung zum Recycling implementierbar. Dabei muss sichergestellt werden, dass auch beim Verkauf von Windenergieparks nach einer bestimmten Nutzungszeit die Pflichten zur Separation und Zuführung zum Recycling an die neuen Besitzer übergehen und vorhandenen Rückbau-Sicherheitsleistungen an den neuen Betreiber oder in andere Modelle zur Sicherstellung des kontrollierten Rückbaus übergehen.

Neben der Anforderung der Separation in den baurechtlichen oder Betriebsgenehmigungen ist die Schnittstelle zu einem Rechtsrahmen zu erarbeiten, in dem Behandlungsanforderungen definiert werden. Die demontierten magnethaltigen Komponenten können unter die Behandlungsanforderungen des ElektroG2 fallen, wenn die Schnittstelle zwischen Anlagenrecht und ElektroG entsprechend gestaltet wird. Eine vergleichbare Schnittstelle ist im neuen Entwurf der „Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG)“ in der Schweiz vorgesehen, in dem es in Art. 2 (Gegenstand und Geltungsbereich) in Absatz 2 heißt: „Für Geräte in Bauten oder Fahrzeugen gilt die Verordnung nur, wenn deren Ausbau mit verhältnismäßigem Aufwand möglich ist. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) veröffentlicht eine regelmäßig aktualisierte Liste dieser Geräte in einer Richtlinie.“ Die entsprechenden Behandlungsanforderungen (Separation von SE-haltigen Magneten und die Zuführung zu geeigneten Recyclingverfahren) können in die Behandlungsanforderung nach ElektroG2 aufgenommen werden.

Andernfalls kann eine Zuführung zu entsprechenden Behandlungswegen über eine zu entwickelnde rohstoffliche Verordnung nach § 8 KrWG sichergestellt werden (siehe Kapitel 7.4).

Da viele Windenergieanlagen nach Ende der EEG-Förderperiode gewinnbringend in das zumeist europäische Ausland verkauft werden, wäre eine Regelung analog zum deutschen ElektroG auf europäischer Ebene sinnvoll.

Die empfohlenen Schritte sollten vom UBA initiiert werden.

7.1.12 Fahrräder und Raumklimaanlagen

Innerhalb der Produktgruppe Haushaltsanwendungen wurden Fahrräder (Elektrofahrräder und Nabendynamos) und Raumklimaanlagen (Kompressoren) aufgrund der Anwendung von Dysprosium und Terbium in Magneten als mengenrelevant identifiziert. Da die Seltenerd-Magnete auch Neodym enthalten, wird dieses mitbetrachtet.

Für Magnetanwendungen in Fahrrädern und in Raumklimaanlagen wurden die fehlende Separierung SE-haltige Magnete und die fehlenden großtechnischen Verfahren zur Rückgewinnung von SE aus Magneten als wesentliche Schwachstellen der Entsorgungskette identifiziert.

Zur Voraussetzung der Verfügbarkeit von Rückgewinnungsverfahren siehe die Diskussion zur Rückgewinnung von Magnetrohstoffen in Kapitel 7.2.

Durch eine entsprechende Behandlungsanforderung im ElektroG können die Separation von SE-Magneten aus Antrieben von Elektrofahrrädern und Kompressoren und die Zuführung zu geeigneten Rückgewinnungsverfahren verbindlich implementiert werden. Es wird empfohlen, dass diese Anforderungen in die Behandlungsverordnung nach ElektroG2 aufgenommen werden.

Fahrräder mit Nabendynamos fallen nicht in den Geltungsbereich des ElektroG2. Das KrWG umfasst eine allgemeine Anforderung der Rohstoff rückgewinnenden Verwertung (§ 7 Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft, § 8 Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen), die jedoch nicht spezifische Inhaltsstoffe oder Altprodukte adressiert. Eine Verordnung ausschließlich für Nabendynamos von Fahrrädern wird als unverhältnismäßig gesehen. Sinnvoller erscheint auch hier die Integration in eine neu zu entwickelnde rohstoffbezogene Verordnung, die Getrenntsammlungs- und Verwertungspflichten zu verschiedenen Altprodukten zusammenfasst (siehe auch Kapitel 7.4). Auch hier ergibt sich die Notwendigkeit, dass die Produkte entsprechend ihrer Rohstoffgehalte gekennzeichnet sind (unter anderem zur Identifikation der Magnettypen in der Entsorgung) und dass der Nutzer der Produkte auf anderen Wegen über die produktbezogenen Pflichten informiert wird (z. B. Informationspflicht des Verkäufers), damit er Kenntnis über die Pflicht zur Zuführung zur Getrenntsammlung hat.

Auch im Falle der Haushaltsgeräte kann eine veränderte Setzung im Rechtsrahmen auch auf die in Kapitel 6.5 beschriebenen Pfadabhängigkeiten wirken. Separationsanforderungen bilden dabei eine Pflicht, die die Rückgewinnung der ReStra-Zielmetalle fördert, ohne gegen die Notwendigkeit der Beteiligung an einem etablierten Entsorgungspfad (Großschredder für Fe-haltige Altprodukte) wirken zu müssen (siehe Kapitel 6.5.3.9).

Neben der getrennten Abgabe durch den Verbraucher sollte auch die weitere Getrennthaltung des Fahrrades bis zur Separation des Nabendynamos rechtlich etabliert werden.

Die Initiierung der beiden Handlungsansätze (Behandlungsverordnung und Rohstoffverordnung) sollte durch das UBA erfolgen.

7.1.13 Rechenzentren

Rechenzentren wurden als relevantes Einsatzgebiet von Palladium identifiziert. Des Weiteren wurde der Einsatz von Gold und Platin mit untersucht. Gold kommt hauptsächlich auf Leiterplatten zum Einsatz. In Drahtbonds dient es zur Kontaktierung von Halbleiterelementen. Daneben wird es zur Beschichtung bspw. von Steckkontakten eingesetzt. Palladium wird in erster Linie in keramischen Vielschichtkondensatoren sowie als hochwertiges Kontaktmaterial und in geringem

Umfang in Festplatten eingesetzt. Platin wird ebenfalls als Beschichtungselement und in Festplatten eingesetzt. Wesentliche Komponenten in der Untersuchung waren somit die Leiterplatten.

Als wesentlichem Schritt zur Beeinflussung der Rückgewinnung von strategischen Elementen wurde die Vorbehandlung bzw. Aufbereitung der Server identifiziert.

Über eine manuelle Demontage von Gold-, Platin- und Palladium-haltigen Komponenten kann eine Verringerung der Verluste dieser Elemente erreicht werden, die sich jedoch aufgrund der höheren Behandlungskosten nicht 1:1 als Erlös für die Entsorger niederschlägt. Die über das aktuelle Maß hinausgehende manuelle Separation wäre also bei derzeitigen marktwirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen unwirtschaftlich. Die derzeitige ökonomische Situation der verschiedenen Behandlungsrouten lässt erwarten, dass in vielen Fällen die Halbierung der Verluste zu doppelten Behandlungskosten im Vergleich zu den schon bisher separierten Anteilen kommen würde. Erlöse für eine weitergehende Separation sind daher vor allem dort erzielbar, wo sowieso ein Behandlungskonzept mit manuellen Separationstätigkeiten etabliert ist. In einem solchen Behandlungskonzept können zusätzliche Erlöse auch durch einen höheren Reinheitsgrad anderer Fraktionen erzielt werden (Beispiel Festplatten: Fraktion aus sehr reinen Aluminium-Gehäusen, Leiterplatten der hochwertigsten Kategorie, Mitnahmeeffekt ohne besondere Erlöse: Nd-Magnete).

Eine Förderung solcher Demontagekonzepte kann durch eine spezifische Behandlungsanforderung im rechtlichen Rahmen erfolgen (Behandlungsverordnung nach ElektroG2), wie etwa „Separation von Festplatten größer 20 cm² vor der mechanischen Zerkleinerung der Geräte/Komponenten“ und durch die Sicherstellung von Abnahmemöglichkeiten von Magneten (zu SE-haltigen Magneten siehe auch Kapitel 7.2 dieses Berichts).

7.2 Dualer Ansatz am Beispiel von Magnetanwendungen

Beim dualen Ansatz zur Optimierung der Kreislaufführung strategischer Rohstoffe wirken korrespondierende Maßnahmen in unterschiedlichen Bereichen bzw. auf unterschiedlichen Ebenen gezielt zusammen. Der Ansatz wird im Folgenden exemplarisch am Beispiel der Magnetanwendungen ausgeführt und erläutert. Da die Problemstellungen auch bei anderen Altprodukten bzw. ReStra-Zielmetallen bestehen (z. B. Photovoltaikmodulen), gelten die Ausführungen sinngemäß ebenso für andere Altprodukte.

SE-haltige Magnete werden in verschiedenen Produkten verwendet, die in Kapitel 5.3 als relevant identifiziert wurden:

- Fahrrad (Elektrofahrrad, Nabendynamo),
- Windkraftanlagen,
- Raumklimaanlagen (Kompressor),
- Autokomponenten,
- MRT-Geräte,
- Rechenzentren.

Das erwartete Potenzial im Rahmen der ReStra-Produkte liegt im Jahr 2020 bei knapp 15 t mit einer deutlich steigenden Tendenz. Zepf (2015) schätzt das Recyclingpotenzial für das Jahr 2020 auf mindestens 33 t metallisches Neodym. Dabei wird eine größere Produktpalette als im Projekt

ReStra betrachtet (z. B. auch mengenmäßig relevante Anwendungen wie Festplatten, die im Projekt RePro⁷⁴ betrachtet werden oder Elektroautos, die Zepf mit 3 t Nd in 2020 abschätzt). Für Elektrofahrräder wurde von Zepf (2015) eine Neodymmenge von 8 t im Jahr 2020 geschätzt (ReStra für Pedelects 5-6 t), für Windenergieanlagen kommt Zepf zu dem gleichen Schluss wie ReStra, dass keine relevanten Mengen im Jahr 2020 zu erwarten sind. Für MRT und Haushaltsgeräte erfolgt keine Quantifizierung der Erwartungsmengen von Neodym. Zepf (2015) kommt zu dem Ergebnis, dass durch seine Untersuchungen nur etwa ein Viertel, bis ein Drittel des Neodymverbleibs geklärt werden konnte, und hebt die generell schlechte Datenlage bzgl. der Neodym-Produktionsmengen und deren Verbleib hervor. Es ist demnach durchaus plausibel anzunehmen, dass die im Jahr 2020 zum Recycling zur Verfügung stehende Neodymmenge höher als die von Zepf und in Kapitel 6.2.3 abgeschätzten Potenziale ist.

Die Untersuchungen zur Entsorgungssituation (siehe Kapitel 6.2.3) haben als wesentliche Verlustbereiche die fehlende Separation von Seltenerd-Magneten aus dem Geräteverbund und die fehlende großtechnische Rückgewinnung aufgezeigt. Die Separation von SE-Magneten ist zwar aufwendig, aber möglich und wurde im begrenzten Rahmen bereits durchgeführt (z. B. manuell aus Festplatten durch ELPRO-Recycling GmbH, ZME, mechanisch bzw. teilmechanisch z. B.: durch Mitsubishi; siehe auch Kapitel 6.2.3.17). Rückgewinnungsverfahren sind im Pilotmaßstab verfügbar (siehe Technologiescreening in Kapitel 6.1) und haben teilweise einen Reifegrad erreicht, der ein upscaling zur Großtechnik realisierbar erscheinen lässt.

Die Mengenschwelle für einen rentablen Betrieb für die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Magneten beziffert (FEM 2015) in der Größenordnung von 100 t Neodymschrott. Dies entspräche in etwa 33 t metallisches Neodym. Im Rahmen des Projektes MORE (2015) wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung mit Anlagengrößen zwischen 100 t/a und 300 t/a durchgeführt (MORE 2015).

Die ökologische Vorteilhaftigkeit der Wiederverwendung bzw. Rückgewinnung von Neodym aus Magnetwerkstoffen von Industriemotoren im Vergleich zur bergbaulichen Gewinnung von primärem Neodym wurde in MORE (2015) aufgezeigt.

Bei der Entwicklung von Handlungsansätzen zur Stärkung der Kreislaufführung von Seltenerd-Magnetrohstoffen gilt es auch, das in Kapitel 6.2.3 als Hemmnis identifizierte Henne-Ei-Problem aufzulösen, dementsprechend keine Verwertungsanlagen etabliert werden, solange keine Separation für die Magnete erfolgt und umgekehrt aber auch keine Separation der Magnete erfolgt, solange keine Abnahme durch eine Verwertungsanlage sichergestellt ist. Eine vergleichbare Problemstellung liegt auch bei anderen untersuchten Altprodukten vor. Daher haben die folgenden Ausführungen exemplarischen Charakter und sind auch für andere ReStra-Zielmetalle relevant. Für die Optimierung der Rückgewinnung von SE-Magnetrohstoffen besteht somit die Notwendigkeit eines dualen Vorgehens, bei dem die Verfügbarkeit des Rohstoffs (Abfalls) und die Verfügbarkeit von Anlagen für die Verwertung koordiniert entwickelt werden.

⁷⁴ Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro) Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl (UFOPLAN) FKZ 3711 95 318.

7.2.1 Inputorientierte Ansätze

Im Zusammenspiel der dualen Ansätze sichern die inputorientierten Ansätze die Verfügbarkeit von geeigneten Inputstoffen in ausreichenden Mengen. Innerhalb der inputorientierten Ansätze können folgende Elemente zum Erreichen dieser Ziele beitragen:

Pooling

Beim Pooling werden Teilströme aus verschiedenen Produktbereichen und ggf. auch aus verschiedenen räumlichen Zusammenhängen zusammengeführt, um so in der Startphase des Recyclings der strategischen Rohstoffe die Mengenschwelle für eine großtechnische Verwertung früher überschreiten zu können und in der folgenden Konsolidierungsphase einen stabilen Mengenfluss zu sichern.

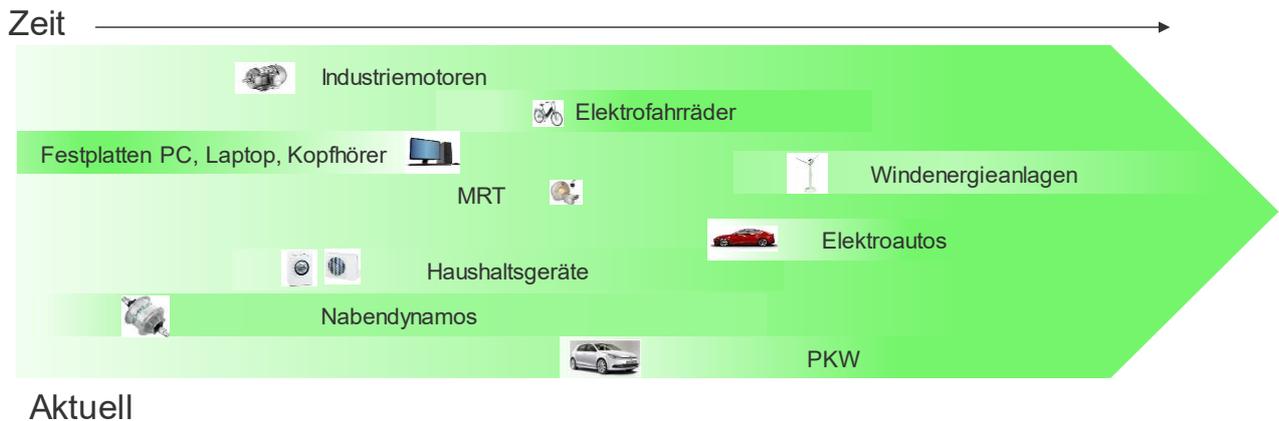
Durch Zusammenführung von Teilströmen aus verschiedenen Altproduktbereichen kann die Mengenschwelle von 100 t Nd wahrscheinlich zwischen 2020 und 2030 erreicht werden.

Dabei muss die Verfügbarkeit von Nd-haltigen Abfällen in der zeitlichen Perspektive als System verstanden werden, in dem verschiedene Altproduktbereiche den Nd-Gesamtstrom zu verschiedenen Zeiten in unterschiedlichem Maße speisen. Aktuell enthalten IT-Altprodukte die größten Mengen Nd (RePro 2015). In der zukünftigen Perspektive (ab 2030) werden die Bereiche Elektromobilität und Windenergieanlagen wichtige Inputbereiche. Für Windenergieanlagen prognostiziert Zepf (2015) für 2030 eine Menge von 500 t/a, für den Bereich der E-Mobilität von 35 t/a. Die abnehmenden Mengen aus dem IT-Bereich werden verstärkt durch Altprodukte aus dem Haushaltsgerätebereich ersetzt (z. B. Raumklimaanlagen) und das Potenzial in gewerblichen Motoren (MORE 2015) liefert ein vergleichsweise stabiles Abfallpotenzial.

Tabelle 247: Abfallpotenzial von Neodym aus verschiedenen Anwendungen im Jahr 2020

Produkt	Abfallpotenzial 2020	Tendenz	Quelle
IT	77 t	sinkend	RePro 2015
Motoren (Maschinen)	60 t	steigend	MORE 2015
Elektrofahrräder	6 t	stark steigend	ReStra
Windenergieanlagen	3 t	stark steigend	ReStra
PKW	2 t	stark steigend	ReStra
Raumklimaanlagen	2 t	stark steigend	ReStra
FCC-Katalysatoren	2 t	gleichbleibend	ReStra
Nabendynamos	1 t	steigend	ReStra
MRTs	<1 t	gleichbleibend	ReStra

Abbildung 74: Systemperspektive auf die (zeitliche) Verfügbarkeit von Nd-haltigen Abfällen



Die Zusammenführung kann durch einen Wirtschaftsakteur (z. B. Entsorger aber auch ein Abfallmakler) erfolgen, der aus den verschiedenen Entsorgungspfaden der Altprodukte akquiriert, wenn die Gewinnschwelle für die Verfahren überschritten wurde. Für den Zeitraum bis zur Überschreitung der Mengenschwelle für einen großtechnischen Betrieb ist der Ansatz der Kumulation sinnvoll (s. u.).

Kumulation

In den Jahren bis zur Etablierung großtechnischer Verfahren werden in diesem Ansatz SE-haltige Magnete bereits gesammelt und zwischengelagert. Durch das gesammelte Material kann ein früherer großtechnischer Start des Rückgewinnungsverfahrens erreicht werden. Zudem stellt die Verfügbarkeit von Inputmaterial für das Recycling (zusammen mit den entsprechenden rechtlichen Rahmenbedingungen für eine längerfristige Verfügbarkeit, s. u.) ein Element der Sicherheit für Anlageninvestitionen dar. Weiterhin können aus einem solchen Pool Pilotverfahren mit Testmaterial versorgt werden und somit die Entwicklung bzw. Optimierung von Rückgewinnungsverfahren unterstützt werden⁷⁵.

Für eine solche Zwischenlagerung bestehen bereits verschiedene Modelle. Für sehr hochwertige Materialien (Edel- und Sondermetalle) bieten verschiedene Unternehmen die Einlagerung an, die jedoch eher auf die Lagerung als Kapitalanlage ausgerichtet ist⁷⁶. Für unbehandelte Abfälle bestehen Modelle zur Zwischenlagerung auf Deponien wie z. B. bei den Ansätzen zur Zwischenlagerung phosphathaltiger Abfälle (Klärschlammaschen) im Rahmen eines Konzeptes für eine zukünftige Rückgewinnung und Kreislaufführung von Phosphor. Für Seltenerd-Magnete, deren Wertniveau zwischen solchen Aschen und den oben genannten Edel- und Sondermetallen liegt, ist das Modell der geschützten Zwischenlagerung auf ausgewiesenen Lagerflächen vorstellbar, wie es z. B. für zu Ballen gepresste Kunststoffe realisiert wird (Entsorgungszentrum Salzgitter GmbH,

⁷⁵ Probleme beim Zugriff auf ausreichende Mengen von Versuchsmaterial können zu deutlichen zeitlichen Verzögerungen bei Verfahrensentwicklungen und -optimierungen führen.

⁷⁶ Z. B. SMH Schweizerische Metallhandels AG (2016), METLOCK GmbH (2016); TRADIUM GmbH (2016).

2016). Als Rechtsgrundlage sind die Anforderungen der Deponieverordnung (DepV)⁷⁷ zu Langzeitlagern (§ 23) zu berücksichtigen.

Für die Zuteilung der Materialien aus der Zwischenlagerung bestehen noch keine etablierten Modelle. Denkbar wäre ein marktorientiertes Modell, bei dem die Mengen nach Angeboten von den Abfallbehandlern vergeben werden. Allerdings könnte ein solches freies System von großen Marktteilnehmern zur Verfestigung einer dominierenden Marktposition genutzt werden. Denkbar wäre z. B. der Ankauf der zwischengelagerten Materialien durch einen Hersteller von Primärrohstoffen. Um einen gezielten Aufbau von Infrastrukturen jenseits der bestehenden großen Anbieter zu etablieren und durch Diversifizierung die Versorgungssicherheit zu erhöhen, könnte die Zuteilung zwischengelagerter Mengen mit der Förderung von Recyclingverfahren verknüpft werden. Denkbar wäre z. B. die Förderung der großtechnischen Implementierung von Recyclingverfahren, wie dies im UIP-Programm⁷⁸ des BMUB für Deutschland erfolgt, unter Einbeziehung der Förderung durch gesicherte Inputmengen aus der Zwischenlagerung.

Die Initiierung sollte kurzfristig durch das UBA im Kontext der Behandlungsverordnung nach ElektroG2 (s. u.) erfolgen. Denkbar ist die Umsetzung durch Entsorger, die über entsprechende Lagerflächen verfügen (siehe Beispiel der Entsorgungszentrum Salzgitter GmbH, 2016) und einer Vorfinanzierung zukünftiger Erlöse aus dem Absatz der Magnete oder im Fall der öffentlichen Verfahrensförderung von großtechnischen Recyclingverfahren die Kofinanzierung durch die öffentliche Hand.

Rechtliche Rahmensetzungen

Für den ersten Abschnitt der Abfallentsorgungskette sollte eine **Getrennthaltungspflicht** für Altproduktströme rechtlich etabliert werden. Die Analysen zu den Entsorgungssituationen für ReStra-Altprodukte mit SE-Magneten (siehe Kapitel 6.2.3) haben gezeigt, dass diese Getrennthaltungspflicht nach Normadressaten differenziert werden sollte. Gerade bei Elektro- und Elektronikgeräten aus dem Privatbereich ist es notwendig, die Sammlung für den Letzthalter möglichst bequem zu gestalten, um hohe Erfassungsquoten zu erreichen (RePro 2015). Daher sollte für solche Gerätearten eine einfache gemeinsame Erfassung mit anderen Gerätearten ermöglicht werden, die vom Verbraucher keine Entscheidung über spezifische Sammelwege erfordert. Die Trennung der entsprechenden Geräte vom Gesamtinputstrom sollte dann beim Erstbehandler erfolgen. Die hierfür notwendige Rahmensetzung einer schonenden Erfassung von Altgeräten ist im ElektroG2 bereits angelegt. Die notwendige Konkretisierung kann als Ergebnis der Behandlungsverordnung nach ElektroG2 (s. u.) durch das UBA erfolgen. Für Abfallströme aus dem gewerblichen Bereich (wie z. B. Windenergieanlagen oder Katalysatoren) sollte der Normadressat vorrangig der Abfallerzeuger sein.

⁷⁷ Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist.

⁷⁸ Siehe <http://www.umweltinnovationsprogramm.de/>

Für Altprodukte, die nicht in den Geltungsbereich des ElektroG fallen, sind jeweils spezifische Regelungen notwendig (siehe oben Kapitel 7.1). Eine Zusammenführung solcher Anforderungen ist im Rahmen einer rohstoffbezogenen Verordnung denkbar (siehe Kapitel 7.4).

Die Etablierung eines Inputstroms sollte zudem durch die Setzung von **Behandlungsanforderungen** für Altprodukte bzw. Abfälle mit SE-Magneten gestützt werden. In welcher Art die Vorbehandlung erfolgt und welche Spezifikationen der Outputstrom erfüllen muss, wird wesentlich durch dasjenige Rückgewinnungsverfahren bestimmt werden, das großtechnisch etabliert ist. Allgemein ist für die meisten Altprodukte die Separation der Seltenerd-Komponenten aus den Geräteverbänden in der Vorbehandlung notwendig⁷⁹. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit, die entsprechenden Geräte identifizieren zu können.

Die **Kennzeichnung** von Produkten stellt oftmals eine wichtige korrespondierende Maßnahme im Produktbereich zur Behandlungs- bzw. ggf. Getrenntsammlungsanforderung im Abfallbereich dar (dualer Ansatz in verschiedenen Rechtsbereichen). Die Untersuchungen zu den Entsorgungssituationen von ReStra-Altprodukten (siehe Kapitel 6.2.3) haben jedoch gezeigt, dass der Kennzeichnung je nach Produkt differenziert erfolgen sollte, je nachdem wie sich die voraussichtliche Entsorgungspraxis darstellt. Bei großen Produkten, die individuell demontiert oder einer spezifischen Behandlung zugeführt werden (Beispiele Windkraftanlagen, MRT), kann eine Kennzeichnung direkt an der spezifischen Komponente erfolgen. Ggf. kann jedoch auch auf eine Kennzeichnung verzichtet werden, wenn sichergestellt ist, dass das demontierende Fachpersonal über das Vorhandensein von SE-Magneten informiert ist. Bei Produkten, die Teil von gemischten Abfallströmen sein können (Beispiel Kompressoren von Raumklimaanlagen), hat die Untersuchung der Entsorgungssituation gezeigt, dass eine Kombination aus geräteartspezifischer Getrennthaltungsanforderung und Kennzeichnung der Produkte notwendig sein wird, da keine in der Praxis etablierten Verfahren zur automatischen Trennung solcher Geräte aus dem Gesamtabfallstrom bekannt sind. Die Analyse der Entsorgung von Altfahrzeugen und den in ihnen enthaltenen SE-magnethaltigen Komponenten haben gezeigt, dass eine Kennzeichnung der Komponenten selbst nicht ausreicht, da die Komponenten oftmals sehr versteckt verbaut sind (z. B. Nd-haltige Stellmotoren). Würde die Information über das Vorhandensein von SE-Magneten in solchen Komponenten erst dann verfügbar sein, wenn die Komponente zugänglich und sichtbar wäre, wäre bereits unvermeidbar viel Zeit investiert, um ggf. lediglich zu erkennen, dass die Komponente nicht gekennzeichnet ist und sie demnach konventionelle Ferrit-Magnete enthält. Im Falle der Auto-komponenten sollte daher die Information über bestehende aber zu erweiternde Informationstools für die Demontagebetriebe verfügbar sein (siehe Kapitel 7.1.5).

Die Untersuchungen zu einigen ReStra-Altprodukten haben aufgezeigt, dass eine Berücksichtigung der Demontagepraxis beim **Produktdesign** zu einer Verbesserung der Kreislaufführung führen würde (z. B. Raumklimaanlagen Kapitel 6.2.3.17 oder Elektrofahrräder und Nabendynamos Kapitel 6.2.3.15 und 6.2.3.16, siehe auch Kapitel 7.1.12). Ein solches Design for Dismantling

⁷⁹ FCC-Katalysatoren bilden hier beispielsweise eine Ausnahme, da hier die Seltenen Erden nicht als Magnetstoffe genutzt werden.

(DfD) muss die praktischen Möglichkeiten der Demontage mit den Spielräumen beim Produktdesign zusammenbringen. Das Potenzial hierzu liegt bei den Herstellern der Produkte (siehe z. B. Mitsubishi 2015 für Raumklimaanlagen⁸⁰). Der Verrechtlichungsansatz der erweiterten Herstellerverantwortung ist im ElektroG und der Altfahrzeugverordnung und dem Batteriegesetz bereits etabliert. Zur Umsetzung des abstrakten Rechtsansatzes sollten zu den oben beschriebenen Behandlungsanforderungen jeweils korrespondierende Designanforderungen in der Ökodesignrichtlinie verankert werden.

Die entsprechenden Schritte sollten vom UBA initiiert werden.

Die Untersuchungen zu den Treibern, die eine Rückgewinnung von ReStra-Zielmetallen fördern, haben gezeigt, dass die derzeitigen gesamtmassenbezogenen **Recyclingziele** nicht für die Förderung der Kreislaufführung von strategischen Rohstoffen geeignet sind. In der Regel können solche Ziele erreicht werden, ohne dass strategische Rohstoffe recycelt werden. Das Recyclingziel für die untersuchten Rechenzentren (siehe Kapitel 6.2.3.21) gemäß § 23 des ElektroG2 für IT-Equipment von 70 % bezogen auf die Gesamtkategorie der IT-Geräte kann z. B. erreicht werden, ohne dass SE-Magnete recycelt werden. Die bestehenden gesamtmassenbezogenen Recyclingziele sollten daher durch spezifische rohstofforientierte Ziele ergänzt oder ggf. ersetzt werden. Entsprechend den Ausführungen in den element- bzw. produktbezogenen Kapiteln muss es sich bei den Zielen nicht notwendigerweise um quantitative Ziele handeln.

Ansatzpunkt sollte für die Altprodukte, die unter das ElektroG2 fallen, die europäische WEEE-Richtlinie sein und für Autokomponenten die Altfahrzeugrichtlinie, um europaweit einheitliche Standards zu erreichen. Hierüber werden die meisten in ReStra untersuchten Altprodukte mit SE-Magneten erfasst. Zusatzregelungen sind für Nabendynamos und Windenergieanlagen notwendig (siehe hierzu auch das Kapitel 7.4).

Logistik

Die Teilmengen von SE-Magneten aus der Behandlung von Altgeräten bzw. aus dem Rückbau fallen weit verstreut und teilweise mit jeweils geringen Mengen an. Um die Umweltbelastungen und Kosten aus dem Transport möglichst gering zu halten, ist eine optimierte Logistik notwendig. Denkbar wären hier die Kombination mit anderen Transportvorgängen und das optimierte Ineinandergreifen von Logistikprozessen aus unterschiedlichen Kontexten und unterschiedlichen Akteuren (wie z. B. Abfall- und Neuproduktlogistik, Zulieferer und Entsorgung, etc.). Hierzu sind umfangreiche Vernetzungen von Anfallstellen, Verwertungsanlagen, Materialströmen, Transportvorgängen, Angebote und Nachfragen von Abfällen, Stoffen und Produkten sowie Logistikeinheiten hilfreich. Das prinzipielle Potenzial einer solchen Vernetzung und optimierten Logistik wurde im Rahmen der Diskussion um die „Industrie 4.0“ deutlich (BMBF 2016, BMWi 2016). Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Anforderungen an die Logistik im Rahmen von Produktionspro-

⁸⁰ Ein weiteres aktuelles Beispiel für ein Produkt außerhalb des ReStra-Portfolios ist die automatische Zerlegung von Mobiltelefonen, die von Apple entwickelt wurde (<http://arstechnica.co.uk/gadgets/2016/03/apples-recycling-robot-liam-can-dismantle-an-iphone-in-11-seconds/>).

zessen (Beispiel Daimler siehe ACATECH 2013) auf Prozesse der Abfallwirtschaft erscheint sinnvoll und sollte im Rahmen eines Forschungsprojektes vom UBA/BMUB bzw. BMBF gefördert werden.

7.2.2 Verfahrenorientierte Ansätze

In Verbindung mit den inputorientierten Ansätzen wird durch verfahrenorientierte Ansätze die Entwicklung bzw. großtechnische Implementierung von Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren gefördert.

Verfahrensentwicklung

Die Förderung der Entwicklung bzw. Optimierung von Rückgewinnungsverfahren kann durch die Aufnahme solcher Verfahren in die Forschungs- und Entwicklungsförderung erfolgen. Für Verfahrenstechnologien, die vor dem upscaling stehen, sollte die Förderung über das Umweltinnovationsprogramm geprüft werden, das die erstmalige, großtechnische Anwendung einer innovativen Technologie fördert⁸¹. Die Unterstützung kann ebenfalls durch Kredite aus spezifischen Programmen wie z. B. dem Umweltprogramm oder dem Innovationsprogramm der KfW⁸² erfolgen. Eine Beratung durch Institutionen, wie z. B. die KfW kann auch die Prüfung der Möglichkeit öffentlicher Bürgschaften, wenn dem Kapitalgeber die Sicherheiten nicht ausreichen.

Das UBA kann in diesem Rahmen den Bedarf solcher Unternehmensentwicklungen öffentlich deutlich machen und auf das Potenzial und die Fördermöglichkeiten verweisen.

Anlagenabsicherung

Als sehr wesentlichen Impuls für die Sicherung von Investitionen wird gesehen, dass durch die entsprechenden rechtlichen Rahmenbedingungen (Getrennthaltung, Behandlungsanforderungen, Recyclingziele) und die Abfallmengen aus der Zwischenlagerung (s. o. „Kumulation“) das notwendige Inputmaterial für die Start- und Betriebsphase der Anlage verfügbar gemacht wird. Eine Zuteilung des Inputmaterials aus der Zwischenlagerung kann ggf. mit den Förderprogrammen verbunden werden, wenn das wirtschaftliche Modell der Zwischenlagerung dies erlaubt (s. o. „Kumulation“).

Die Absicherung des Outputs der Behandlung bzw. Rückgewinnung durch Preisgarantien für Sekundärmaterialien sollte als weitere Möglichkeit für die Unterstützung in einer zeitlich begrenzten Startphase geprüft werden, soweit dies rechtlich möglich ist.

7.2.3 Weitere Aspekte

Die Untersuchungen zu den Verlusten in den Entsorgungsketten (siehe Kapitel 6.2) sowie den entwickelten Handlungsansätzen (siehe Kapitel 7.1) zeigen auch für andere Anwendungen bzw.

⁸¹ Siehe <http://www.umweltinnovationsprogramm.de/>

⁸² Siehe <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/index-2.html>

Altprodukte auf, dass Solitärmaßnahmen in einigen Fällen nicht die beste Option zur Optimierung von komplexen Entsorgungssituationen sind. Die Untersuchungen zu Automobilkomponenten (Kapitel 0) zeigen, dass ein dualer Ansatz auch übergreifend über verschiedene Rechtsbereiche wirksamer ist, als Solitärmaßnahmen (Kapitel 7.1.5). Anforderungen im Rahmen der Ökodesignrichtlinie zur Realisierung von Design for Dismantling (DfD)-Ansätzen sind als korrespondierende Maßnahme sinnvoll, um die Situation bei der Demontage von SE-haltigen Komponenten und die Separation von SE-Magneten aus den Komponenten zu verbessern. Das verknüpfende Element zwischen den beiden Handlungsbereichen kann in der Praxis die erweiterte Herstellerverantwortung sein. Ein Beispiel aus dem Bereich der Elektrogeräte sind japanische Hersteller von Raumklimaanlagen, die zur Erfüllung des Ziels der Ressourcenschonung einen Prozess zur Separation von SE-Magneten entwickelt und dabei DfD-Ansätze berücksichtigt haben wie z. B. Mitsubishi (2015).

Solche DfD-Ansätze, z. B. im Kontext der Ökodesignrichtlinie, sollten grundsätzlich aus der tatsächlichen Entsorgungspraxis abgeleitet werden und immer mit korrespondierenden Maßnahmen im Bereich Abfallbehandlung verknüpft sein.

Für eine Reihe von Produkten bzw. Altprodukten ist die Verfügbarkeit von Informationen über die Inhaltsstoffe von Altprodukten bzw. Separationsmöglichkeiten ein wesentlicher Punkt zur Optimierung der Kreislaufführung (z. B. Automobilkomponenten oder Raumklimaanlagen).

Informationen nach Produktart

Im Kontext der Umsetzung der europäischen Elektro- und Elektronikaltgeräte Richtlinie und der RoHS Richtlinie schlugen Herstellern vor, dass die Entsorger relevante Informationen zu Schadstoffen in Altprodukten direkt von den Herstellern beziehen können. Dabei wurde als Bezugseinheit "positive presence of materials and components as listed in Annex A, at product level or product family level" gesetzt (EICTA 2005). Würde ein vergleichbarer Ansatz auf die Altprodukte des ReStra-Projektes und auf das Vorhandensein strategischer Metalle übertragen, ergäben sich möglicherweise Schwierigkeiten in Bezug auf die Vielfalt der Produktvariationen. So würde es nicht ausreichen, wenn Informationen zum Produkt „Photovoltaikmodul“ verfügbar wären. Notwendig wären vielmehr Informationen, die mindestens nach Art des PV-Moduls differenziert sind. Die Feststellung, welche Art vorliegt, kann für einige Module aufgrund des Aufdrucks vorgenommen werden (CdTe-Module der Firma FirstSolar besitzen z. B. eine laufende Nummer und eindeutige Bezeichnung). In anderen Fällen ist jedoch detailliertes Fachwissen für die Identifizierung erforderlich (z. B. bei amorphen Siliziummodulen im Vergleich zu anderen Dünnschichtmodulen).

Informationen nach Produktvarianten

Eine weitergehende Detaillierung der Informationen erfolgt z. B. in der IDIS-Datenbank („International Dismantling Information System“), in dem 889 Pkw-Modelle mit 1.847 Varianten enthalten sind (Stand Oktober 2013; Version 5.33) (siehe hierzu auch Kapitel 7.1.5). Die Grenzen der Nutzbarkeit einer solchen Datenbank für die Identifizierung des Vorhandenseins von strategischen Metallen für die Entsorger wäre erreicht, wenn unterhalb des Differenzierungsgrades „Varianten“, also z. B. auf der Ebene der „Versionen“ relevante Unterschiede zum Tragen kämen. Dies ist z. B. bei Autos der Fall, bei denen individuelle Ausstattungen einen Großteil der strategischen Metalle enthalten können.

Informationen je Produkt

Ein gerätebezogenes Produkt-Informationssystem stellt die IMEI-Datenbank („International Mobile Station Equipment Identity“) dar, in der gerätespezifische Informationen zu mobilen Kommunikationsgeräten gespeichert sind (z. B. Frequenzbereich). Ein solches System stellt die eindeutige Identifizierung auf Geräteebene sicher. Informationen zu den Inhaltsstoffen sind in der IMEI-Datenbank nicht enthalten.

7.3 Rohstoffbezogene Ansätze - Lanthan & Cer

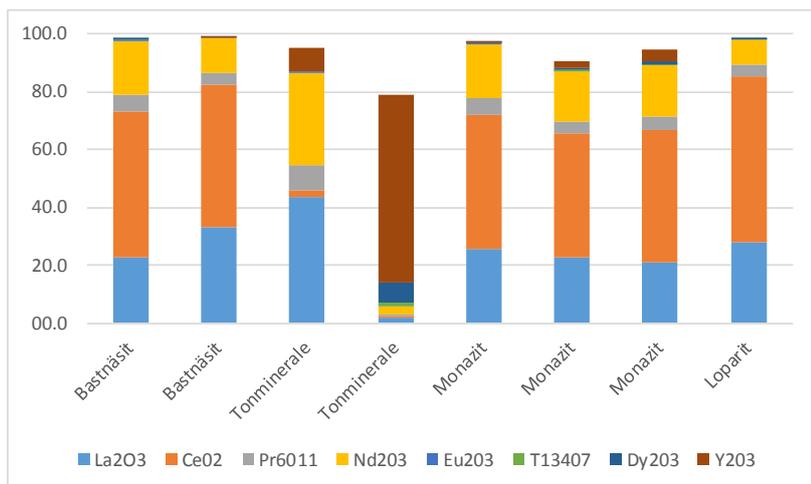
Die Untersuchungen zur Verwendung von Lanthan und Cer (siehe Kapitel 5.2) und die Produktidentifizierungen bzw. -analysen (siehe Kapitel 5.3) zeigten, dass das Recyclingpotenzial von Lanthan und Cer im Jahr 2020 bei den in ReStra untersuchten Produkten bei 277 t Lanthan und rund 420 t Cer (entsprechend 1-2 % der Weltjahresförderung) liegt.

Die relevanten ReStra-Produkte mit identifizierten Optimierungspotenzialen ((siehe Kapitel 6.2.3) sind Katalysatoren, Brennstoffzellen und Poliermittel sowie für Cer auch in geringen Mengen LED Anzeigetafeln und Spezialgläser.

Aufbereitung und Rückgewinnungsverfahren sind teilweise verfügbar, teilweise in der Entwicklung. Wesentliches Hemmnis ist der relativ geringe Rohstoffpreis und somit das Fehlen ökonomischer Treiber für die Rückgewinnung.

Die spekulationsgetriebene Preisentwicklung, wie sie sich vermutlich in den Preisen der Jahre 2010 und 2011 niedergeschlagen hat, stellt aufgrund erwartbarer Preisvolatilitäten keine sichere Basis für die Etablierung großtechnischer Rückgewinnungsanlagen dar. Bei der Entwicklung von Handlungsansätzen für eine optimierte Kreislaufführung ist zudem zu berücksichtigen, dass La und Ce in Erzen mit anderen Seltenen Erden vergesellschaftet sind, die für Magnete eingesetzt werden (Nd, Pr, teilweise Dy). Durch die Nachfrage nach Magnetrohstoffen fallen La und Ce in großen Mengen als Koppelprodukte bzw. -vorprodukte an (Binnemans 2013, Binnemans 2013a). Zudem werden leichte SE zunehmend als weniger kritisch hinsichtlich ihrer Gesamtversorgungslage eingeschätzt (EU 2014).

Abbildung 75: Anteile verschiedener Seltener Erden in SE-Erzen, Datengrundlage: Kennedy (2014), eig. Darstellung



Die Kostendifferenz zwischen Primär- und Sekundärroute kann nicht allgemein quantifiziert werden (vgl. Kapitel 6.6.2). ISE (2015) prognostiziert auch für die nähere Zukunft eher fallende Preistendenzen bei den beiden Elementen aufgrund von Überkapazitäten und großen Lagerbeständen.

Grundsätzlich hat die Analyse der bestehenden Situation und der Prognosen für das Jahr 2020 gezeigt, dass eine politische Entscheidung über die Förderung/Forderung einer Rückgewinnung von La und Ce notwendig ist, die die Zielsetzungen aus der Kritikalitätsdiskussion (z. B. Versorgungssicherheit, Umweltaspekte der Rohstoffgewinnung) gegen die ökonomische Situation abwägt und dabei auch mittel- bzw. langfristige Perspektiven berücksichtigt, die aktuell nicht als ökonomische Impulse wirken.

Es erscheint sinnvoll, die Lanthan- und Cer-Rückgewinnung zunächst aus solchen Zusammenhängen in den Blick zu nehmen, wo Synergien genutzt bzw. erzielt werden können (Kombinationseffekte). Als Beispiel ist das Recycling edelmetallhaltiger Katalysatoren zu nennen, die Lanthan bzw. Cer enthalten und bei denen für die Erfassung der Seltenen Erden keine zusätzlichen Logistikkosten anfallen. Ein solches Vorgehen kann z. B. im Zusammenhang mit Automobilkatalysatoren geprüft werden (Schöne 2015). Weiterhin sollte im Verlauf von öffentlich geförderten Forschungsvorhaben wie z. B. des r⁴-Förderprogramms des BMBF geprüft werden, ob post consumer-Abfälle in die Verwertungsverfahren für Abfälle aus der Produktion von SE-haltigen Katalysatoren integriert werden können⁸³.

Weiterhin wird empfohlen, eine Langzeitlagerung von Lanthan- und Cer-Abfallfraktionen unter anderem hinsichtlich ihrer Effekte für eine verbesserte Versorgungssicherheit in der Zukunft (Diversifizierung der Quellen), möglicher Umwelteffekte und der Kostenwirkung zu prüfen. Dabei sollte als Szenario berücksichtigt werden, dass zukünftig SE-Magnetrohstoffe aus dem Recycling verfügbar werden und als zweite Quelle neben den Primärrohstoffen mit den Lanthan- und Cer-Koppelprodukten bestehen.

Die rechtliche Grundlage für eine solche Langzeitlagerung ist über § 23 der Deponieverordnung (DepV) gegeben. Notwendig wäre darüber hinaus eine rechtliche Anforderung, die die Zuführung von geeigneten Lanthan- und Cer-Abfällen zu den Langzeitlagern verbindlich macht. Neben den Lanthan- und Cer-relevanten Altprodukten, die in ReStra untersucht wurden bzw. den Behandlungsrückständen dieser Altprodukte sollte dann ggf. eine konkrete Benennung weiterer relevanter Abfallströme wie z. B. Produktionsabfälle erfolgen.

Die Initiierung eines entsprechenden Prozesses (Prüfung der Wirkung und Folgen einer Langzeitlagerung von Lanthan- und Cer-Abfällen auf Versorgungssicherheit, Umwelteffekte und Kosten) sollte durch das UBA/BMUB erfolgen.

⁸³ Z. B. bei dem r⁴-Vorhaben: Lan-Tex - Rückgewinnung von Lanthan aus Rückständen der Raffineriekatalysatorherstellung für die Petrochemie mit Hilfe von Polyelektrolyt-ausgerüsteten Textilien.

7.4 Rechtliche Rahmensetzungen

Die Analysen zu den Entsorgungssituationen für ReStra-Altprodukte (siehe Kapitel 6) haben gezeigt, dass für einige Altprodukte kein Rechtsrahmen besteht, in denen weiterführende Anforderungen zur Kreislaufführung von ReStra-Zielmetallen operationalisiert werden können. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über bestehende spezifische Rechtsrahmen, die bereits Elemente zur optimierten Kreislaufführung von ReStra-Zielmetallen enthalten oder für dieses Ziel geeignet wären.

Tabelle 248: Überblick rechtlicher Rahmen (Status quo) in Bezug auf die Zielsetzung des Projektes ReStra

Produkt	Bestehender spezifischer Rechtsrahmen	Spezifische Getrennthaltungspflicht	Behandlungsanforderung entsprechend den ReStra-Zielen	Kennzeichnung
Homogene Katalyse				
Umweltkatalysatoren				
FCC-Katalysatoren				
Autokatalysatoren	AltfahrzeugV			
Autokomponenten	AltfahrzeugV	Abgabe des Altfahrzeugs zu Demontagebetrieben		
PV	ElektroG			
Hitzeschutzkeramiken				
NiMH-Batterien	BattG			
Poliermittel				
MRT	ElektroG	Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG		
Röntgengeräte	ElektroG	Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG		
Windenergieanlagen				
Elektrofahrrad	ElektroG	Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG		
Nabendynamos				
Raumklimaanlagen	ElektroG	Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG		
Rechenzentren	ElektroG	Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG	teilweise	

Für diejenigen Altprodukte, für die keine spezifischen Verordnungen oder Gesetze vorhanden sind, regelt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) die allgemeinen Anforderungen an die Entsorgung. Für eine Operationalisierung des so gegebenen allgemeinen Rahmens besteht die Möglichkeit, spezifische Verordnungen z. B. auf der Grundlage der Verordnungsermächtigung in § 8

KrWG zu erlassen. Spezifische Verordnungen je Altproduktgruppe oder Metall würden jedoch zu unverhältnismäßigen Aufwänden im politischen und Rechtssetzungsprozess führen. Sinnvoller erscheint die Etablierung einer rohstoffbezogenen Verordnung, die Maßnahmen zur optimierten Kreislaufführung von strategischen Rohstoffen in verschiedenen Altprodukten zusammenfasst.

Eine solche Verordnung kann z. B. die Stoffgruppe der kritischen Rohstoffe nach EU (EU-Kom 2014) und die verschiedenen Stufen der Entsorgungsketten der mengenrelevanten Altprodukte und Produktionsabfälle umfassen. Weiterhin sollte sie in den relevanten Fällen Anforderungen an die Kennzeichnung der Produkte stellen.

Eine Anwendung des Prinzips der erweiterten Herstellerverantwortung, wie dies z. B. im ElektroG2, der AltfahrzeugV und dem BattG umgesetzt ist, kann für verschiedene Produkte sinnvoll sein, wie z. B. Windenergieanlagen, um die Verantwortlichkeiten für die Lösung der aufgezeigten Problemstellungen (siehe Kapitel 7.1 sowie Kapitel 6.2) dem Akteur zuzuordnen, der Einfluss auf verschiedene Stufen des Lebensweges nehmen kann.

Die folgende Tabelle fasst die Empfehlungen zur Setzung von Rechtsrahmen aus dem Kapitel 7.1 zusammen. Dabei werden die bestehenden Rechtsrahmen (ElektroG2, AltfahrzeugV, BattG) vorrangig beibehalten und ggf. ergänzt. Eine Getrenntsammlungspflicht setzt auch voraus, dass die Produkte entweder entsprechend ihrer Rohstoffgehalte gekennzeichnet sind oder dass der Nutzer der Produkte auf anderen Wegen über die produktbezogenen Pflichten informiert wird (z. B. Im Rahmen der Informationspflicht des Verkäufers). Dies wird in der Spalte Kennzeichnung/Informationspflicht berücksichtigt.

Vor dem Inkrafttreten einzelner Anforderungen müssen die entsprechenden Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren etabliert sein oder es ist ein entsprechender Übergangszeitraum aufzunehmen. Im Hinblick auf Lanthan- und Cerhaltige Abfälle ist zu berücksichtigen, dass ggf. eine politische Entscheidung zur Rückgewinnung oder Langzeitlagerung vorausgesetzt wird.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 249: Überblick über die Empfehlungen rechtlicher 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 an Demontagebetrieben)		Separation und Zuführung zur Rückgewinnung,	Best Practice Transport und Behandlung		
Autokomponenten	Gd, Tb, Dy	AltfahrzeugV		Letzthalter (Abgabe des Altfahrzeugs an 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
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	

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

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
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)
Raumklimaanlagen		ElektroG		Endnutzer, Sammelsystem nach ElektroG			Separation SE-Magnete, Zuführung zur Rückgewinnung		Label Komponente (Kompressor)

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

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
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 Industrieemissionsrichtlinie⁸⁴ als Optimierungsansatz infrage. Die Referenzdokumente zur Besten verfügbaren Technik bieten insbesondere die Möglichkeit, Ansätze innerhalb von Produktionsprozessen zu optimieren. Dies wird z. B. im Rahmen von ReStra in Bezug auf die Getrennthaltung von Abfällen bei Poliermittelabfällen in der Glasindustrie empfohlen (siehe Kapitel 7.1.9). Sinnvoll erscheint zudem die Betrachtung von Produktionseffizienzen, die den Verbrauch von Rohstoffen je Produkteinheit beschreiben bzw. die Formulierung von Mindesteffizienzen. Dies ist derzeit in den Referenzdokumenten noch nicht realisiert, wird aber als Maßnahme mit deutlichem Potenzial für eine Optimierung der Kreislaufführung strategischer Rohstoffe gesehen. Durch eine Definition der Besten verfügbaren Technik zur Rückgewinnung strategischer Rohstoffe bestünde auch eine Möglichkeit der Steuerung von Abfallfraktionen in effektive Rückgewinnungsprozesse durch die Festlegung von BVT-Anlagen als Entsorgungsweg.

Das Referenzdokument zur Abfallbehandlung⁸⁵ beschreibt Beste verfügbare Techniken im Bereich der Abfallbehandlung auf allgemeinerem Niveau bzw. für Bereiche, die für ReStra nicht relevant sind. Die Vielfalt der Entsorgungsprozesse macht es schwierig, auf einer solchen übergeordneten Ebene spezifische Anforderungen zu entwickeln, die auch die für die Zielsetzung des ReStra-Projektes wichtige Kettenbetrachtung bzw. das Ineinandergreifen verschiedener technischer und organisatorischer Maßnahmen zur Kettenoptimierung umfassen.

Der Ansatz der Best Environmental Management Practice (BEMP) im Rahmen der Aktivitäten der Europäischen Kommission zur Implementierung des freiwilligen „EU Eco-Management and Audit Scheme“ (EMAS) betrachtet auch komplexe Produktionsprozesse und teilweise auch die Entsorgung der Altprodukte aus den jeweiligen Produktionssektoren. Derzeit ist das Referenzdokument für den Sektor „Fahrzeugherstellung“ in der Bearbeitung (JRC 2016). Der BEMP-Ansatz wird als Möglichkeit gesehen, Ansätze zum Design for Dismantling sowie der Kennzeichnung zu implementieren.

Sowohl beim BVT- als auch beim BEMP-Ansatz wird die Notwendigkeit gesehen, die Zielsetzung der optimierten Kreislaufführung strategischer Rohstoffe in die laufende Diskussion und die derzeitigen Arbeiten auf EU-Ebene einzubringen. Dies sollte durch das UBA im Rahmen der Beteiligung den Prozessen und Abstimmungen erfolgen.

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 (siehe hierzu auch Kapitel 6.5.3.7).

⁸⁴ RICHTLINIE 2010/75/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung).

⁸⁵ Eine überarbeitete Version des Referenzdokuments Abfallbehandlung befindet sich derzeit (Stand Januar 2016) in der Abstimmung (siehe http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WTbref_1812.pdf).

Die Erfahrungen aus dem letzten Revisionsprozess des Europäischen Abfallkataloges (Sander 2008, EC 2015) zeigen, dass eine solche grundsätzliche Veränderung des Kataloges als langfristiger Prozess angelegt werden muss. Als kurzfristiger realisierbarer Schritt kann die Ergänzung des bestehenden Kataloges durch 8-stellige Abfallschlüssel erfolgen. Solche Abfallschlüssel werden bereits z. B. bei der Abfallstatistik von DESTATIS genutzt (DESTATIS 2015g) und werden auch in anderen Mitgliedstaaten genutzt.

Zwar sind in den vorangegangenen Kapiteln Handlungsempfehlungen mit dem Fokus auf einzelne Rechtsbereiche dargestellt worden. Die Vielfalt der rechtlichen Eingriffsebenen und die angesprochenen Schnittstellen zwischen den Rechtsbereichen, die in den beschriebenen Handlungsempfehlungen berührt sind, zeigen jedoch, dass in einer langfristigen Perspektive ein homogenes „Stoffrecht“ einem fragmentierten Recht nach Lebenszyklusphasen und/oder Produkten deutlich sinnvoller sein wird, um den effizienten Einsatz von Rohstoffen und ihre Kreislaufführung zu optimieren. Für eine Optimierung der Kreislaufführung strategischer Rohstoffe sollten jedoch parallel zu dieser Langfristperspektive auch kurz- bzw. mittelfristige Ansätze verfolgt werden.

7.5 Überblick Handlungsempfehlungen

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

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 250: Überblick Handlungsempfehlungen

ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle)	Handlungsansatz	Aufwand Initialisierung	Aufwand Durchführung	Wirkung Mengenanteil	Wirkung Umwelt (KEA * Anteil)	Kritikalität: Versorgungsrisiko global	Kritikalität: Vulnerabilität global	Kritikalität EU
Homogene Katalyse (Pd, Pt)	optimierte Information	gering	gering	gering	hoch	mittel	mittel	kritisch
	Getrenntsammlungspflicht	hoch (Gesetzgebungsprozess)	mittel					
Umweltkatalysatoren (Pt)	optimierte Information	gering	gering	gering	mittel	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	mittel	hoch	kritisch
	zu La & Ce siehe rohstoffbezogene Ansätze unten							
Automobilkomponenten (Gd, Dy, Tb, Nd)	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					mittel	mittel	kritisch
	Demontagegerechte Konstruktion							
	optimierte Information	mittel bei freiwilliger Maßnahme, hoch bei Gesetzgebungsverfahren	gering bis mittel		gering			
	Demontageanforderungen	hoch (Gesetzgebungsprozess)	hoch					

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle)	Handlungsansatz	Aufwand Initialisierung	Aufwand Durchführung	Wirkung Mengenanteil	Wirkung Umwelt (KEA*Anteil)	Kritikalität: Versorgungsrisiko global	Kritikalität: Vulnerabilität global	Kritikalität EU
	Schnittstelle ElektroG2	hoch (Gesetzgebungsprozess)	gering					
Photovoltaik-Module (In) (keine Ansätze für Ga, Ge)	Behandlungsanforderungen	hoch (Gesetzgebungsprozess)	hoch	gering	gering	hoch	mittel	kritisch
Hitzeschutzkeramiken (Y)	Förderung Verfahrensentwicklung Rückgewinnung	gering	hoch (finanziell)	gering	gering	mittel	mittel	kritisch
NiMH-Batterien (Ce, La, Sm)	zu La & Ce siehe rohstoffbezogene Ansätze unten							
	optimierte Information	keiner (ist bereits initialisiert)	gering					
	Behandlungsanforderungen	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-BehandlungV))	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	kritisch
Poliermittel (Ce, La)	zu La & Ce siehe rohstoffbezogene Ansätze unten							
MRT (Dy, Tb)	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten							
	optimierte Information	gering	gering			mittel	mittel	kritisch
	Behandlungsanforderungen	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-BehandlungV))	mittel	mittel	mittel			
Röntgengeräte (Gd)	Entwicklung Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren	gering	hoch (finanziell)	mittel	gering	mittel	gering	kritisch

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle)	Handlungsansatz	Aufwand Initialisierung	Aufwand Durchführung	Wirkung Mengenanteil	Wirkung Umwelt (KEA*Anteil)	Kritikalität: Versorgungsrisiko global	Kritikalität: Vulnerabilität global	Kritikalität EU
Windenergieanlagen (Nd, Dy)	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					mittel	mittel	kritisch
	Schnittstelle ElektroG2	hoch (Gesetzgebungsprozess)	gering	gering	gering			
	Behandlungsanforderung	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-BehandlungV))	gering					
Elektrofahrräder (Nd, Dy, Tb)	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					mittel	mittel	kritisch
	Behandlungsanforderung	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-BehandlungV))	mittel	hoch	hoch			
Nabendynamos (Nd, Pr)	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					mittel	mittel	kritisch
	Behandlungsanforderung	hoch (Gesetzgebungsprozess)	mittel	gering	mittel			
Raumklimaanlagen (Nd, Dy)	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen siehe unten					mittel	mittel	kritisch
	Behandlungsanforderung	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-BehandlungV))	mittel	gering	mittel			
Rechenzentren (Pd)	allgemeine Ansätze zu SE-Magnetrohstoffen (Festplatten) siehe unten					mittel	mittel	kritisch
	Behandlungsanforderung	mittel (Berücksichtigung im Rahmen der ElektroG2-BehandlungV))	mittel	gering	mittel			

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

ReStra-Altprodukt (ReStra-Zielmetalle)	Handlungsansatz	Aufwand Initialisierung	Aufwand Durchführung	Wirkung Mengenanteil	Wirkung Umwelt (KEA*Anteil)	Kritikalität: Versorgungsrisiko global	Kritikalität: Vulnerabilität global	Kritikalität EU
	Dualer Ansatz zu Magnetanwendungen	unterschiedlich, überwiegend mittel-hoch		hoch	hoch	mittel	mittel	kritisch
	Rohstoffbezogene Ansätze zu Lanthan & Cer	unterschiedlich, überwiegend mittel-hoch		hoch	hoch	mittel	mittel	kritisch
	Rechtliche Rahmenseetzungen	unterschiedlich, überwiegend mittel-hoch		hoch	hoch	verschiedene		

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

8 Quellen

- ACATECH (2013): Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Studie im Auftrag des BMBF, April 2013, https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Ackermann, Lothar (2013): Geschäftsführer FEE, pers. kom. 24.10.2012 und 18.06.2013.
- Adasch, Volker (2012): Fa. Dronco AG. Persönliche Auskunft per Email am 26.11.2012
- ADFC 2013. Die neuen Beleuchtungsvorschriften. <http://www.adfc.de/technik/fahrradteile-und-zubehoer/beleuchtung/beleuchtungsvorschriften/die-neuen-beleuchtungsvorschriften> (zuletzt abgerufen am: 19.01.2015).
- ADV (2013): <http://www.adv.aero/verkehrszahlen/archiv/statistiken-ivf-2012/> Letzter Aufruf: 30.08.2013
- aero.de (2012): Luftfahrt-Nachrichten und -Community. Frankfurt. Online verfügbar unter <http://www.aero.de/news-14328/Lufthansa-mustert-ihre-erste-Boeing-747-400-aus.html>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2012, zuletzt geprüft am 15.01.2013.
- Agito Medical (2013): Gebrauchte Medizinische Geräte - Unsere Dienstleistungen. Online verfügbar unter <http://www.agitomedical.com/de/unsere-dienstleistungen>, zuletzt geprüft am 18.06.2013
- AirBerlin (2013b): Unsere Flotte. Online verfügbar unter <http://www.airberlin.com/de-DE/site/flotte.php>, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Aircraft-commerce.com (2005): Aircraft Owner's and Operator's Guide: 747-200/-300 (41). Online verfügbar unter http://www.aircraft-commerce.com/sample_articles/sample_articles/owners_guide.pdf, zuletzt aktualisiert am 25.10.2005, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Alba R-Plus GmbH (2013): Ressourcen. http://www.alba.info/ALBA_de/business/ALBA_Regional/visitenkarten/ALBA_R_plus_GmbH_4.php . zuletzt geprüft am 01.08.2013.
- Allen (2011): Allen, Jim (2011): Molycorp, Inc. Präsentation Dezember 2011. https://www.google.de/search?q=operating+cost+molycorp&ie=utf-8&oe=utf-8&rls=org.mozilla:en-GB:official&client=firefox-a&gws_rd=cr, zuletzt geprüft am 19.07.13
- Alstom (2013): Gasturbinen. Alstom. Online verfügbar unter <http://www.alstom.com/germany/de/products-and-services/power/portfolio/turbines/gas-turbines>, zuletzt geprüft am 03.01.2013.
- Althaus (2007): Althaus, H.-J.; Hischier, R.; Osses, M.; Primas, A.; Hellweg, S.; Jungbluth, N.; Chudacoff, M. (2007): Life Cycle Inventories of Chemicals, Rare earth oxide production from bastnasite. Ecoinvent Datenbank, v2.0.
- Al-Thyabat (2013): Al-Thyabat, S., Nakamura, T., Shibata, E., & Iizuka, A. (2013). Adaptation of minerals processing operations for lithium-ion (LiBs) and nickel metal hydride (NiMH) batteries recycling: Critical review. *Minerals Engineering*, 45, 4-17. doi:10.1016/j.mineng.2012.12.005
- Alvarez-Galvan (2008): Alvarez-Galvan, M.C; Navarro, R.M; Rosa, F.; Briceño, Y.; Ridao, M.A; Fierro, J.L.G (2008): Hydrogen production for fuel cell by oxidative reforming of diesel surrogate: Influence of ceria and/or lanthana over the activity of Pt/Al₂O₃ catalysts. In: *Fuel* 87 (12), S. 2502-2511.

- Alwast (2010): Alwast, Holger; Riemann, Axel (2010): Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Texte 50/2010. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/UBA_Endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.13
- American Indium Corporation (o.J.): Indium Metal. American Indium Corporation. o.O. Online verfügbar unter <http://www.indium.com/products/indiummetal.php>, zuletzt geprüft am 15.08.2012.
- American Physical Society; Materials Research Society (2011): Energy Critical Elements. Securing Materials for Emerging Technologies. A report by the APS panel on public affairs & the materials research society. Unter Mitarbeit von Robert Jaffe, Jonathan Price, Gerbrand Ceder, Rod Eggert, Thomas E. Graedel, Karl Gscheidner et al. Washington, USA.
- AMS (2009): Biomining zur Metallextraktion aus Erzen und Abfällen, Ausgabe 01/2009, S. 28-30, Online verfügbar unter: <http://www.advanced-mining.com/interaktiv.php?id=01/2009>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- Ancona (2001): Ancona, Dan; McVeigh, Jim (2001): Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet. Prepared for the Office of Industrial Technologies, US Department of Energy. Princeton Energy Resources International, LLC. Online verfügbar unter http://www.perihq.com/documents/windturbine-materialsandmanufacturing_factsheet.pdf, zuletzt geprüft am 18.01.2013.
- Angerer (2009): Angerer, Gerhard; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, Frank; Scharp, Michael; Lüllmann, Arne; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.
- Angerer (2009a): Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M. (2009a): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. IRB Verlag, Stuttgart 2009.
- Angerer (2010): Angerer, G.; Mohring, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Wietschel, M. (2010): Kupfer für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Karlsruhe, Fraunhofer ISI http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/e/projekte/kupferstudie_fsem_314536_wi.php, zuletzt am 20.7.2012 abgerufen.
- Anspach, W., Christ, B. (1999): Disposal of the control rods of the experimental and research reactor (FMRB) of PTB, Germany, Konferenzbeitrag zu WM Symposia 1999, online verfügbar unter <http://www.wmsym.org/archives/1999/06/6-2.pdf>, zuletzt geprüft am 03.01.2013
- Arbizzani C. et al., 2006: Electrodeposited PtRu on cryogel carbon-Nafion supports for DMFC anodes, Elsevier Paper, online verfügbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775306009037?np=y#>, zuletzt aufgerufen am 24.07.2015
- Arthur, WB (1989) Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. The Economic Journal 99(394):116-131. doi: 10.2307/2234208
- ASUE (2006): Gasturbinen-Kenndaten-Referenzen. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- ASUE (2009): Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasturbinen. Gesetzliche Rahmenbedingungen, Aktuelle Entwicklungen, Betriebserfahrungen. ASUE-Fachtagung 29.-30. September 2009, Berlin. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. Berlin. Online verfügbar unter http://asue.de/cms/upload/inhalte/veranstaltungen/fachveranstaltung_berlin_2009/asue-tagungsband-gasturbinen-berlin-2009.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2013.

- Auer, Anton (2012): Fa. Treibacher. Persönliche Auskunft per Email am 13.12.2012
- auto.freenet (2008): Lexikon: Bus-Systeme - Technik. Online verfügbar unter http://auto.freenet.de/tests/technik/lexikon-bussysteme_269306_554030.html, zuletzt geprüft am 15.03.2013.
- Automotive Fuel Cell Cooperation: Automotive Fuel Cell Cooperation. Company website. Online verfügbar unter <http://www.afcc-auto.com/>, zuletzt geprüft am 24.07.2012.
- Aviation-Broker.com (2012): Fragen rund ums Fliegen. Online verfügbar unter <http://www.aviation-broker.com/flugzeuge/technik.html>, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Ayastuy, J.L; Gurbani, A.; González-Marcos, M.P; Gutiérrez-Ortiz, M.A (2010): Effect of copper loading on copper-ceria catalysts performance in CO selective oxidation for fuel cell applications. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (3), S. 1232-1244.
- AZWORLD AIRPORTS (2013) <http://www.azworldairports.com/azworld/p1600.cfm> Letzter Aufruf: 30.08.2013
- Azzopardi, B.; Mutale, J. (2010): Life cycle analysis for future photovoltaic systems using hybrid solar cells. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (3), S. 1130-1134.
- Babar, Fazal-ur-Rehman (2013): Gas Turbines Maintenance Inspections and Calculations fo Equivalent Operating Hours. Online verfügbar unter <http://de.scribd.com/doc/37753088/Gas-Turbine-Equivalent-Op-Hours-for-Maintenance>, zuletzt aktualisiert am 04.02.2013, zuletzt geprüft am 04.02.2013.
- Bacos, Marie-Pierre; Dorvaux, Jean-Marc; Landais, Stéphane; Lavigne, Odile; Mévrel, Rémy; Poulain, Martine et al. (2011): 10 Years-Activities at Onera on Advanced Thermal Barrier Coatings. In: *Journal AerospaceLab* (3).
- Baitz, Martin; Kreisig, Johannes (2007): AP6 Allokation des AK Methodik. Projektbericht. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse: Karlsruhe
- Balman, Alfons (1994): Pfadabhängigkeiten. Begriff, Identifikation und ihre Bedeutung in Agrarstrukturentwicklungen. Beitrag zum Workshop "Evolutorische Ökonomik" in Buchenbach, 26.-29.10.1994. Institut für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Barbir F., 2005: PEM Fuel Cells - Theory and Practice, Elsevier Academic Press.
- Batista, Carlos (2007): Thermal barrier coatings (TBCs) - State of the art. In: Laser-glazing of Plasma-sprayed Thermal Barrier Coatings - Experimental and Computational Studies. Universidade do Minho. Online verfügbar unter <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/8084/1/Chapter%201.pdf>, zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- BattG (2009): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren. Batteriegesetz, vom 25.06.2009, zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212). Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/battg/gesamt.pdf>.
- Bätzner, Derk Leander (2008): Performance and Stability of CdTe/CdS Solar Cells for Terrestrial and Space Applications. Dissertation. ETH Zürich, Zürich. Online verfügbar unter <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:26067/eth-26067-01.pdf>, zuletzt geprüft am 18.10.2012.

- Baumann F.M. et al., 2015: EnergieAgentur. NRW GmbH, online abrufbar unter: <http://www.brennstoffzelle-nrw.de/brennstoffzellen/typen/afc/>, zuletzt aufgerufen am 21.07.2015
- Bautista, R. G. (2003): Processing to obtain High-Purity Gallium, *Journal of Metals*, Vol. 3
- BDEW (2012): 69 Kraftwerke bis 2020 geplant. Anlage zur Presseinformation "Trotz Milliardeninvestition keine Entwarnung beim Kraftwerksbau". Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Online verfügbar unter [http://bdew.de/internet.nsf/id/91C0FC9A8D7AD3EEC12579E9002F8CBF/\\$file/120424%20Anlage%20zur%20PM%20Hannover_Kraftwerksliste%20aktuell.pdf](http://bdew.de/internet.nsf/id/91C0FC9A8D7AD3EEC12579E9002F8CBF/$file/120424%20Anlage%20zur%20PM%20Hannover_Kraftwerksliste%20aktuell.pdf), zuletzt aktualisiert am 24.04.2012, zuletzt geprüft am 03.01.2013.
- Beck, Tilmann; Herzog, Roland; Trunova, Olena; Offermann, Marita; Steinbrech, Rolf W.; Singheiser, Lorenz (2008): Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma-sprayed thermal barrier coating systems for gas turbines – Part II: Modeling. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (24), S. 5901-5908.
- Becker, P. C.; Olsson, N. A.; Simpson, J. R. (1999): Erbium-doped fiber amplifiers. Fundamentals and technology. San Diego: Academic Press.
- Beckmann, Jürgen (2012): Wieso Abfall? Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen. In: *Installateur* (2). Online verfügbar unter http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/elektro/entsorgung_photovoltaike.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2013.
- Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz (2010a): Querschnittstechnologien - Innovationssprünge für Ressourceneffizienz. Explorationsstudie im Auftrag des VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Online verfügbar unter http://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/EP_Querschnittstechnologien_F_26-8-2010_.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2011.
- Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz; Marwede, Max; Caporal, Sophie (2010): Roadmap: Ressourceneffizienzste Photovoltaik 2020+. Arbeitspaket 9 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). Hg. v. Umwelt Energie GmbH Wuppertal Institut für Klima. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Wuppertal.
- Behrendt, Siegfried; Scharp, Michael; Kahlenborn, Walter; Fell, Moira; Dereje, Cornelia; Bleischwitz, Raimund; Delzeit, Ruth (2007): Seltene Metalle. Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. Forschungsbericht 363 01 124. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 08/07).
- Bell, Terence (2013): Metal Profile: Rhodium. Online verfügbar unter <http://metals.about.com/od/properties/a/Metal-Profile-Rhodium.htm>, zuletzt geprüft am 04.09.2013.
- Bergamos 2015: M. Bergamos ELPRO Recycling GmbH, pers. kom. Februar 2015
- Berger, Wolfgang; Simon, Franz-Georg; Weimann, Karin; Alsema, Erik A. (2010): A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. In: *Resources, Conservation and Recycling* 54 (10), S. 711-718.
- Bernstein, L. R. (1985). Germanium geochemistry and mineralogy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11), 2409-2422.
- Bhandarker, Vrinda (2011), Led Lighting Market Trends, Presentation To Strategies In Light Conference, Santa Monica, aus *Lighting The Clean Revolution*, Climate Group, June 2012, Online verfügbar unter http://thecleanrevolution.org/_assets/files/LED_report_web1.pdf, zuletzt geprüft am 12.02.2013.

- Bikipedia 2013: http://www.bikipedia.de/wp-content/uploads/downloads/ANTRIEBSSYSTEM_BIONX.pdf (letzter Zugriff 14.05.2013)
- BINE Informationsdienst (2010): Recycling von Photovoltaik-Modulen. projektinfo 02/10. FIZ Karlsruhe. Karlsruhe; Bonn. Online verfügbar unter http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2010/Projektinfo_02-2010/projekt_0210_internetx.pdf, zuletzt aktualisiert am 19.03.2010, zuletzt geprüft am 05.10.2011.
- Binnemans, K., Pontikes, Y., Jones, P. T., van Gerven, T., & Blanpain, B. (2013b). Recovery of rare earths from industrial waste residues: a concise review. In A. Malfliet, P. T. Jones, K. Binnemans, Ö. Cizer, J. Fransaer, P. Yan, . . . B. Blanpain (Eds.), *Proceedings of the Third International Slag Valorisation Symposium. The Transition to Sustainable Materials Management* (pp. 191-205).
- Binnemans, Koen; Jones, Peter Tom; Blanpain, Bart; van Gerven, Tom; Yang, Yongxiang; Walton, Allan; Buchert, Matthias (2013a): Recycling of Rare Earths: a Critical Review. In: *Journal of Cleaner Production* 51, S. 1-22.
- Bitkom (2013): pers.kom. Februar 2013
- BITKOM; ZVEI (2010): Erläuterungen zur Wiederverwendung von ausgedienten Elektro- und Elektronikgeräten. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.; Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Berlin/Frankfurt.
- Blacksmith Institute (2007): The world's worst polluted places. The Top Ten (of The Dirty Thirty). Blacksmith Institute, New York, September 2007.
- Blacksmith Institute (2011): The World's Worst Toxic Pollution Problems. Report 2011. <http://www.worstpolluted.org/2011-report.html> am 29.5.2012.
- Bleiwas, Donald I. (2010): Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells. Circular 1365.Hg. v. USGS - U.S. Geological Survey. USGS - U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/circ/1365/Circ1365.pdf>, zuletzt aktualisiert am 13.12.2010, zuletzt geprüft am 19.07.2012.
- Bleiwas, Donald I. (2013): Potential for Recovery of Cerium Contained in Automotive Catalytic Converters. Open-File Report 2013-1037.U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1037/OFR2013-1037.pdf>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Blesl M. et al., 2013: Zentrum für Energieforschung Stuttgart, Entwicklungsstand und Entwicklungsbedarf stationärer Brennstoffzellen, online verfügbar unter: http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/ZES_2006_0009_Brennstoffzelle.pdf, zuletzt aufgerufen am 06.08.2015
- Bloodworth, A. (2014): „Track flows to manage technology - metal supply”, *Nature* Vol505, January 2014, pp.19-20
- BMBF (2012): Medizintechnik - die Herausforderungen der Zukunft angehen. Online verfügbar unter <http://www.bmbf.de/de/1170.php>, zuletzt geprüft am 26.08.2013.
- BMBF (2013): Gesundheitsforschung - Medizintechnik. Online verfügbar unter <http://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/de/157.php>, zuletzt geprüft am 26.08.2013.
- BMBF 2016: Bundesministerium für Bildung und Forschung: Zukunftsprojekt Industrie 4.0 <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>, zuletzt geprüft am 18.02.2016

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

- BMU (2012a): Erneuerbare Energien - Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Hg. v. Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Bundesministerium für Umwelt. Online verfügbar unter http://www.erneuerbare-energien.de/erneuerbare_energien/datenservice/zeitreihen/doc/45919.php, zuletzt aktualisiert am 25.09.2012, zuletzt geprüft am 15.10.2012.
- BMU (2012b): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht - BMU - FKZ 03MAP146. Unter Mitarbeit von Joachim Nitsch, Thomas Pregger, Tobias Naegler, Dominik Heide, Diego de Luca Tena, Franz Trieb et al. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE). Stuttgart; Kassel; Teltow. Online verfügbar unter http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/12.03.29.BMU_Leitstudie2011/BMU_Leitstudie2011.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2012.
- BMU (2015): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG). Ausfertigungsdatum: 20.10.2015. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/elektrog_2015/gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 8.3.2016
- BMU; UBA (2010): Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2008 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG. Umweltbundesamt; Bundesministerium für Umwelt. Online verfügbar unter http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/germany_elv_quota_qualityreport.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2013.
- BMU; UBA (2012): Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2011 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG. Umweltbundesamt; Bundesministerium für Umwelt. Online verfügbar unter http://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Wasser_Abfall_Boden/Abfallwirtschaft/qualitaetsbericht_alffahrzeug_2011_bf.pdf
- BMVBS (2007): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Online verfügbar unter <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/32104/publicationFile/663/verkehrsprognose-2025-kurzfassung.pdf>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- 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
- BMWi (2016): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Industrie 4.0: Digitalisierung der Wirtschaft, <https://www.bmwi.de/DE/Themen/Industrie/industrie-4-0.html>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Bömmel (2013): Bömmel, F., EHS Officer, Healthcare Sector, Imaging and Therapy Division: Schriftliche Korrespondenz (email), 11.03.2013.
- Böni (2015): Böni, H., Wäger, P., Figi, R. (2015): Rückgewinnung von kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung, Vortrag Recycling und Rohstoffe, 2015, Berlin
- Bosch (2013): Pressemitteilung der Bosch AG, <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6242>, zuletzt geprüft am 27.10.2013.

- Brand-Schock (2011): Brand-Schock, Ruth: Getriebelose Antriebstechnik als Zukunftsoption. In: Branchen- und Exportforum Erneuerbare Energien. Hannover, 2011. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Veranstaltungen/2011/Vortraege_BE/EE/07.04.12.20_Presentation_Brand-Schock_Getriebelose_An.pdf zuletzt geprüft am 09.03.2013
- Bräunling (2009): Bräunling, W.: Flugzeugtriebwerke. Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme. 3. Aufl. Dordrecht; New York: Springer.
- Brenscheidt, Thomas (2001): Katalysatorträger. Ein Überblick. In: Christian Hagelüken (Hg.): Autoabgaskatalysatoren. Grundlagen, Herstellung, Entwicklung, Recycling, Ökologie. Renningen-Malmsheim: expert-Verl.
- Briem, Sebastian; Blesl, Markus; Fahl, Ulrich; Ohl, Michael; Moerschner, Johannes; Eltrop, Ludger et al. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechnologien. Forschungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart; Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Stuttgart; Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum; Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München. Stuttgart.
- Briggs, John (2008): Abrasives Industry Market Report 2009. Leaflet. Online verfügbar unter http://www.caroledesign.co.uk/nick/Mat-tech/Mat-tech_home_files/Abrasives_Industry_09.pdf, zuletzt aktualisiert am 04.12.2009, zuletzt geprüft am 09.01.2013.
- 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
- Brokdorf-akut (2013): Technische Daten des Betreibers EON - Brokdorf-akut. Brokdorf. Online verfügbar unter <http://www.brokdorf-akut.de/brokdorf--in-zahlen.html>, zuletzt aktualisiert am 22.09.2013, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- Büchel, Karl Heinz; Moretto, Hans-Heinrich; Woditsch, Peter (1999): Industrielle Anorganische Chemie. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D. (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential; Öko-Institut; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenia.
- Buchert, Matthias (2013): E-Schrottreycling - Eine ökologische Bewertung. Wertstoff Elektroschrott. Hamburg T.R.E.N.D. 2013. Hamburg, 06.02.2013. Online verfügbar unter http://hamburgtrend.info/fileadmin/user_upload/pdf/Vortraege_2013/Buchert_E_Schrottreycling_Eine_oekologische_Bewertung.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2013.
- Buchert, Matthias, Andreas Manhart, Daniel Bleher, and Detlef Pingel. (2012b). "Recycling critical raw material from waste electronic equipment." Ökoinstitut e.V., Darmstadt.
- Buchert, Matthias; Hermann, Andreas; Jenseit, Wolfgang; Stahl, Hartmut; Osyguß, Bianca; Hagelüken, Christian (2007): Verbesserung der Edelmetallkreisläufe: Analyse der Exportströme von Gebrauch-Pkw und Elektro(nik)geräten am Hamburger Hafen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE Vorhaben FKZ 363 01 133. Ökoinstitut e.V. Darmstadt. Online verfügbar unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3200.pdf>, zuletzt geprüft am 10.04.2013.

- Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Dittrich, Stefanie; Hacker, Florian; Schüler-Hainsch, Eckhard; Ruhland, Klaus et al. (2011): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Darmstadt. Online verfügbar unter http://www.resourcefever.org/publications/reports/Endbericht_OPTUM%20Ressourcen.pdf, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Buchert, Matthias; Manhart, Andreas; Bleher, Daniel; Pingel, Detlef (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38. Hg. v. Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Landesamt für Natur. Recklinghausen. Online verfügbar unter <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe38/fabe38.pdf>, zuletzt geprüft am 12.03.2012.
- Buchert, Matthias; Manhart, Andreas; Bleher, Daniel; Pingel, Detlef (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38. Hg. v. Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Landesamt für Natur. Recklinghausen.
- Buchert, Matthias; Schüler, Doris; Bleher, Daniel (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential. UNEP report. Unter Mitarbeit von Nicole Neuhoff und Christian Hagelüken. Hg. v. Ökoinstitut e.V. Ökoinstitut e.V. Darmstadt, zuletzt geprüft am 16.03.2011.
- Bünzli, J.C.G; Pecharsky, V.K (2012): Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths: Including Actinides: Elsevier Science.
- Burmeister, Rolf; Döbbler, Philipp (2013): Telefonisches Gespräch mit Till Zimmermann am 7.6.2013. MTU. Hannover, Bremen.
- Butterman, W.C; Jorgenson, John (2004): Germanium. Mineral Commodity Profiles; Open-File Report 2004-1218.Hg. v. USGS - U.S. Geological Survey und U.S. Department of the Interior. Reston, Virginia. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1218/2004-1218.pdf>, zuletzt geprüft am 20.07.2012.
- bvse (2010): PET-Recycler haben einen schwierigen Stand. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. Online verfügbar unter http://www.bvse.de/2/3541/PET_Recycler_haben_einen_schwierigen_Stand, zuletzt aktualisiert am 25.01.2010, zuletzt geprüft am 07.01.2013.
- BWE (2012): Bundesverband WindEnergie e.V. Online verfügbar unter <http://www.wind-energie.de/>, zuletzt aktualisiert am 26.10.2012, zuletzt geprüft am 26.10.2012.
- BWE (2013): Bundesverband WindEnergie e.V. Online verfügbar unter <http://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland>, zuletzt aktualisiert am 13.03.2013, zuletzt geprüft am 13.03.2013.
- BWE (2013a): Bundesverband WindEnergie e.V. Online verfügbar unter <http://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/installierte-windenergieleistung-deutschland>, zuletzt aktualisiert am 13.03.2013, zuletzt geprüft am 13.03.2013.
- BWE (2013b): Rückbau | Bundesverband WindEnergie e.V. Online verfügbar unter <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik/betrieb/rueckbau>, zuletzt geprüft am 21.08.2013.
- Campagna, Robert (2012): FCC Network Editor, Refining Process Services. Persönliche Auskunft per Email am 10.12.2012
- Cao, X.Q; Vassen, R.; Stoeber, D. (2004): Ceramic materials for thermal barrier coatings. In: *Journal of the European Ceramic Society* 24 (1), S. 1-10.
- CCR REBAT (2012): Erfolgskontrolle 2012 gemäß §15 (1) BattG. Dornach.

- CEMEX 2012, Consumer Electronics Marktindex Deutschland, Online verfügbar unter http://www.bvt-ev.de/bvt_cm/der_markt/downloads/CEMIX_Q1-Q4_2011.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2013
- Chancerel, Perrine (2010): Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. An assessment of the recovery of gold and palladium. Dissertation. TU Berlin, Berlin. Fakultät III - Prozesswissenschaften.
- Chancerel, Perrine; Meskers, Christina E.M; Hagelüken, Christian; Rotter, Vera Susanne (2009): Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. In: *Journal of Industrial Ecology* 13 (5), S. 791-810.
- Chancerel, Perrine; Rotter, Susanne (2009a): Edelmetallrückgewinnung aus Elektro- und Elektronikgeräten durch Aufbereitung. Recovery of precious metal through preprocessing of waste electrical and electronic equipment. In: *Müll und Abfall* (2), S. 78-82.
- chemie.de (2012): Terbium. Online verfügbar unter http://www.chemie.de/lexikon/Terbium.html?iframe=true&width=95%25&height=95%25Category%3AHuman_proteins.htmlFrancium.html, zuletzt geprüft am 14.12.2012.
- Chen, Yunxia; Liu, Weimin (2002): Preparation and tribological properties of sol-gel zirconia thin films stabilized with ceria. In: *Materials Letters* 55 (6), S. 407-413.
- Chiou, Josh Y.Z; Siang, Jia-Yi; Yang, Shih-Yi; Ho, Kuan-Fu; Lee, Chin-Ling; Yeh, Chuin-Tih; Wang, Chen-Bin (2012): Pathways of ethanol steam reforming over ceria-supported catalysts. In: *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Christie, Brian (2013): All In Sustaining Cost Reporting - Gold Industry's new standard? Präsentation zum Denver Gold Group Luncheon, 6. Mai 2013, Toronto
- Chryssos, Georgios (2011): Sammelquoten und Recyclingziele im Wettbewerb. 20 Jahre Abfallwirtschaft, Herstellerverantwortung und Produktpolitik. Gemeinsames Rücknahme System. Dresden. Online verfügbar unter http://faa-tagungen-dresden.de/wp-content/uploads/09_Chryssos.pdf, zuletzt aktualisiert am 01.10.2011, zuletzt geprüft am 29.08.2013.
- Clarke, D.; Phillpot, S. (2005): Thermal barrier coating materials. In: *Materials Today* 8 (6), S. 22-29.
- Clarke, David R.; Oechsner, Matthias; Padture, Nitin P. (2012): Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. In: *MRS Bull.* 37 (10), S. 891-898.
- Classen, M.; Althaus, Hans-Joerg; Blaser, S.; Tuchschnid, M.; Jungbluth, Niels; Doka, G. et al. (2009): Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No. 10.Hg. v. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Schweiz.
- clearwater (2011): Aerospace Global Report 2011. A Clearwater Industrials Team Report. clearwater; IMAP. Online verfügbar unter http://www.imap.com/imap/media/resources/Aerospace_8_1FED752787A1E.pdf, zuletzt aktualisiert am 17.01.2011, zuletzt geprüft am 08.02.2013.
- Condor (2012): Condor - Unternehmen | Unsere Geschichte. Online verfügbar unter <http://www.condor.com/de/unternehmen/unsere-geschichte.jsp>, zuletzt geprüft am 08.02.2013.
- Condor (2013): Unsere Flotte. Online verfügbar unter <http://www.condor.com/de/unternehmen/unsere-flotte.jsp>, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Constantinides 2012: Constantinides, S.: The Important Role of Dysprosium in Modern Permanent Magnets, Rochester, 2012; <http://www.arnoldmagnetics.com>

- Corrice, Leslie (2011): The Hiroshima Syndrome - Nuclear waste: is it? Online verfügbar unter <http://www.hiroshimasymdrome.com/nuclear-waste-is-it.html>
- Crowson, P. (2012): Some observations on copper yields and ore grades. Resources Policy 37, 59-72.
- cuxhaven.de (o.J.): Stadt Cuxhaven - Flugzeuge. Online verfügbar unter <http://www.cuxhaven.de/staticsite/staticsite.php?menuid=66&topmenu=13>, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Cycled 2015: Deubzer, O.: Cycling resources embedded in systems containing Light Emitting Diodes (cycLED); <http://www.cyc-led.eu/index.php>, zuletzt geprüft 08.10.2015
- Czech, Norbert (2010): Korrosion und Beschichtung. In: Christof Lechner und Jörg Seume (Hg.): Stationäre Gasturbinen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Daimler AG (2012): Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz A-Klasse. Online verfügbar unter http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/2240745_Umwelt_Zertifikat_Mercedes-Benz_A_Klasse.pdf, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Dammshäuser, Anna (2003): Gallium&Germanium- Von der Lagerstätte bis zur Verwendung. Umweltgeochemisches Seminar WS 2003/2004. Online verfügbar unter <http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~dg21/geochem0304/GaGe.pdf>. Zuletzt geprüft am 27.06.2013
- dAtF (Deutsches Atomforum e.V) (2012): Kernkraftwerke Deutschland - Zahlen und Fakten. <http://www.kernenergie.de/kernenergie/themen/kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland.php>. Aufgerufen am 16.01.2013.
- de.cn (2012): In China entwickelter Passagierjet Comac C919 soll im Jahr 2014 starten. Online verfügbar unter http://de.ce.cn/ga/un/unternehmen/201209/18/t20120918_581146.shtml, zuletzt aktualisiert am 18.09.2012, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Dedalus Consulting (2008): World Market for Abrasives Projected to Grow 5.6% per year from 2008 to 2013. Online verfügbar unter <http://www.dedalusconsulting.com/news-events/press-releases/81-world-market-abrasives>, zuletzt geprüft am 11.01.2013.
- DEPATIS (1980): Verfahren zur Aufarbeitung von verbrauchten, vorzugsweise abgerösteten Katalysatoren, Treibacher Chemische Werke AG, Treibach (Österreich); Veröffentlichungsnummer: DE 000002744573 C3, online Verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=main&content=einsteiger&action=treffer&first-doc=1>, zuletzt geprüft am 14.01.2014
- DEPATIS (1993): Verfahren zur Rückgewinnung von Seltenen Erden, SUMITOMO CHEMICAL CO, Veröffentlichungsnummer: DE 000003688043 T2, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE000003688043T2>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (1996): Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus gebrauchten Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren, Treibacher Auermet Produktionsgesellschaft mbH und Varta Batterie AG, Veröffentlichungsnummer: DE 000004445495 A1, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE000004445495A1>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (1999): Verfahren zur: Wiederverwendung von Dauermagneten, Vacuumschmelze GmbH, Veröffentlichungsnummer DE 000019843883 C1, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE000019843883C1>, zuletzt geprüft am 13.01.2014

- DEPATIS (2000): Verfahren zur Rückgewinnung von wiederverwendbaren Wertstoffen aus seltene Erden und Nickel enthaltendem Legierungsschrott, SANTOKU METAL INDUSTRY CO. LTD., Veröffentlichungsnummer: DE 000069701155 T2, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE000069701155T2>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (2006a): Verfahren zum elektrodenspezifischen Recycling von Nickel-Metallhydrid-Traktionsbatterien, KALI UMWELTTECHNIK GMBH, Veröffentlichungsnummer: DE 102004029658 A1, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE102004029658A1>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (2006b): Vorrichtung zur mobilen Vorbehandlung und Analyse von edelmetallhaltigen Katalysatoren, UMICORE AG & CO KG, Veröffentlichungsnummer: DE 202004020741 U1, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE202004020741U1>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (2008): VERFAHREN ZUR RÜCKGEWINNUNG VON PALLADIUM, Universita Degli Studi di Cagliari und Universita' Degli Studi di Trieste, Veröffentlichungsnummer: DE 602005003217 T2, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE602005003217T2>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (2012a): Verfahren zur Gewinnung von Metallen und Seltenen Erden aus Schrott, Eco-loop GmbH, Veröffentlichungsnummer: DE 10 2011 100 995 A1, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE102011100995A1>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (2012b): Vorrichtung zur Identifikation und Selektierung gebrauchter Kfz-Katalysatoren mit Einrichtungen zur Freilegung, Erkennung und Rückgewinnung ihrer Inhaltswertstoffe, Dipl.-Ing. Walter Schopf, Veröffentlichungsnummer: DE 102011012543 A1, Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE102011012543A1>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DEPATIS (2012c): Verfahren und Anlage zur Wiedergewinnung von Metallen aus Verbundmaterialien, insbesondere aus Siliciumsolarmodulen, Dünnschichtsolarmodulen, LCD-Displays od. dgl., LOBBE Industrieservice GmbH & Co.KG, Veröffentlichungsnummer: DE 102011109922, Online verfügbar unter <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20130213/patents/EP2556893NWA2/document.pdf>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- DERA Deutsche Rohstoffagentur(2012): DERA Rohstoffinformation - Deutschland Rohstoffsituation 2011. Berlin 2012
- Destatis (2011): Produktion des Verarbeitenden gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden Fachserie 4 Reihe 3.1 - 2011, *2811 24 000 Windgetriebene Stromerzeugungsaggregate (Windturbinen), online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Konjunkturdaten/ProduktionJ.html>, Seite 229, zuletzt geprüft am 12.03.2013.
- Destatis (2013b), Statistisches Bundesamt, Produktionswert, -menge, -gewicht und Unternehmen der Vierteljährlichen Produktionserhebung: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis (9-Steller), Wiesbaden 2013, Stand: 16.01.2013
- Destatis (2013a), Persönliche Auskunft per Email von Karl Bloos, Abteilung Produktionserhebungen -Destatis am 19.03.2013

- Destatis (2013b): Bruttoinlandsprodukt 2012 für Deutschland - Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 15. Januar 2013 in Wiesbaden, online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2013/BIP2012/Pressebrochure_BIP2012.pdf?__blob=publicationFile, Seite 6, zuletzt geprüft am 24.04.13.
- DESTATIS 2013: Statistisches Bundesamt: Abfallentsorgung Fachserie 19 Reihe 1 - 2013, <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallentsorgung.html>, zuletzt geprüft am 08.02.2016
- DESTATIS 2015: Statistisches Bundesamt: Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden 2015, https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallentsorgung2190100137004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft 08.10.2015
- DESTATIS 2015g: DESTATIS: Abfallkatalog auf Basis des Europäischen Abfallverzeichnisses Stand 2015, www.statistikportal.de/statistik-portal/Abfallkatalog.pdf, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Deubzer (2012): Cycling resources embedded in systems containing Light Emitting Diodes, Brüssel, 2012
- Deubzer 2015: Deubzer, O.: Lessons Learnt - CycLEDConference, 19th of May 2015, Berlin http://www.cyc-led.eu/ppt/Z_Lessons%20Learnt.pdf, zuletzt geprüft 08.10.2015
- Deutsche Agentur für Rohstoffe (Hrsg.) (2013): Rohstoffpreise. http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/SharedDocs/GT_Produkte/Mineral_Rohstoffe/CPL_alle-Gen-Tab_DE.html?nn=1797074 (aufgerufen am: 06.06.13)
- Deutsche Bahn (2013), Die sieben Bahnhofskategorien, http://www.deutschebahn.com/de/geschaefte/infrastruktur/bahnhof/bahnhofs_kategorien.html, 19.03.2013
- Deutsches Atomforum e.V. - dAtF (2012): Kernkraftwerke Deutschland - Zahlen und Fakten. <http://www.kernenergie.de/kernenergie/themen/kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland.php>. Aufgerufen am 16.01.2013.
- Deutsches Windenergie-Institut(2012): Infoblatt, online verfügbar unter http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Statistics%20Pressemitteilungen/31.12.12/Infoblatt_2012.pdf, zuletzt geprüft 12.03.2013
- Die Welt 2012: Verkaufszahlen von E-Bikes steigen - Elektrofahrrad laut Branchenverband häufig nur Zweitfahrrad; 27.07.12 Interview, Gespräch <http://www.welt.de/newsticker/news3/article108396914/Verkaufszahlen-von-E-Bikes-steigen.html> Zugriff 10.10.2012
- DIN EN ISO 14040:2009-11: Titel (deutsch): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006
- Displaysearch (2012), http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/120118_low_cost_direct_led_backlights_to_reduce_premium_for_led_backlit_lcd_tvs.asp, 12.02.2013
- Displaysearch (2012-1), <http://displaydaily.com/2012/05/22/led-backlit-tvs-to-dominate-in-2012/>, 12.02.2013
- DisplaySearch. (2011b). LED Market Continues to Grow Rapidly, Transitioning to Lighting Applications. Retrieved March 26, 2012, b from http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/110824_led_market_continues_to_grow_rapidly_transitioning_to_lighting_applications.asp

- DLR (Köln): Luftverkehrsbericht 2011. Daten und Kommentierungen des deutschen und weltweiten Luftverkehrs. Unter Mitarbeit von Peter Berster, Marc Gelhausen, Wolfgang Grimme, Michael Hepling, Stephan Horn, Alexandra Leipold et al. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr, zuletzt geprüft am 24.01.2013.
- DOE (2010): U.S. Department of energy: Critical Materials Strategy. December 2010.
- Doebber, Philipp (2013): Firma MTU. Persönliche Kommunikation mit Till Zimmermann am 29.07.2013.
- Dorfmann, Mitchell; Dambra, Chris (2001): Wärmedämmende Beschichtungen für Turbinen: Verbesserter Wärmeschutz. Sulzer Metco (Sulter Technical Review, 4). Online verfügbar unter http://www.sulzer.com/de/-/media/Documents/Cross_Division/STR/2001/2001_04_10_dorfman_e.pdf?et_cid=&et_lid=&et_sub=POS0311_2001_04_10_dorfman_e, zuletzt geprüft am 03.01.2013.
- Drasch, G.; Muss, C.; Roeder, G. (2000): Gold and palladium burden from dental restoration materials. In: *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 14 (2), S. 71-75.
- Du, Xiaoyue; Graedel, Thomas E. (2011a): Global In-Use Stocks of the Rare Earth Elements: A First Estimate. Supplementary Information. In: *Environ. Sci. Technol.*
- Du, Xiaoyue; Graedel, Thomas E. (2011b): Global In-Use Stocks of the Rare Earth Elements: A First Estimate. In: *Environ. Sci. Technol.*, S. 4096-4101.
- Du, Xiaoyue; Graedel, Thomas E. (2011c): Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. In: *Journal of Industrial Ecology*, S. no.
- Duclos, S. J.; Otto, J. P.; Konitzer, G. K. (2010): Design in an era of constrained resources. *Mech. Eng.* 132 (9), 36-40.
- Duesmann & Hensel (o.A.): Firmenpräsentation, Online verfügbar unter <http://www.duerec.com/home.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- E4tech, 2014: The Fuel Cell Industry Review 2014, Strategic thinking in sustainable energy, online verfügbar unter: <http://www.fuelcells.org/pdfs/TheFuelCellIndustryReview2014.pdf>, zuletzt aufgerufen am 06.08.2015
- EC 2015: Review of the European List of Waste, <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/list.htm>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Ecoinvent (2010): Ecoinvent data v2.2
- Edison Investment Research (2011): Indium and Gallium Overview. Edison Investment Research (Hrsg.): London.
- eds-r 2016: pers.com. eds-r 02.2016
- EEM (2011): Erneuerbare Energien - Das Magazin 2011: Materialien vollständig zurückgewinnen; Online verfügbar unter <http://www.erneuerbareenergien.de/materialien-vollstaendig-zurueckgewinnen/150/406/31886/>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- EICTA (2005): EICTA, CECED, AeA Europe and EERA Joint Position Guidance on implementing article 11 of Directive 2002/96 (EC) concerning information for treatment facilities, Brüssel, 2005
- EID (2012): EID Daten und Fakten | Energiepreise und Statistiken zum Download | Energie Informationsdienst. Hg. v. Energie Informationsdienst - EID. Energie Informationsdienst - EID.

Online verfügbar unter <http://www.eid-aktuell.de/inhalt/statistiken/raffineriedurchsatz/>, zuletzt aktualisiert am 03.12.2012, zuletzt geprüft am 18.12.2012.

- Ekvall, Tomas; Finnveden, Göran (2000): Allocation in ISO 14041 - a critical review. *Journal of Cleaner Production*, Nr. 9 (2001), 197-208
- El Chaar, L.; Lamont, L.A.; El Zein, N. (2011): Review of photovoltaic technologies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (5), S. 2165-2175.
- Elbaz 2008: Elbaz, M.: Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor Amplifiers Replace Gallium Arsenide for Wireless and Broadband Applications. Global Semiconductor Alliance (GSA), April 2008.
- Elektrofahrrad24 (o.J.): Batterieverordnung - Rücknahme Akkus Elektrofahrräder & Zubehör. Online verfügbar unter <https://www.elektrofahrrad24.de/batterieverordnung>, zuletzt geprüft am 26.09.2013.
- Ellis, T. W.; Schmidt, F. A.; Jones, L. L. (1994): Methods and Opportunities in the Recycling of Rare Earth Based Materials. Metallurgy and Ceramics Division Ames Laboratory. Ames (USA). Online verfügbar unter <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/10190438-P7QwV3/webviewable/10190438.pdf>, zuletzt geprüft am 29.05.2013.
- Elsner, H. (2009): Goldgewinnung in Deutschland - Historie und Potenzial. *Commodity Top News* Nr. 30, BGR, Hannover 2009.
- Elsner, Harald (2011): Kritische Versorgungslage mit schweren seltenen Erden - Entwicklung grüner Technologien gefährdet? In: *Commodity Top News*, Nr. 36. Deutsche Rohstoffagentur: Hannover.
- Elsner, Harald; Melcher, Frank; Schwarz-Schampera, Ulrich; Buchholz, Peter (2010): Elektronikmetalle - zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage? In: *Commodity Top News*, Nr. 33, Erscheinungsdatum: 22.04.2010. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Hannover. Online verfügbar unter http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/33_elektronikmetalle.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- Emsley, John (2011): *Nature's building blocks. An A-Z guide to the elements.* New ed., completely rev. and updated. Oxford ;, New York: Oxford University Press.
- EnBW (2006): Kernkraftwerk Philippsburg. Philippsburg. Online verfügbar unter http://www.enbw.com/media/konzern/docs/energieerzeugung/kernkraftwerk_philippsburg_broschuere.pdf, zuletzt aktualisiert am 31.08.2006, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- Entsorgungszentrum Salzgitter GmbH (2016). Zwischenlagerung, <http://entsorgungszentrum.de/>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- EON (2008a): Grafenrheinfeld - Informationen zum Kernkraftwerk. Hannover. Online verfügbar unter http://www.eon.com/content/dam/eon-content-pool/eon/company-asset-finder/asset-profiles/grafenrheinfeld-power-plant/Info_Standort_KKG.pdf, zuletzt aktualisiert am 16.09.2008, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- EON (2008b): Unterweser - Informationen zum Kernkraftwerk. Hannover. Online verfügbar unter http://www.eon.com/content/dam/eon-content-pool/eon/company-asset-finder/asset-profiles/unterweser-power-plant/Info_Standort_KKU.pdf, zuletzt aktualisiert am 14.11.2008, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- EON (2010a): Isar - Informationen zum Kernkraftwerk. Hannover. Online verfügbar unter http://www.eon.com/content/dam/eon-content-pool/eon/company-asset-finder/asset-profiles/isar-power-plant/Info_Standort_KKI.pdf, zuletzt aktualisiert am 21.06.2010, zuletzt geprüft am 28.10.2013.

- EON (2010b): Brokdorf - Informationen zum Kernkraftwerk. Hannover. Online verfügbar unter http://www.eon.com/content/dam/eon-content-pool/eon/company-asset-finder/asset-profiles/brokdorf-power-plant/Info_Standort_KBR.pdf, zuletzt aktualisiert am 09.06.2010, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- EON (2013): E.ON SE - Kernkraftwerk Grohnde. Online verfügbar unter <http://www.eon.com/content/eon-com/de/about-us/structure/asset-finder/grohnde.html>, zuletzt aktualisiert am 27.10.2013, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- EPA (2012): Rare Earth Elements: A review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. Hg. v. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Cincinnati, OH, USA. Online verfügbar unter nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100EUBC.pdf.
- EPIA (2011): Solar Generation 6. Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World. European Photovoltaic Industry Association; Greenpeace International. Brussels, zuletzt geprüft am 16.10.2012.
- EPIC. (2010). LED Manufacturing Technologies 2010. European Photonics Industry Consortium (EPIC). European Photonics Industry Association.
- Erdmann, L.; Graedel, T. E. (2011): Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. *Environ. Sci. Technol.* 45 (18), pp. 7620-7630.
- ERP (2012): Erfolgskontrolle 2012 gemäß § 15 (1) BattG. Hg. v. European Recycling Platform Deutschland GmbH. Aachen.
- ERP (2013): ERP Deutschland. European Recycling Platform. Online verfügbar unter <http://www.erp-recycling.de/>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- ERP Deutschland (o.J.): Sammelkartons. Verfügbar unter http://www.erp-recycling.de/Batterie_Sammelkartons. Zuletzt geprüft am 14.01.2014
- Erren, M., & Wittmer, D. (2011). Palladium. In *Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Meilensteinbericht des Arbeitsschritts 2.1 des Projekts MaRes* (pp. VI.1-VI.30). Wuppertal: Wuppertalinstitut für Klima, Umwelt und Energie.
- ESTATO (2013): mündliche Mitteilung, ESTATO Umweltservice GmbH, Herr Prokei, 2013.
- EU (2010), Catinat et al.: Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Online unter: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf, zuletzt 31.5.2012.
- EU-Kom 2014: MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Überprüfung der Liste kritischer Rohstoffe für die EU und die Umsetzung der Rohstoffinitiative, COM(2014) 297 final, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0297&from=EN>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- EU-Kom 2015: Europäische Kommission Generaldirektion Wachstum: European Innovation Partnership on Raw Materials opens a new Call for Commitments, http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item_id=8586&lang=de&tpa_id=1040&title=European-Innovation-Partnership-on-Raw-Materials-opens-a-new-Call-for-Commitments, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- EuP 2009: Van Tichelen, P. (2009). Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs - Lot 19 : Domestic lighting.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

- EU-Recycling (2013): WEEE geht es weiter?, Ausgabe 02/2013, Seite 11, Erscheinungsdatum: 09.02.2013, Online verfügbar unter <http://www.eu-recycling.com/service.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2014
- European Commission (2001): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries.
- European Commission (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.Hg. v. Europäische Kommission. Europäische Kommission. Brüssel. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf, zuletzt geprüft am 02.03.2011.
- European Commission (2012): Recast of the WEEE Directive. Verfügbar über: http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm. Aufgerufen am: 01.08.2013.
- Eurostat (2013): Data Explorer. Eurostat. Online verfügbar unter <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>, zuletzt aktualisiert am 26.02.2013, zuletzt geprüft am 16.10.2013.
- Euwid (2010): BGR-Studie: Recycling von Germanium ausbaufähig, Ausgabe RE18/2010, S. 10, Text-Nr.: 024, Erscheinungsdatum: 04.05.2010
- Euwid (2011a): Duesmann & Hensel: Gute Erträge erzielt, Ausgabe: RE34/2011, S. 12, Text-Nr.: 025, Erscheinungsdatum: 23.08.2011
- Euwid (2011b): Rhodia plant drittes Projekt zur Rückgewinnung Seltener Erden, Ausgabe: RE41/2011, S. 31, Text-Nr.: 061, Erscheinungsdatum: 11.10.2011
- Euwid (2011c): Recyc investiert weiter in Katalysator-Recycling, Ausgabe RE44/2011, S. 18, Text-Nr.: 033, Erscheinungsdatum: 02.11.2011
- Euwid (2011d): „Biomining“ auch für Recycling industrieller Abfälle eine Option, Ausgabe RE51/52.2011, S. 4, Text-Nr.: 006, Erscheinungsdatum: 20.12.2011
- Euwid (2012a): Elektrochemische Auflösung erleichtert Recycling von Platin, Ausgabe RE04/2012, S. 31, Text-Nr.: 068, Erscheinungsdatum: 24.01.2012
- Euwid (2012b): Solvay nimmt Recyclinganlagen für seltene Erden aus Energiesparlampen in Betrieb, Ausgabe: RE40/2012, S. 28, Text-Nr.: 058, Erscheinungsdatum: 02.10.2012
- Euwid (2012c): Forschungsprojekt zum Recycling von Seltenen Erden, Ausgabe RE43/2012, S. 15, Text-Nr.: 027, Erscheinungsdatum: 23.10.2012
- Euwid (2012d): Umicore mit höheren Umsätzen in Recyclingsparte, Ausgabe RE45/2012, S. 29, Text-Nr.: 062, Erscheinungsdatum: 06.11.2012
- Euwid (2013a): Forschung zum biologischen Recycling von Edelmetallen, Ausgabe: RE05/2013, S. 36, Text-Nr.: 072, Erscheinungsdatum: 29.01.2013
- Euwid (2013b): Neuer Heraeus-Ofen steigert Aufbereitungskapazität, Ausgabe RE/07.2013, S. 21, Text-Nr.: 037, Erscheinungsdatum: 12.02.2013.
- Euwid (2013c): Honda gewinnt Seltenerdmetalle aus alten Batterien zurück, Ausgabe RE/11.2013, S. 34, Text-Nr.: 067, Erscheinungsdatum: 12.03.2013.
- Falk, Fritz (2006): Physik und Technologie der Solarzellen. Institut für Photonische Technologien; Institut für Physikalische Hochtechnologie Bereich Lasertechnik; IPHT Jena. Jena. Online verfügbar unter http://www.ipht-jena.de/fileadmin/user_upload/redaktion/pdf/PVtot-Teil1.pdf, zuletzt geprüft am 21.08.2012.
- Fan, Jiajie; Yung, K.C; Pecht, Michael (2012): Comparison of statistical models for the lumen lifetime distribution of high power white LEDs. In: Michael Pecht, Rui Kang und Suzanne

Zhang (Hg.): PHM-2012 Beijing. Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference : 23-25 May 2012, Grand Skylight CATIC Hotel, Beijing, China. Piscataway, N.J: IEEE, S. 1-7.

FEE: Forschungsinstitut für mineralische und metallische Werkstoffe - Edelsteine/Edelmetalle-GmbH (2013): Laser Crystals. <http://www.fee-io.de/index.php/laser-crystals>. Aufgerufen am 06.02.2013.

FEM 2015: pers.com. Dr. Völker FEM, 11.5.2015

Fiedler, Frank (2013): "Wanted" - PV Module dringend gesucht. Der Photovoltaikzweitmarkt in Europa. Urban Mining Kongress 2013. SecondSol GmbH. Urban Mining e.V. Iserlohn, 2013.

Fischer, Wolfgang (2008): Glasfaser-basierte-Zugangsnetze. Technologie und Wettbewerb. Cisco Systems Inc. Online verfügbar unter http://www.vatm.de/fileadmin/pdf/vortraege/glasfaserworkshop_08/cisco.pdf, zuletzt aktualisiert am 16.12.2008, zuletzt geprüft am 05.03.2013.

flugzeugforum.de (o.J.a): durchschnittliche Flugleistung? Online verfügbar unter <http://www.flugzeugforum.de/durchschnittliche-flugleistung-47174.html>, zuletzt geprüft am 07.02.2013.

flugzeugforum.de (o.J.b): Lebensdauer von Flugzeugen. Online verfügbar unter <http://www.flugzeugforum.de/lebensdauer-flugzeugen-37810.html>, zuletzt geprüft am 07.02.2013.

FOCUS Online (2013): Airlines von A bis Z. Airline-Sicherheit - Fliegen - Reisen - FOCUS Online. Online verfügbar unter <http://www.focus.de/reisen/flug/airline-sicherheit/airline-datenbank/>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2013, zuletzt geprüft am 20.02.2013.

Freerks, Jan (2012): Fa. Recyclex, Riecken. Persönliche Auskunft per Email am 10.12.2012

Frey, O. (2013): Geschäftsführer Fachverband Batterien vom ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. Pers. Kommunikation per Email mit Jessica Meins am 29.07.2013.

Frondel, M., Grösche, D.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Petersand, J.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M. (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Fraunhofer ISI, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Essen.

Frontier Rare Earths (Hrsg.) (2013): Zandkopsdrift - The next major western RE producer. Präsentation zur TMS Conference. April 2013, Toronto.

Frühwirth, Werner; Hutterer, Heribert; Pilz, Harald; Stoiber, Helga; Blaas, Wolfgang; Prinz, Christoph; Wernhart, Helmut (2000): Volkswirtschaftlicher Vergleich von Einweg- und Mehrwegsystemen für ausgewählte Getränke- und Gebindearten einschließlich der Beurteilung der Erfassungs- und Recyclingraten. Analyse von Veränderungen des Getränkemarktes und Schlußfolgerungen für die Getränkequoten der Zielverordnung. Endbericht. Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH; Institut für Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik, TU Wien. Wien. Online verfügbar unter <http://www.mehrweg.at/file/000190.pdf>, zuletzt geprüft am 07.01.2013.

Fthenakis, V.M; Kim, H.C (2011): Photovoltaics: Life-cycle analyses. In: *Solar Energy* 85 (8), S. 1609-1628.

Fthenakis, Vasilis (2009a): Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9), S. 2746-2750.

- Fthenakis, Vasilis; Wang, Wenming; Kim, Hyung Chul (2009): Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (3), S. 493-517.
- FTTH Council (2013): FTTH Business Guide. Edition 4. Hg. v. Fibre to the Home Council Europe. Online verfügbar unter http://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/FTTH_Business_Guide_2013_V4.0.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2013.
- Führ, Martin (2008): Herstellerverantwortung nach WEEE-Richtlinie und Produktinnovationen in Müll und Abfall, Vol.1/08, S. 11. online verfügbar unter http://www.suk.h-da.de/fileadmin/dokumente/berichte-forschung/2008/Sofia_MA_WEEE_2008_01.pdf, zuletzt geprüft am 30.09.2013 .
- Futuresource 2013: Persönliche Auskunft per Email am 14.01.2013
- FZ Jülich (2012): http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2012/12-03-19Rekord_SOFC.html; jsessionid=2930BC41D3064CA44F32D176E3AB7662 , zuletzt geprüft am 14.03.13
- FZ Jülich SOFC (2011): Life http://www.fz-juelich.de/iek/iek-9/DE/Projekte/Projektbeschreibung/SOFC-Life_Beschreibung.html , zuletzt geprüft am 14.03.13
- Gallenkemper, B.; Breer, J. (2010): Analyse der Datenerhebung nach ElektroG über die Berichtsjahre 2007 und 2008 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflicht 2010. Umweltbundesamt (Hrsg.). Dessau-Roßlau.
- Gallenkemper, B.; Breer, J. (2013): Analyse der Datenerhebung nach ElektroG über die Berichtsjahre 2009 und 2010 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflicht 2012. Umweltbundesamt (Hrsg.). Dessau-Roßlau.
- Gang Shao Z. et al., 2006: PtRUO2/Ti anodes with a varying Pt:Ru ratio for direct methanol fuel cells, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.037.
- García-Valverde, R.; Miguel, C.; Martínez-Béjar, R.; Urbina, A. (2009): Life cycle assessment study of a 4.2kWp stand-alone photovoltaic system. In: *Solar Energy* 83 (9), S. 1434-1445.
- Gasch, Robert; Twele, Jochen (2010): Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 6. Auflage, Vieweg&TeubnerVerlag, ISBN 978-3-8348-0693-2.
- Geoscience Australia (2008): Gold - Mineral Fact Sheets - Australian Mines Atlas. Hg. v. Australian Government. Online verfügbar unter http://www.australianminesatlas.gov.au/education/fact_sheets/gold.html, zuletzt aktualisiert am 24.01.2008, zuletzt geprüft am 25.07.2012.
- Germanwings (2013): Technik und Flotte von Germanwings - Unternehmen. Germanwings GmbH. Online verfügbar unter <http://www.germanwings.com/de/Unternehmen-Technik-und-Flotte.htm>, zuletzt aktualisiert am 04.02.2013, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- GESA 2015, Gemeinsame Stelle Altfahrzeuge, <http://www.altfahrzeugstelle.de/de/60>, zuletzt geprüft 08.10.2015
- Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten. Zuletzt geändert am 24.02.2012. <http://www.gesetze-im-internet.de/elektrog/> Aufgerufen am 01.08.2013.
- GfK (2013): Persönliche Auskunft per Email am 06.02.2013
- Giegrich et al. (2012): Giegrich J, Liebich A, Lauwigi C, Reinhardt J, Müller F. Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion, Dessau-Roßlau 2012; <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf>, Zugriff 08.02.2016

- Glomeditrans (2013): Grüner Verwertungsprozess medizinischer Altgeräte. Online verfügbar unter <http://www.glomeditrans.com/medigogreen/gruener-verwertungsprozess-medizinischer-altgeraete/>, zuletzt geprüft am 18.06.2013.
- Goldman Sachs (Hrsg.) (2013): GS Mining Commodity Forecasts for 2013, and Beyond. <http://www.fullermoney.com/content/2013-02-18/GSmining2013.pdf> (aufgerufen am 06.06.13).
- Goonan, Thomas G. (2011): Rare Earth Elements - End use and Reyclability. Scientific Investigations Report 2011-5094. Hg. v. USGS - U.S. Geological Survey und U.S. Department of the Interior. Reston, Virginia. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094/pdf/sir2011-5094.pdf>, zuletzt geprüft am 19.07.2012.
- Goonan, Thomas G. (2012): Materials Flow of Indium in the United States in 2008 and 2009. Circular 1377. Hg. v. U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey; U.S. Department of the Interior. Reston, Virginia. Online verfügbar unter http://pubs.usgs.gov/circ/1377/pdf/Circ1377_508.pdf, zuletzt geprüft am 15.08.2012.
- Görke, Oliver (2012): TU Berlin. Persönliche Auskunft per Email am 27.11.2012
- Göbbling-Reisemann, S. (2012): Persönliche Mitteilung vom 7.6.2012.
- Göbbling-Reisemann, Stefan; Knak, Markus; Björn, Schulz (2009): Lifetimes and copper content of selected obsolete electric and electronic products. In: Lorenz Hilty, Xaver Edelman und Arthur Ruf (Hg.): Resource Management and Technology for Material and Energy Efficiency. R09 Twin World Congress. Davos. Dübendorf, Schweiz.
- Graedel, T. E.; Allwood, Julian; Birat, Jean-Pierre; Buchert, Matthias; Hagelüken, Christian; Reck, Barbara K. et al. (2011a): What Do We Know About Metal Recycling Rates? In: Journal of Industrial Ecology, S. no.
- Graedel, Thomas E.; Allwood, Julian; Birat, Jean-Pierre; Buchert, Matthias; Hagelüken, Christian; Reck, Barbara K. et al. (2011b): Recycling Rates of Metals. A Status Report. Hg. v. UNEP. Online verfügbar unter http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf, zuletzt geprüft am 21.11.2011.
- Grafenstein, E. von (2013). Säckeweise Rohstoffe. Altlampen - Lampenhersteller auf der Jagd nach Seltenen Erden. Recycling-Magazin. Ausgabe 01/2013. S. 10-14.
- Grecksch, Gunnar (2012): Persönliche Auskunft per Email am 19.09.2012
- Groß-Bölting (2012): Fachkundige Verwertung von Ölschlamm - Verwertungsanlage Groß-Bölting. Bocholt. Online verfügbar unter <http://www.gross-boelting-bocholt.de/anlagentechnik/>, zuletzt aktualisiert am 18.09.2012, zuletzt geprüft am 15.10.2013.
- GRS (2010): GRS-Batterien - Rücknahmesystem für Akkus aus Elektrofahrrädern entwickelt. Hg. v. Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS). Online verfügbar unter <http://www.grs-batterien.de/nc/grs-batterien/aktuelles/singleansicht/article/ruecknahmesystem-fuer-akkus-aus-elektrofahrraedern-entwickelt.html>, zuletzt geprüft am 26.09.2013.
- GRS (2012): Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien. Erfolgskontrolle 2012 gemäß §15 (1) BattG. Hamburg.
- GRS (2012a): Batteriebrief - Aktuelles, Hintergründe, Positionen, November 2012. Online verfügbar unter http://www.grs-batterien.de/fileadmin/user_upload/Download/Batteriebriefe/GRS-Batteriebrief_DE.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2014.

- GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH) (2011): Online verfügbar unter <http://wiki.grs.de/index.php/Neutronengift>, zuletzt geprüft am 03.01.2013
- GRS 2014: Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien: Bericht zur Erfolgskontrolle gemäß §15 (1) Batteriegesetz, <http://www.grs-batterien.de/grs-batterien/zahlen-und-fakten.html><http://www.grs-batterien.de/>, zuletzt geprüft am 21.11.2011
- Guberman, David E. (2008 - 2011): Germanium. 2007 - 2010 Minerals Yearbook. Hg. v. USGS - U.S. Geological Survey. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/myb1-2010-germa.pdf>, zuletzt geprüft am 19.07.2012.
- Gülzow, Regina (2013): Telefonisches Gespräch mit Till Zimmermann am 10.06.2013. Abfallbeauftragte Lufthansa Technik. Hamburg, Bremen.
- Hacquard A., 2005: Improving and Understanding Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) Performance, Masterthesis, Worcester Polytechnic Institute, online verfügbar unter: <https://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-050505-151501/unrestricted/Hacquard.pdf>, zuletzt aufgerufen am 23.07.2015
- Haferkorn, H. (2003): Optik - Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen. <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1002/9783527625017.fmatter/asset/fmatter.pdf?v=1&t=he8dkevt&s=a9d89b946437bbe374bbeec8b1a2991fec445d46>. Abgerufen am 12.03.2013.
- Hagelüken et.al. (2006): Hagelüken, Christian; Buchert, Matthias; Ryan, Peter: Material flows of Platinum Group Metals in Germany. 13th Cirp International Conference on Life Cycle Engineering, 2006, <http://www.mech.kuleuven.be/lce2006/052.pdf>, zuletzt geprüft am 15.02.2016.
- Hagelüken, Christian (2005): Der Kreislauf der Platinmetalle - Recycling von Katalysatoren. In: Christian Hagelüken (Hg.): Autoabgaskatalysatoren. Grundlagen - Herstellung - Entwicklung - Recycling - Ökologie ; mit 65 Tabellen. 2. Aufl. Renningen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, 612). Online verfügbar unter http://www.preciousmetals.unicore.com/PMR/Media/spentAutocats/show_derKreislaufDerPlatinmetalle.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2013.
- Hagelüken, Christian (2006a): Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 8-11 Mai 2006, San Francisco.
- Hagelüken, Christian (2007): Recycling von Autokatalysatoren - Strukturelle Defizite trotz ausgereifter Technik. Umicore Precious Metals Refining. Hanau.
- Hagelüken, Christian (2008): Der Kreislauf der Platinmetalle - Recycling von Katalysatoren. In: Hagelüken et al. (2005): Autoabgaskatalysatoren. Expert Verlag: Renningen.
- Hagelüken, Christian (2010): Edelmetallrecycling - Status und Entwicklungen. In: Jens Harre (Hg.): Sondermetalle und Edelmetalle. Vorträge beim 44. Metallurgischen Seminar des Fachausschusses für Metallurgische Aus- und Weiterbildung der GDMB vom 03.02. bis 05.02.2010 in Hanau. Clausthal-Zellerfeld: GDMB-Info GmbH (Schriftenreihe der GDMB, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik, 121). Online verfügbar unter http://www.preciousmetals.unicore.com/PMR/Media/sustainability/show_Edelmetallrecycling.pdf.
- Hagelüken, Christian (2010a): Beitrag des Recyclings zur Versorgungssicherheit bei Technologiemetallen. In: Karl Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

- Hagelüken, Christian (2010b): Edelmetallrecycling - Status und Entwicklungen. In: Jens Harre (Hg.): Sondermetalle und Edelmetalle. Vorträge beim 44. Metallurgischen Seminar des Fachausschusses für Metallurgische Aus- und Weiterbildung der GDMB vom 03.02. bis 05.02.2010 in Hanau. Clausthal-Zellerfeld: GDMB-Info GmbH (Schriftenreihe der GDMB, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik, 121). Online verfügbar unter http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability/show_Edelmetallrecycling.pdf.
- Hagelüken, Christian (2012): Recycling the Platinum Group Metals: A European Perspective. In: Platinum Metals Rev. Vol. 56, Nr. 1, pp. 29-35.
- Hagelüken, Christian (2013): Director EU Governmental Affairs, Fa. Umicore. Persönliche Kommunikation mit Stefan Gößling-Reisemann am 04.09.2013 per Email. Hanau/Bremen.
- Hagelüken, Christian (2013a): Telefonisches Gespräch mit dem Director EU Government Affairs Umicore am 25.07.2013.
- Hagelüken, Christian (2014a): Recycling of (critical) metals. In: Critical Metals Handbook. Herausgegeben von Gus Gunn, 41-69. Oxford: John Wiley & Sons.
- Hagelüken, Christian (2014b). Technologiemetalle - Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette. In P. Kausch, M. Bertau, J. Gutzmer, & J. Matschullat (Eds.), Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge (pp. 161-172). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hagelüken, Christian (Hg.) (2001): Autoabgaskatalysatoren. Grundlagen, Herstellung, Entwicklung, Recycling, Ökologie. Renningen-Malmsheim: expert-Verl.
- Hagelüken, Christian; Buchert, Matthias; Stahl, Hartmut (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle. Systemanalyse und Massnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle ; Endbericht. Clausthal-Zellerfeld: GDMB-Medienverl.
- Hagelüken, Christian; Buchert, Matthias; Stahl, Hartmut (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle. Systemanalyse und Massnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle ; Endbericht. Clausthal-Zellerfeld: GDMB-Medienverl.
- Hagelüken, Christian; Meskers, Christina (2009): Technology challenges to recover precious and special metals from complex products. Umicore Precious Metals Refining. Online verfügbar unter http://ewasteguide.info/files/Hageluecken_2009_R09.pdf, zuletzt geprüft am 19.04.2011.
- Hagelüken, Christian; Meskers, Christina (2009): Technology challenges to recover precious and special metals from complex products. Umicore Precious Metals Refining. Online verfügbar unter http://ewasteguide.info/files/Hageluecken_2009_R09.pdf, zuletzt geprüft am 19.04.2011.
- Hagelüken, Christian; Meskers, Christina (2010): Complex Life Cycles of precious and special metals. In: Graedel, Thomas; van der Voet, Ester (Hrsg.) (2010): Linkages of Sustainability. Strüngmann Forum Reports. MIT Press: Cambridge.
- Hagelüken, Christian; Zuber, Ralf (2004): Emissionsfreies Verfahren zum Edelmetallrecycling aus Brennstoffzellen. Präsentation zum f-cell award 2004 am 27.9.04 in Stuttgart.
- Hamm, Uwe (2013): Leiter Chemie/Werkstoffe und Umweltbeauftragter, Carl Zeiss Gruppe: Schriftliche Korrespondenz (email), 12.02.2013.
- Hamm, Uwe (2013a). Carl Zeiss Gruppe, pers. kom. 02.2013
- Hamm, Uwe (2013b): Fa. Zeiss. Schriftliche Korrespondenz, 02.2013.

- Handke, Volker (2008): Materialeffizienz und Ressourcenschonung am Beispiel von strategischen Metallen. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Initiative für Nachhaltige Entwicklung e.V. Berlin, 11.11.2008.
- Hao, Li; Rein, H.-M.; Suttorp, T.; Bock, J. (2004): Fully integrated SiGe VCOs with powerful output buffer for 77-GHz automotive Radar systems and applications around 100 GHz. In: IEEE Journal of Solid-State Circuits. 39, Nr. 10, 2004, S. 1650-1658, doi:10.1109/JSSC.2004.833552
- Hartmann, Peter (2013): Geschäftsführer SCHOTT AG: Schriftliche Korrespondenz, 02.2013.
- Hartmann, Peter (2013a): Schott AG , pers.kom. 02.2013
- Hartmann, Peter (2013b): Geschäftsführer SCHOTT AG: Schriftliche Korrespondenz (email), 12.02.2013.
- Hassan, Ali (2001): Rohstoffeinsparung durch Kreislaufführung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie. Forschungsbericht 299 93 301, UBA-FB 000139. Hg. v. Umweltbundesamt. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/k1960.pdf>, zuletzt geprüft am 23.07.2012.
- Hassan, Ali (2003): Stand der Verwertung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie sowie Einflussfaktoren zur Verbesserung der Kreislaufführung. Forschungsbericht 363 01 046, UBA-FB 000443. Hg. v. Umweltbundesamt. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2284.pdf>, zuletzt geprüft am 23.07.2012.
- Hatch, G. P. (2011): Critical Rare Earths. TMR technology metals research, August 2011.
- Hau, Erich (2008): Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 4. Auflage. Berlin : Springer Verlag, ISBN 978-3540721505
- He, Yirong; Lee, Kang; Tewari, Surendra; Miller, Robert A. (1999): Development of Refractory Silicate-YSZ Dual Layer TBCs. National Aeronautics and Space Administration (NASA); Glenn Research Center. Cleveland. Online verfügbar unter http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990062668_1999094044.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2012.
- Hecker, Arne (2013): Technischer Spezialist unabhängige Sicherheitsüberprüfung bei Kernkraftwerk Leibstadt AG, Persönliche Korrespondenz mit C. Wiesenmaier via mail am 17.03, 02.04, 12.04, 13.04.2013.
- Hedrick, J. B. (2004): Rare Earths in Selected U.S. Defense Applications: 40th Forum on the Geology of Industrial Minerals. Bloomington, Indiana. Online verfügbar unter <http://www.usmagneticmaterials.com/documents/RARE-EARTHS-IN-US-DEFENSE-APPS-Hendrick.pdf>
- Heegn, H.; Weyhe, R. (2003): Closed-Loop Recycling Of Nickel, Cobalt And Rare Earth Metals From Spent Nickel-Metal Hydride-Batteries. In: XXII International Mineral Processing Congress, Bd. 28. Online verfügbar unter http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/data/publications/uvr_heegn_paepe_id_4020.pdf.
- Heegn, Hanspeter (2004): Rückgewinnung der Wertmetalle Nickel, Kobalt, und Seltene Erden aus Nickel-Metallhydrid-Batterieschrott für den erneuten Einsatz in Batterielegierungen. Schlussbericht, UVR-FIA GmbH. Freiberg.
- Heermann, Jürgen (2011): Warum sie oben bleiben - FAQ vom Autor. Online verfügbar unter http://www.flugingenieur.de/faq/faq_vom_autor.htm, zuletzt aktualisiert am 16.12.2011, zuletzt geprüft am 15.01.2013.

- Heinisch, Jürgen (2011): Verbrauch von Getränken in Einweg- und Mehrweg-Verpackungen. Berichtsjahr 2009. UBA-Texte 37/2011. Hg. v. Umweltbundesamt. Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umwelt-daten.de/publikationen/fpdf-l/3980.pdf>, zuletzt geprüft am 04.01.2013.
- Heinloth, Klaus (2003): Die Energiefrage. Bedarf und Potentiale, Nutzen, Risiken und Kosten. 2. Aufl. Braunschweig ;, Wiesbaden: Vieweg.
- Heinzel et al., 2006: Heinzel/Mahlendorf/Roes: Brennstoffzellen; Entwicklung, Technologie, Anwendung, C.F. Müller, ISBN: 3-7880-7741-7
- Held, Michael; Ilg, Robert (2011): Update of environmental indicators and energy payback time of CdTe PV systems in Europe. In: *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 19 (5), S. 614-626.
- Heraeus Precious Metals (Hrsg.) (2013A): Edelmetallverbindungen für die Katalyse in der chemischen Industrie. http://heraeus-chemicalproducts.de/de/preciousmetalchemicals/chemistry/chemistry_1.aspx. Aufgerufen am 29.10.2013.
- Heraeus Precious Metals (Hrsg.) (2013B): Edelmetallverbindungen von Heraeus für die Homogenkatalyse. http://heraeus-catalysts.com/de/homogeneouscatalysts_1/homogeneous_catalysts_1.aspx#__utma=12736558.752795276.1376476754. Aufgerufen am 29.10.2013.
- Heraeus Precious Metals GmbH (2013): Salpetersäure. Online verfügbar unter http://heraeus-katalysatoren.de/de/catalyticsystems/salpetersure/salpeters_ure.aspx, zuletzt geprüft am 11.04.2013.
- Hering, Ekbert; Martin, Rolf (Hg.) (2006): Photonik. Grundlagen, Technologie und Anwendung : mit 50 Tabellen. Berlin [u.a.]: Springer.
- Hertz, Joshua L.; Rothschild, Avner; Tuller, Harry L. (2009): Highly enhanced electrochemical performance of silicon-free platinum-yttria stabilized zirconia interfaces. In: *J Electroceram* 22 (4), S. 428-435. Online verfügbar unter <http://www.springer-link.com/content/P5366X6883436224/fulltext.pdf>.
- Heuwieser, Julia (2016): Geschäftsführerin bei H.U.T. Heuwieser Umwelttechnik GmbH. Persönliche Kommunikation mit Stefan Gößling-Reisemann am 09.03.2016 per Email. Gelnhausen/Bremen.
- Hexis (2013): Herstellerseite online verfügbar unter <http://www.hexis.com/de/elektrochemischer-prozess>, zuletzt geprüft am 13.03.13
- Hill, Liezel (2008): SRA to build pilot germanium, gallium recovery plant. In: *Mining Weekly*, 23. Juli 2008. <http://www.miningweekly.com/article/sra-to-build-pilot-germanium-gallium-recovery-plant-2008-07-23>. Aufgerufen am 19.07.13.
- Hintemann, Ralph; Fichter, Klaus (2010): Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland. Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz. UBA-Texte 55/2010. Unter Mitarbeit von Lutz Stobbe. Hg. v. Umweltbundesamt. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH; Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umwelt-daten.de/publikationen/fpdf-l/4037.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2012.
- Hirschberg (1999): Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau - Chemie, Technik, Wirtschaftlichkeit; Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1999
- Hitachi (2010): Hitachi Develops Recycling Technologies for Rare Earth Metals. Developing machinery to separate and collect rare earth magnets from end-of-life products, extracting rare earths from rare earth magnet using a dry process. Tokyo. Online verfügbar unter <http://www.hitachi.com/New/cnews/101206.pdf>, zuletzt geprüft am 21.08.2013.

- Hitachi (2013): Rare-earth Magnet Recycling. Hitachi Review Vol. 62, No. 8, Online verfügbar unter http://www.hitachi.com/rev/pdf/2013/r2013_08_105.pdf, zuletzt geprüft am 9.3.2016
- Höfling, Oskar (1986): Physik. 13. Aufl. Bonn: Duemmler (Dümmlerbuch, 4116).
- Höll, R.; Kling, M.; Schroll, E. (2007): Metallogenesis of germanium—A review. In: Ore Geology Reviews 30, S. 145-180.
- Honda (19.04.2012): Weltpremiere: Honda startet Serienverfahren zur Extraktion Seltener Erden aus Batterien von Hybridautos. Online verfügbar unter <http://www.grueneautos.com/2012/04/weltpremiere-honda-startet-serienverfahren-zur-extraktion-seltener-erden-aus-batterien-von-hybridautos/>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Hoormann, Holger (2013): Umweltmanagement, Enercon GmbH. Persönliche Kommunikation via Email mit Till Zimmermann am 28.05.2013.
- Hübner, Tammo (2013a): Firma saperatec. pers. kom. 23.07.2013
- Hübner, Tammo (2013b): Firma saperatec, pers. kom. 23.08.2013
- Huisman, Jaco; Magalini, Federico; Kuehr, Ruediger; Maurer, Claudia; Delgado, Clara; Ogilvie, Steve et al. (2008): 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Final report. United Nations University; AEA Technology; GAIKER; TU Delft. Bonn. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final_rep_unu.pdf, zuletzt aktualisiert am 01.08.2007, zuletzt geprüft am 03.05.2013.
- Hurst, Cindy (2010): China's Ace in the Hole. Rare Earth Elements.Hg. v. ndupress. Online verfügbar unter http://www.ndu.edu/press/lib/images/jfq-59/JFQ59_121-126_Hurst.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2012.
- Hyperphysics (2013): Georgia State University, Department of Physics and Astronomy. Online verfügbar unter <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/%E2%80%8Chbase/solids/hitc.html#c3> , zuletzt geprüft am 27.02.2013.
- IDIS (2013): IDIS unter http://order.idis2.com/index.php?action=order_idis&language=german
- ieee (2013): Online verfügbar unter <http://spectrum.ieee.org/image/1928415>, zuletzt geprüft am 27.10.2013.
- IFA (2012): IFA Ingenieurgesellschaft für Abfallwirtschaft und Umweltlogistik mbH. Erfolgsbericht 2012 gemäß §15 (1) BattG. Bonn.
- IFA (2013): Info, Dokumenten- und Pressecenter. IFA - Ingenieurgesellschaft. Online verfügbar unter <http://www.ifa-gmbh.com/infocenterallgemein>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- IHK UMFIS (2013): UMFIS-Online Das Umweltfirmen-Informationssystem der IHKs in Deutschland. Online verfügbar unter http://www.umfis.de/index.html?show_profile.php?langid=de%26tbereich%3Dno%26fbereich%3Dno%26keyword%3D3436%26action%3Dquery&sort=plzdesc&si=159&mi=245&ts=1366020354&SID=11111015, zuletzt aktualisiert am 25.06.2013, zuletzt geprüft am 15.10.2013.
- Infineon 2008: Bosch setzt auf Radarchip von Infineon - Wirtschaftspresse - 1. Dezember 2008; Online verfügbar unter <http://www.infineon.com/cms/de/corporate/press/news/releases/2008/INFATV200812-015.html>, zuletzt geprüft am 27.10.2013.
- Innocenzi, V., Ferella, F., Michelis, I. de, & Vegliò, F. (2014). Treatment of fluid catalytic cracking spent catalysts to recover lanthanum and cerium: Comparison between selective precipitation and solvent extraction. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. doi:10.1016/j.jiec.2014.09.014

- Institut für Seltene Erden und Metalle (Hrsg.) (2013): Current and historical market prices of the most common rare earths. <http://institut-seltene-erden.org/en/current-and-historical-market-prices-of-rare-earth-gangigsten/> (aufgerufen am: 16.06.13).
- Institute for Energy and Transport of the Joint Research Centre (JRC) (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Online unter: http://setis.ec.europa.eu/newsroom-items-folder/copy_of_jrc-report-on-critical-metals-in-strategic-energy-technologies/at_download/Document, zuletzt 8.2.2012.
- INTECUS (o.J.): Best Practice Municipal Waste Management - Altbatterien und Akkumulatoren. Datenblatt SWSM-05_ACU. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft-e/best-practice-mwm/data_de/ACU.pdf, zuletzt aktualisiert am 11.03.2008, zuletzt geprüft am 29.08.2013.
- IPA 2013: International Platinum Group Association <http://www.ipa-news.com/en/55-0-Others.htm> zuletzt geprüft am 27.10.2013
- ISE (2013a): Firma aus Fährbrücke holt aus Abfall wertvolle Rohstoffe, Online verfügbar unter <http://institut-seltene-erden.org/firma-aus-fahrbruecke-holt-aus-abfall-wertvolle-rohstoffe/>, zuletzt geprüft am 13.01.2014.
- ISE (2013b): pers.kom. 4.2.2013.
- ISE (2013c): Firmenpräsentation, Online verfügbar unter <http://institut-seltene-erden.org/recycling-von-seltenen-erden-gestartet-2/>, zuletzt geprüft am 13.01.2014.
- Ismail, Solly (2011): Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalyst Optimization to Cope with High Rare Earth Oxide Price Environment. Technical Note. Hg. v. BASF. Middlesex/Essex. Online verfügbar unter http://www.refinery-catalysts.pro/pdfs/BASF_Rare_Earth_Tech_Note_USL_sfs.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2012.
- IZT, adelphi (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Studie im Auftrag der KfW. Berlin.
- Jacobs, Gary; Ricote, Sandrine; Patterson, Patricia M.; Graham, Uschi M.; Dozier, Alan; Khalid, Syed et al. (2005): Low temperature water-gas shift: Examining the efficiency of Au as a promoter for ceria-based catalysts prepared by CVD of a Au precursor. In: *Applied Catalysis A: General* 292, S. 229-243.
- Jacobson, M.Z; Delucchi, M.A (2011): Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. In: *EnergyPolicy* 39 (3), S. 1154-1169. online verfügbar unter <http://www.sjsu.edu/people/dustin.mulvaney/courses/envs133/s2/JDEnPolicyPt1.pdf>.
- Janssen, L.G.J.; Lacal Arantegui, R., Bröndsted, P.; Gimondo, P.(2012): Strategic Energy Technology Plan - Scientific Assessment in support of the Materials Roadmap enabling Low Carbon Technologies. EUR 25197 EN - 2012.
- Johannesson, Sven-Birger; Johansson, Lars-Erik, Västerås, SE (1994): Reaktorkern für einen Siedwasserkernreaktor. Patent DE4423128A1, online verfügbar unter <http://www.patent-de.com/19950126/DE4423128A1.html>, zuletzt geprüft am 03.01.2013
- Johnson Matthey: Thrifting of precious metals in autocatalysts. Online verfügbar unter <http://staging.platinum3.precedenthost.co.uk/news-and-events/our-view-on/2009/thrifting-of-precious-metals-in-autocatalysts>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Johnson Mattheys (o.J.a). „Palladium Supply and Demand.“ Palladium Demand by Application: Regions. 2011a. http://www.platinum.matthey.com/uploaded_files/Int_2012/pd_03_to_12.pdf (Zugriff am 16. Dezember 2012).

- Jorgenson, John D.; George, Michael W. (2004): Indium. Mineral Commodity Profile. Open-File Report 2004-1300. Hg. v. U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey; U.S. Department of the Interior. Reston, Virginia. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1300/2004-1300.pdf>, zuletzt geprüft am 15.08.2012.
- 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
- JRC 2016: European Commission's Joint Research Centre (JRC): The reference document for the Car Manufacturing sector, <http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/emas/car.html>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Jungbluth, Niels; Stucki, Matthias; Frischknecht, Rolf (2009): Photovoltaics. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.ecoinvent report No. 6-XII. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Switzerland.
- Jungbluth, Niels; Tuchschnid, M. (2007): Photovoltaics. In: R. Dones (Hg.): Sachbilanzen von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Dübendorf, Schweiz.
- Kabca A., 2015: Funktion und Aufbau einer PEMFC, online abrufbar unter: <http://www.pemfc.de/pemfc.html>, zuletzt aufgerufen am 06.08.2015
- Kagawa, Shigemi; Tasaki, Tomohiro; Moriguchi, Yuichi (2006): The environmental and economic consequences of product lifetime extension: Empirical analysis for automobile use. In: *Ecological Economics* 58 (1), S. 108-118.
- Kamiya, Masahiro; Mori, Yasuki; Kojima, Takashi; Sasai, Ryo; Itoh, Hideaki (2007): Recycling process for yttria-stabilized tetragonal zirconia ceramics using a hydrothermal treatment. In: *J Mater Cycles Waste Manag* 9 (1), S. 27-33. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10163-006-0168-3.pdf>.
- Kammer, Ulrich (2011): Recycling von seltenen Metallen und deren Verbindungen. In: Karl Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 551-558.
- Karamanolis S., 2003: Brennstoffzellen, Würzburg Vogel Buchverlag
- Kato, Kazuhiro; Yoshioka, Toshiaki; Okuwaki, Akitsugu (2000): Study for Recycling of Ceria-Based Glass Polishing Powder. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 39 (4), S. 943-947.
- Kauertz, Benedikt; Döhner, Andrea; Detzel, Andreas (2011): Ökobilanz von Getränkeverpackungen in Österreich Sachstand 2010. ifeu. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.ara.at/uploads/media/Oekobilanz__Getraenkeverpackungen_Oesterreich_2010_Langfassung.pdf, zuletzt geprüft am 04.01.2013.
- Kauertz, Benedikt; Wellenreuther, Frank; Busch, Stefanie; Krüger, Martina; Detzel, Andreas (2008): Ökobilanz der Glas- und PET-Mehrwegflaschen der GDB im Vergleich zu PET-Einwegflaschen. Studie im Auftrag der Genossenschaft Deutscher Brunnen eG. ifeu. Heidelberg, zuletzt geprüft am 28.12.2012.
- Kausch, Peter; Matschullat, Jörg (2005): Rohstoffe der Zukunft - neue Basisstoffe und neue Energien. Eine Universität zeigt Innovationen mit Wirtschaft und Industrie in Freiberg = Resources for the future - new materials and energy sources. Berlin: Frank & Timme.

- Kazmerski, Lawrence L. (2006): Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview. In: *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 150 (2-3), S. 105-135.
- KBA (2011): Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugalter. KBA - Wir punkten mit Verkehrssicherheit - Statistik. Fachartikel. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Online verfügbar unter http://www.kba.de/nn_1169728/DE/Statistik/Fahrzeuge/Publikationen/Fachartikel/alter__20110415,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/alter_20110415.pdf, zuletzt aktualisiert am 24.07.2012, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- KBA (2012): Kraftfahrt-Bundesamt: Besitzumschreibungen und Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter Jahr 2011. Flensburg.
- KBA (2012a): Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Personenkraftwagen und Krafträdern nach Motorisierung Jahr 2011, Flensburg, 2012
- KBA (2013): Kraftfahrt-Bundesamt: Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2005 bis 2012 nach ausgewählten Kraftstoffarten (Teil 2) , online verfügbar unter http://www.kba.de/cln_031/nn_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/n__umwelt__z__teil__2.html , zuletzt geprüft am 27.10.2013.
- KBA (2013a): Kraftfahrt-Bundesamt: Bestand an Personenkraftwagen in den Jahren 2006 bis 2013 nach ausgewählten Kraftstoffarten (Teil 2)“ , online verfügbar unter www.kba.de/cln_031/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b__umwelt__z__teil__2.html, zuletzt geprüft am 27.10.2013.
- KBA 2015e: Fahrzeugzulassungen (FZ) - Neuzulassungen, Besitzumschreibungen, Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Jahr 2014 FZ 7, http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2014/fz7_2014_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 08.02.2016
- KBA 2015f: Kraftfahrtbundesamt: Bestand in den Jahren 2006 bis 2015 nach ausgewählten Fahrzeugklassen mit dem Durchschnittsalter der Fahrzeuge, http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/b_alter_kfz_z.html;jsessionid=C23B24EC5241474D518BB1B6DD5BA873.live2052?nn=645784, zuletzt geprüft am 08.02.2016
- Kehrbaum, Ralph (1995): Perspektiven eines Recycling von Windkraftanlagen. Perspectives for the Recycling of Wind Turbines.Hg. v. DEWI-Magazin.Forschungszentrum Jülich GmbH (7). online verfügbar unter http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_07/05.pdf , zuletzt aktualisiert am 09.04.2001, zuletzt geprüft am 26.01.2013.
- Kempf 2005: SiGe BICMOS Play a growing role in mobile platform, WD&D, 12, 2005
- 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
- Kernenergie.de (2013): Kernkraftwerke in Deutschland | kernenergie.de | Informationen zu Kernenergie, Atomenergie, Kernkraft, Atomkraft. Online verfügbar unter <http://www.kernenergie.de/kernenergie/themen/kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland.php>, zuletzt aktualisiert am 16.10.2013, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- Keshner, M.S; Arya, R. (2004): Study of Potential Cost Reductions Resulting from Super-Large-Scale Manufacturing of PV Modules. Final Subcontract Report.Hg. v. National Renewable Energy Laboratory. Hewlett Packard. Palo Alto, California, USA. Online verfügbar unter <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36846.pdf>, zuletzt geprüft am 15.10.2012.

- Khan, M. et al (2009): Life Cycle Costing Analysis of Solid Oxide Fuel Cells (Bachelor Thesis) online verfügbar unter <http://www.mie.utoronto.ca/undergrad/thesis-catalog/files/52.pdf>, zuletzt geprüft am 28.03.13
- Kim, Jong-Young; Kim, Ung-Soo; Byeon, Myeong-Seop; Kang, Woo-Kyu; Hwang, Kwang-Teak; Cho, Woo-Seok (2011): Recovery of cerium from glass polishing slurry. In: Journal of Rare Earths 29 (11), S. 1075-1078.
- Kingsnorth DJ (2014) Der globale Markt der Seltenen Erden - Ein Balanceakt. In: Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (eds) Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 97-121
- Kingsnorth, D. J. (2012): "The Global Rare Earths Industry: A Delicate Balancing Act". Vortrag bei der Deutsche Rohstoffagentur am 16. April 2012, Berlin.
- KKG (o.J.): Kernkraftwerk Gundremmingen. Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH. Gundremmingen. Online verfügbar unter http://www.kkw-gundremmingen.de/download/Standortbroschuere_KKW.pdf, zuletzt aktualisiert am 11.07.2008, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- Kleine, Matthias (2012): Bedeutung und Analyse von strategischen Metallen in der Windenergie. Diplomarbeit. Universität, Bremen. Integrierte Produktentwicklung.
- Klocke, Fritz; König, Wilfried (2005): Fertigungsverfahren 2. Schleifen, Honen, Läppen. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Klotzer, Janina (2012): Ermittlung des Recyclingpotentials strategischer Metalle in Deutschland. Diplomarbeit. Universität, Bremen. Integrierte Produktentwicklung, zuletzt geprüft am 20.02.2013.
- Knothe, Wolfgang (2012): Leiter Technologiezentrum Franken Guss Kitzingen GmbH & Co. KG. Telefonisches Gespräch am 20.12.2012
- Knothe, Wolfgang (2013): Leiter Technologiezentrum Franken Guss Kitzingen GmbH & Co. KG., pers.kom. 19.03.2013 und 24.05.2013
- Knudsen, Nicole; Nowak, Klaus (2008): Batterieentsorgung in Deutschland - Automatische Sortierung als Basis der Verwertung. Abfallforschungstage 2008. Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien; Uni-Cyc GmbH. Online verfügbar unter https://cu villier.de/uploads/preview/public_file/3084/9783867275736.pdf, zuletzt geprüft am 30.08.2013.
- Kohlmeyer 2015: Kohlmeyer, R.: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2013 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG, Berlin, 2015, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht_altfahrzeug_2013_bf.pdf, zuletzt geprüft am 08.02.2016
- Kohlmeyer, R. 2016: pers. kom. Arbeitskreis Behandlungsverordnung nach ElektroG, 18.02.2016
- Kohlmeyer, Regina (2012): Umweltbundesamt. Persönliche Korrespondenz, 13.04.2012
- Köntges, Marc (2002): Beleuchtungsabhängiger Ladungstransport durch tiefe kompensierende Störstellen in CdTe- und Cu(In,Ga)Se₂-Solarzellen. Dissertation. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg. Online verfügbar unter <http://oops.uni-oldenburg.de/volltexte/2002/313/pdf/koebel02.pdf>, zuletzt geprüft am 18.10.2012.
- Kordesch K. et al., 1996: Karl Kordesch, Günter Simader, Fuel Cells and their applications, VCH, ISBN: 3-527-28579-2
- Kosowski, Katarzyna (2012): H.C. Stark GmbH. Persönliche Auskunft per Email am 10.12.2012

- KPMG (Hrsg.) (2012): Quarterly Commodity Insights Bulletin - Rare Earth Elements (October 2012). <http://www.kpmg.com/za/en/issuesandinsights/articlespublications/quarterly-commodity-insights/pages/quarterly-commodity-insights-bulletin-rare-earth-elements-q3-q2-2012.aspx> (aufgerufen am: 16.06.13).
- Krewitt, W.; Pehnt, M. (2004): Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung - Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale. Schmidt (Erich)-Verlag Berlin, ISBN-Nr.: 978-3503078707
- Krewitt, Wolfram; Nast, Michael; Nitsch, Joachim (2005): Energiewirtschaftliche Perspektiven der Fotovoltaik. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR). Stuttgart.
- Krummheuer, Eberhard (2008): Verlängertes Leben: Airbus macht Jets fit. In: *Handelsblatt*, 02.01.2008. Online verfügbar unter http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/verlaengertes-leben-airbus-macht-jets-fit/2910418.html;%20https://www.bit-ag.com/downloads/drpeters_vpinfo_08_2008_lebenszyklusa320.pdf, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- KrWG (2012) : Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch § 44 Absatz 4 TiergesundheitsG v. 22.5.2013 (BGBl. I S. 1324)
- Kuchta, Kerstin (2013): E-Schrottreycling - Eine Zukunftsvision, Vortrag aus Hamburg Trend 2013, Online verfügbar unter http://hamburgtrend.info/fileadmin/user_upload/pdf/Vortraege_2013/Kuchta_E_Schrottreycling_Eine_Zukunftsvision_01.pdf, zuletzt geprüft am 13.01.2014.
- Kuitche, Joseph M. (2010): Statistical Lifetime Predictions for PV Modules. TÜV Rheinland; Arizona State University. Online verfügbar unter http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvrw2010_kuitche.pdf, zuletzt aktualisiert am 02.03.2010, zuletzt geprüft am 12.03.2013.
- Kumar, Suresh; Sarkan, Bijan (2013): Design For Reliability With Weibull Analysis For Photovoltaic Modules. In: *International Journal of Current Engineering and Technology* 3 (1), S. 129-134.
- Kunze, Peter (2012): Raw materials - challenges and solutions for the future? US-EU workshop on mineral raw materials data. Brüssel, 12.09.2012. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/eu-us-kunze_en.pdf, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Lachner 2008: Lachner, R.: ICs für Kfz-Radar auf SiGe-Basis GMM Workshop: "Hochfrequenz-Halbleitertechnologien für Automobilanwendungen" München, 23. Juni 2006; Online verfügbar unter <http://www.infineon.com/cms/de/corporate/press/news/releases/2009/INFATV200905-058.html>, zuletzt geprüft am 27.10.2013.
- Ladwig, Birgit (2013a). Leiterin Labortechnik, Spectaris - Verband der Hightech-Industrie: pers. kom., 19.06.2013.
- Ladwig, Birgit (2013b): Deutscher Verband der Hightech Industrie Spectaris. Persönliche Korrespondenz (Email), 12.02.2013.
- Landbell AG (2013): Neues Rücknahmesystem für ausgediente Solarmodule. Landbell AG. Online verfügbar unter <http://www.landbell.de/news/102-neues-ruecknahmesystem-fuer-ausgediente-solarmodule.html>, zuletzt aktualisiert am 03.06.2013, zuletzt geprüft am 17.07.2013.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2012): Abfallsteckbriefe - 1608 Gebrauchte Katalysatoren. Informationsportal zur Abfallbewertung

- IPA. Online verfügbar unter http://www.abfallbewertung.org/reppen.php?report=ipa&char_id=1608_Kat&lang_id=de&avv=&synon=&kapitel=2, zuletzt aktualisiert am 24.10.2012, zuletzt geprüft am 10.04.2013.
- Laser Components GmbH (2012): Hocheffiziente Laserstäbe. http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc/applikationsreport/laserstaebe.pdf&no_cache=1. Abgerufen am 28.12.2012.
- Lassner E.; Schubert, W.-D. (2009): Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Leasingshop (2013), <http://www.leasingshop24.de/computer-leasing/monitore/>, 12.02.2013
- Lechner, Christof; Seume, Jörg (Hg.) (2010): Stationäre Gasturbinen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Leinfelder R., 2004: Robert Leinfelder, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, „Reaktionskinetische Untersuchungen zur Methan-Dampf-Reformierung und Shift-Reaktion an Anoden oxidkeramischer Bernstoffzellen, online abrufbar unter: <http://d-nb.info/97157541x/34>, zuletzt geprüft am 04.08.2015
- Lemke, Jürgen (2013): ALD VT. Persönliche Auskunft per Email am 16.01.2013
- Lennox Transport GmbH (2013): Demontage und Recycling. Online verfügbar unter <http://lennox-transporte.de/14.html>, zuletzt geprüft am 18.06.2013.
- LEONI (2011): Fiber Optics, Licht schalten · Licht transportieren · Licht verteilen. Hg. v. LEONI Fiber Optics GmbH. Neuhaus-Schierschnitz. Online verfügbar unter http://www.leoni-fiber-optics.com/uploads/tx_downloadleoni/de_fiber_optics2.pdf, zuletzt geprüft am 06.03.2013.
- LG (2009), Die größte Multitouch-LED-Wand der Welt, <http://www.lgblog.de/2009/07/29/die-groeste-multitouch-led-wand-der-welt/>, 19.03.2013
- LG (2013): (<http://www.lgblog.de/2009/07/29/die-groeste-multitouch-led-wand-der-welt/>) (Letzter Aufruf 2.6.2013)
- Lide, David R. (Hg.) (op. 2000): CRC handbook of chemistry and physics. A ready-reference book of chemical and physical data : 2000-2001. 81. Aufl. Boca Raton: CRC Press.
- Lightcycle (2013a): Lightcycle. Sauberes Licht, Sauber Recycelt. München. Online verfügbar unter <http://www.lightcycle.de/>, zuletzt aktualisiert am 09.08.2013, zuletzt geprüft am 19.08.2013.
- Lightcycle (2013b): Jahresbericht 2012. Zahlen, Fakten. Online verfügbar unter http://www.lightcycle.de/fileadmin/user_upload/PDF/Jahresberichte/Jahresbericht_2012.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2013.
- Lightcycle (Hrsg.) (2011): Information - Entsorgung von LED-Lampen. http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.lightcycle.de%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FBilder%2FRuecknehmer%2FPDF%2FInformation_Lightcycle_Entsorgung_von_LED-Lampen_06_05_2011.pdf&ei=FMYQUu2fMI2SswbnvYCIDw&usg=AFQjCNHPEiy6bKSiqK-SAMbRDYkPq3NVGwQ&bvm=bv.50768961,d.Yms. Aufgerufen am 18.08.2013.
- Lightcycle (Hrsg.) (2012): Rücknahmesystem für LED- und Energiesparlampen wächst: 7.300 aktiv beworbene Sammelstellen in Deutschland. Pressemitteilung vom 04. Juli 2012. <http://www.lightcycle.de/presse/pressemitteilungen/2012/04072012-ruecknahmesystem-fuer-led-und-energiesparlampen-waechst-7300-aktiv-beworbene-sammelstellen-in-deutschland.html>. Aufgerufen am 18.08.2013.

- Lightcycle (Hrsg.) (2013): Abgeben lohnt sich - Energiesparlampen im Recycling. <http://www.lightcycle.de/verbraucher/infomaterialien/infotexte/abgeben-lohnt-sich.html>. Aufgerufen am 18.08.2013.
- Lipinski, Klaus (Hg.) (2007): Massenspeicher. ITWissen - Das große Online-Lexikon für Informationstechnologie. Online verfügbar unter http://www.itwissen.info/fileadmin/user_upload/EBOOKS/2007_08a_Massenspeicher.pdf, zuletzt aktualisiert am 15.08.2007, zuletzt geprüft am 19.12.2012.
- Litster S., 2004: PEM fuel cell electrodes, Article in Journal of Power Sources DOI: 10.1016/j.jpowsour.2003.12.055, online verfügbar unter: http://www.researchgate.net/publication/222435856_PEM_fuel_cell_electrodes, zuletzt aufgerufen am 24.07.2015
- Lobbe (2012): Recycling von PV-Modulen. Online verfügbar unter http://www.lobbe.de/fileadmin/Lobbe_Downloads/TatSachen/Tat39_web.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2013.
- London Commodity Markets (2012): London Commodity Markets | Rare Earth Metal Investments. Online verfügbar unter <http://londoncommoditymarkets.com/rare-earth-elements.php>, zuletzt geprüft am 25.10.2012.
- Long, Keith R. (2011): The Future of Rare Earth Elements. Will these High-Tech Industry Elements Continue in Short Supply? USGS Open-File Report 2011-1189. Hg. v. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1189/of2011-1189.pdf>, zuletzt geprüft am 05.07.2012.
- Loser (2014): persönliche Auskunft von Herrn Palitzsch der Fa. Loser Chemie GmbH vom 13.01.2014.
- Lucas, Rainer; Wilts, Henning (2011): Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM) aus Autoabgaskatalysatoren. In: Peter Hennicke, Kora Kristof und Thomas Götz (Hg.): Aus weniger mehr machen. Strategien für eine nachhaltige Ressourcenpolitik in Deutschland. München: Oekom.
- Lufthansa AG (2012): Geschäftsbericht 2011. Hg. v. Deutsche Lufthansa AG. Köln. Online verfügbar unter <http://investor-relations.lufthansa.com/fileadmin/downloads/de/finanzberichte/geschaeftsberichte/LH-GB-2011-d.pdf>, zuletzt aktualisiert am 28.03.2012, zuletzt geprüft am 08.02.2013.
- Lufthansa AG (2013): Lufthansa - Flotte. Lufthansa AG. Online verfügbar unter <http://konzern.lufthansa.com/flotte.html>, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Lugscheider, E.; Bobzin, K.; Zwick, J. (o.J.): Anwendungsgebiete und Entwicklungstrends für thermisch gespritzte Oberflächenbeschichtungen in der Luftfahrt. RWTH Aachen; Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften. Online verfügbar unter http://www.dgm.de/download/tg/706/706_53.pdf, zuletzt aktualisiert am 09.03.2005, zuletzt geprüft am 03.01.2013.
- Luidold, S.; Poscher, A.; Kaindl, M. (2013) Montanuniversität Leoben: Recycling von Seltenen Erden aus Sekundärrohstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Goldmann, D. (Hg.): Recycling und Rohstoffe, Band 6, S. 533-544. Neuruppin.
- Luidold, Stefan (2013): Montanuniversität Leoben, pers. kom. 12.02.2013
- Luo, J.; Ball, R. J.; Stevens, R. (2004): Gadolinia doped ceria/yttria stabilised zirconia electrolytes for solid oxide fuel cell applications. In: *Journal of Materials Science* 39 (1), S. 235-240. Online verfügbar unter <http://www.springerlink.com/content/m463j751664163u7/fulltext.pdf>.

- Magnetica (o.J.): Today's MRI Market - Magnetica. Magnetica - Innovation in Medical Imaging. Online verfügbar unter <http://www.magnetica.com/page/innovation/todays-mri-market/>, zuletzt geprüft am 18.07.2013.
- Mai, Andreas (2012): Hexis AG, Winterthuer (CH). Persönliche Auskunft per Email.
- Mai, Andreas; Iwanschitz, Boris; Denzler, Roland; Weissen, Ueli; Haberstock, Dirk; Nerlich, Volker; Schuler, Alexander (2012): Progress in Development of the Hexis' SOFC Stack and the Galileo 1000 N Micro-CHP System, Abstract A0403, 10th European SOFC Forum 2012, Luzern, Schweiz.
- Manhart, Andreas; Teufel, Jennifer; Stratmann, Britta (2008): Bewertung ausgesuchter Warengruppe nach ökologischen und sozialen Kriterien für den Landschaftsverband Rheinland. Ökoinstitut e.V. Freiburg.
- MarketResearch.com (2012): Industrial Abrasives - A Global Market Overview. Online verfügbar unter <http://www.marketresearch.com/Industry-Experts-v3766/Industrial-Abrasives-Global-Overview-7035456/>, zuletzt geprüft am 09.01.2013.
- Martens, Hans (2011): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl.
- Marwede, Max (2013): TU Berlin, Fraunhofer IZT. Persönliches Gespräch mit Till Zimmermann am 08.09.13.
- Marwede, Max; Berger, Wolfgang; Schlummer, Martin; Mäurer, Andreas; Reller, Armin (2013): Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste - Current feasible processes. In: Renewable Energy 55, S. 220-229.
- Marwede, Max; Reller, Armin (2012): Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. In: Resources, Conservation and Recycling 69, S. 35-49.
- Marx, Herr (2014): Firma Hereaus. pers. kom. 12.02.2013
- Matthey J. PLC, 2011: Fuel Cell today, the leading authority on fuel cells / The Fuel Cell Today Industry Review 2011, online verfügbar unter: http://www.fuelcelltoday.com/media/1351623/the_industry_review_2011.pdf, zuletzt aufgerufen am 06.08.2015
- Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik (2013): Funktionsweise von Magnetresonanztomographie (MRT). Online verfügbar unter <http://hirnforschung.kyb.mpg.de/methoden/magnetresonanztomographie-mrt/funktionsweise-von-magnetresonanztomographie-mrt.html>, zuletzt geprüft am 26.08.2013.
- McKinsey. (2011). Lighting the way: Perspectives on the global lighting market. Retrieved from img.ledsmagazine.com/pdf/LightingtheWay.pdf
- Melcher, Frank; Wilken, Hildegard (2013): Wie kritisch ist die Versorgungslage? Die Verfügbarkeit von Hochtechnologie-Rohstoffen. In: Chemie in unserer Zeit 2013 (43) S. 32-49.
- Melhart, Georg; Merz, Cornelia; Akkermans, Lars; Jordal-Jorgenson, Jorgen (2011): European second-hand car market analysis. Final report. Ökoinstitut e.V.; Transport&Mobility Leuven; COWI. Darmstadt. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/2010_2nd_hand_car_en.pdf.
- Merkel, C.; Friedrich, B. (2010): Rückgewinnung von Sondermetallen für die Elektronikindustrie aus Produktionsabfällen. Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovation 2010. o.O. Online verfügbar unter http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/data/publications/artikel_ettling_id_3502.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2013.

- Metal Bulletin Daily (2014): Tuesday January 14th, 2014, Number 9338.2, <http://www.metalbulletin.com/Minor-and-precious-metals/Minor-and-precious-metals-price-guide.html> (aufgerufen am 14.01.2014).
- Metal Pages (Hrsg.) (2012): The Rare Earth Market - Sept. 12. <http://www.metal-pages.com/reports/rare-earth-market-report-201209/> (aufgerufen am: 06.06.13).
- METI 2013: nach: Mitsubishi Electric Group <http://www.mitsubishielectric.com/company/environment/ecotopics/rareearth/what/index.html>
- METLOCK GmbH (2016). Metlock Ultrasafe, <http://www.metlock.com/index.html>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Metz, Reiner (2013): Technik. General Electrics (GE) Healthcare. pers. kom. 02.03.2013
- Mielicke, Claus (2012): Sen. Proc. Eng., MIRO Verfahrenstechnik. Persönliche Auskunft per Email am 18.12.2012
- Mineralölwirtschaftsverband e.V. (Hg.) (2012): Amtliche Mineralölzahlen für Deutschland. Online verfügbar unter http://www.mwv.de/upload/statistiken/info/AMS1209_htk3Q8bd4CyqxnG.XLS.
- Minkus, Petra (2012): Fa. Lukas Erzett. Persönliche Auskunft per Email am 06.12.2012
- 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
- Mitsubishi Electric (2013): Environmental Topics - Tapping into Hidden Deposits of Rare Earth Elements Found in Cities. Mitsubishi Electric Corporation. Online verfügbar unter <http://www.mitsubishielectric.com/company/environment/ecotopics/rareearth/index.html>, zuletzt geprüft am 16.10.2013.
- Mitsubishi pers. comm (2013), Telefonat Februar 2013
- Mitteldeutsche Zeitung (2013), Bahnhöfe profitieren von Konjunkturpaket, <http://www.mz-web.de/mitteldeutschland/sachsen-anhalt-bahnhoefe-profitieren-vom-konjunkturpaket,20641266,18016250.html>, 20.03.2013
- Møller Andersen, Frits; Larsen, Helge V.; Skovgaard, Mette (2008): Projection of end-of-life vehicles. Development of a projection model and estimates of ELVs for 2005-2030.ETC/RWM working paper 2008/2. Kopenhagen. Online verfügbar unter http://www.risoe.dk/ris-publ/art/2008_28.pdf.
- Moon, Won-Jae; Na, Sang-Oeb; Oh, Hyung-Young (2011): Method for recycling cerium oxide abrasive. 11.03.2011. Anmeldenr: US 13/046,306. Veröffentlichungsnr: US20110219704 A1.
- MORE 2015: Bast, U, et.al.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben, 2015
- Morley, N.; Eatherley, D. (2008): Material Security. Ensuring resource availability to the UK economy; Oakedene Hollins; C-Tech Innovation: Chester, UK.
- Moss, R. L.; Tzimas, E.; Kara, H.; Kooroshy, J. (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies.Hg. v. Joint Research Center, European Commission. Online verfügbar unter http://setis.ec.europa.eu/newsroom-items-folder/copy_of_jrc-report-on-critical-metals-in-strategic-energy-technologies/at_download/Document, zuletzt geprüft am 23.12.2011.

- Mudd, G. M. (2012): Vollständige Publikationsliste unter <http://users.monash.edu.au/~gmudd/publications.html>, abgerufen am 31.5.2012.
- Mudd, Gavin M. (2009): Historical trends in base metal mining: backcasting to understand the sustainability of mining. In: Proc." 48th Annual Conference of Metallurgists", Canadian Metallurgical Society, Sudbury, Ontario, Canada.
- Müller, Esther (2013): Project Manager EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. Pers. Kommunikations per Email mit Till Zimmermann am 09.07.2013.
- Müller, Tobias (2004): Entwicklung eines Recyclingprozesses für Nickel-Metallhydridbatterien. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des IME, 12).
- Müller, Tobias, Friedrich, Bernd (2006). Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries. *Journal of Power Sources*, 158(2), 1498-1509. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.10.046
- NEDO (2009): Trend Report of Development in Materials for Substitution of Scarce Metals; Shinko Research (Mitsubishi UFJ Research and Consulting). Report 08007835-0 080078380; New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO): Tokyo, 2009.
- NEDO 2013: Yoshida, J. pers.com. Juni 2013
- Nelson, W. A.; Orenstein, R. M. (1997): TBC experience in land-based gas turbines. In: *Journal of thermal spray technology* 6 (2), S. 176-180. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11666-997-0009-5>.
- Neuberger, Siegfried (2012): Siegfried Neuberger, der Geschäftsführer des Zweirad-Industrie-Verbands (ZIV) im dapd-Interview. Bad Soden am Taunus.
- Newmont Mining Corporation (Hrsg.) (2013): 2012 Annual Report. Verfügbar über: <http://www.newmont.com/node/4895> (aufgerufen am 12.01.2014).
- NGK 2012: NGK-Pressemitteilung vom 01.06.2012 <http://www.ngk.de/presse/ngk-pressemitteilung/article/bmw-setzt-im-neuen-20-liter-vierzylinder-auf-doppel-edelmetall-zuendkerzen-von-ngk-spark-plug-europe/> Zuletzt geprüft am 27.10.2013
- NGK 2012a NGK Pressemitteilung, <http://www.ngk.de/presse/ngk-pressemitteilung/article/neue-zuendkerze-fuer-den-aftermarket-doppel-platin-fuer-mercedes-benz-fahrzeuge/>; 27.10.2013
- NGK 2013a: Informationen zu Zündkerzen unter <http://www.ngk.de/produkte-technologien/zuendkerzen/zuendkerzentechnologien/edelmetallzuendkerzen/> zuletzt geprüft am 27.10.2013
- Nideröst, Rémy (2006): „Internationale Expertinnen und Experten für Brennstoffzellen treffen sich in Dübendorf“ in Informationsdienst Wissenschaft, Empa. Online verfügbar unter <http://idw-online.de/pages/de/news150691> , zuletzt geprüft am 13.03.13
- Niehbuhr, Manfred (2012): Fa. Krebs & Riedel, atlantic GmbH. Persönliche Auskunft per Email am 09.11.2012
- NIES (2010): Lifespan database for Vehicles, Equipment, and Structures: LiVES. Hg. v. National Institute for Environmental Studies. Online verfügbar unter <http://www.nies.go.jp/lifespan/index-e.html>, zuletzt aktualisiert am 31.03.2010, zuletzt geprüft am 30.01.2013.
- Niessner, W. 2009: Zündkerze und Verfahren zu ihrer Herstellung, Patent DE 102007052266 A1

- NISSAN (2013): Inside Nissan: Innovation und Technologie: Batterien. Hg. v. NISSAN Center Europe GmbH. Online verfügbar unter <http://www.nissan.de/DE/de/inside-nissan/innovation-and-technology/batterien.html>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2013, zuletzt geprüft am 29.08.2013.
- Nissley, D. M. (1995): Thermal barrier coating life modeling in aircraft gas turbine engines. In: Thermal Barrier Coating Workshop, S. 265-281. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF02646317>.
- Noboran Ltd (2011a): Noboran Ltd - PRODUCTS/CERAMIC GRINDING MEDIA/Ceria Stabilized Zirconia/Features & Applications of CSZ Grinding Media. Online verfügbar unter http://www.noboran.com/page.php?page=23/Features_&_Applications_of_CSZ_Grinding_Media, zuletzt geprüft am 24.07.2012.
- Noboran Ltd (2011b): PRODUCTS/CERAMIC GRINDING MEDIA/Ceria Stabilized Zirconia/CSZ Grinding Media - Overview. Online verfügbar unter http://www.noboran.com/page.php?page=20/CSZ_Grinding_Media_-_Overview, zuletzt geprüft am 24.07.2012.
- Nomura, Koji (2005): Duration of Assets: Examination of Directly Observed Discard Data in Japan. KEO Discussion Paper No. 99. Online verfügbar unter <http://www.sanken.keio.ac.jp/publication/KEO-dp/99/fulltext.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2012.
- Nordic Council (2009), Method to measure the amount of WEEE generated Report to Nordic council's subgroup on EEE waste TemaNord 2009:548 © Nordic Council of Ministers, Copenhagen 2009 ISBN 978-92-893-1884-6
- NRC (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy, Committee on Earth Resources, National Research Council of the national academies. Online unter: <http://www.nap.edu/catalog/12034.html>, abgerufen am 25.1.2011.
- Nuss 2014: Nuss, P., Eckelman, M.J.: Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis, PLoS One. 2014; 9(7): e101298. Published online 2014 Jul 7. doi: 10.1371/journal.pone.0101298, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4085040/?report=reader>, zuletzt geprüft 08.10.2015
- o.A. (2013): Liste der zum Rückbau anstehenden Windkraftanlagen. Online verfügbar unter <http://de.scribd.com/doc/84138092/Liste-der-zum-Ruckbau-anstehenden-Windkraftanlagen>, zuletzt geprüft am 21.08.2013.
- Oakdene Hollins (2010): Lanthanide Resources and Alternatives. Online verfügbar unter http://www.oakdenehollins.co.uk/media/205/lanthanide_resources_and_alternatives_may_2010.pdf, zuletzt geprüft am 29.05.2013.
- Oakdene Hollins (2011): Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England. Final report. Hg. v. European Pathway to Zero Waste. Reading. Online verfügbar unter <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/EPOW-recovering-critical-raw-materials-T5v2.pdf>, zuletzt aktualisiert am 06.04.2011, zuletzt geprüft am 18.12.2012.
- Oakdene Hollins (2011): Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England. Final report. Hg. v. European Pathway to Zero Waste. Reading. Online verfügbar unter <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/EPOW-recovering-critical-raw-materials-T5v2.pdf>, zuletzt aktualisiert am 06.04.2011, zuletzt geprüft am 18.12.2012.
- Oberschmidt, Gerald (2012): Expertenbefragung Prof. Gerald Oberschmidt, Optical Refurbishment Center GmbH. telefonisch, 23.10.2012. pers. Gespräch an Eva Moors.

- OECD (2001): Measuring Capital - OECD Manual. Measurement of capital stocks, consumption of fixed capital and capital services. Hg. v. OECD. Online verfügbar unter <http://www.oecd.org/std/nationalaccounts/1876369.pdf>, zuletzt geprüft am 26.10.2012.
- Oecorecell (o.J.): Flyer. Verfügbar unter http://www.ifa-gmbh.com/infocenterallgemein/category/12-infoblatt-corecell?download=14%3Aflyer_oecorecellgesamt. zuletzt geprüft am 14.01.2014.
- Oguchi, Masahiro; Kameya, Takashi; Yagi, Suguru; Urano, Kohei (2008): Product flow analysis of various consumer durables in Japan. In: *Resources, Conservation and Recycling* 52 (3), S. 463-480.
- Öhrlund, Isak (2012): Future metal demand from photovoltaic cells and wind turbines. Investigating the potential risk of disabling a shift to renewable energy systems. STOA - Science and technology assessment report. European Parliament. Brussels. Online verfügbar unter [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET\(2011\)471604_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET(2011)471604_EN.pdf), zuletzt aktualisiert am 21.03.2012, zuletzt geprüft am 15.10.2012.
- OICA (o.J.): OICA » 2008 Statistics. Hg. v. Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles. Online verfügbar unter <http://oica.net/category/production-statistics/2008-statistics/>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Ökoinstitut (2011): Study on Rare Earths and their recycling. Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Ökoinstitut e.V.: Darmstadt.
- Öko-Institut e.V. (2011a): Seltene Erden - Daten & Fakten. Hintergrundpapier Seltene Erden. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1110/2011-001-de.pdf>.
- Ökoinstitut e.V., Daimler AG, TU Clausthal, Umicore (Hrsg.) (2011): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Ökoinstitut e.V.: Darmstadt. <http://www.oeko.de/oekodoc/1334/2011-449-de.pdf> (aufgerufen am: 16.07.13).
- Ökoinstitut e.V.; DLR (2009): RENEWABILITY - Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Darmstadt, Berlin. Online verfügbar unter http://www.renewbility.de/fileadmin/download/renewbility_broschuere_download.pdf, zuletzt aktualisiert am 11.06.2009, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- ORKAM 2014: Fachgespräch des Umweltbundesamtes zur „Separation von Fahrzeugelektrik und -elektronik“, 17. Juni 2014, Berlin
- OVerlack AG: Seltene Erden - Overlack AG. Online verfügbar unter <http://www.overlack.de/de/produkte/spezialitaeten/seltene-erden/>, zuletzt geprüft am 19.07.2012.
- Padtare, N. P. (2002): Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. In: *Science* 296 (5566), S. 280-284. Online verfügbar unter <http://www.sciencemag.org/content/296/5566/280.full.pdf>.
- Palitzsch, Wolfram (2011): Waste recovery for metals with strategic importance - technical, economic and legal conditions. Examples and experience of Loser Chemie. Waste to energy and recycling conference 2011. Loser Chemie. Bremen, 18.05.2011. Online verfügbar unter http://www.actuator.de/UserFiles/File/wte/Loser%20Chemie%20GmbH_Dr_%20Wolfram%20Palitzsch_180511.pdf.
- Palitzsch, Wolfram (o.J.): PV Recyclingstrategien der Loser Chemie GmbH. Hg. v. Loser Chemie. Langenweißbach.

- Pandit, Pankaj Narayan (2011): Tenets of MRO Strategy for Airlines. infosys. Online verfügbar unter <http://www.infosys.com/industries/airlines/white-papers/Documents/tenets-MRO-strategy.pdf>, zuletzt aktualisiert am 2011, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- Papathanasiou, N. (2012): Helmholtz-Institut Berlin. Persönliche Mitteilung an Till Zimmermann.
- Papenberg, André (2013): RWE AG, Sparte Kernkraftwerke, Ver- und Entsorgung; Brennelemententechnik / Einsatzplanung. Persönliche Kommunikation mit Carolin Wiesenmaier.
- Parish, Theodore A.; Khromov, V. V.; Carron, Igor (1999): Safety issues associated with Plutonium involvement in the nuclear fuel cycle. CBoston: Kluwer. Online verfügbar unter http://books.google.de/books?id=aamn7uifb3gC&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=erbium&f=false.
- Parsons, David; Chatterton, Julia (2011): Ceramic coatings for jet engine turbine blades. Carbon Brainprint Case Study. Unter Mitarbeit von John Nicholls. Center for Environmental Risks and Futures, Cranfield University. Cranfield, UK. Online verfügbar unter <http://www.carbonbrainprint.org.uk/pdf/CBrainprint-CS01-JetTurbines.pdf>, zuletzt geprüft am 17.01.2013.
- PatentDe: Reaktorkern für einen Siedewasserkernreaktor - Dokument DE4423128A1. Online verfügbar unter <http://www.patent-de.com/19950126/DE4423128A1.html>, zuletzt geprüft am 10.10.2012.
- PC-WELT (2009): Exoten: Jaz, Zip, Rev, MO - Ratgeber Datenarchivierung - Festplatten. IDG Tech Media GmbH. Online verfügbar unter <http://www.pcwelt.de/ratgeber/Exoten-Jaz-Zip-Rev-MO-Ratgeber-Datenarchivierung-437908.html>, zuletzt aktualisiert am 2009, zuletzt geprüft am 14.12.2012.
- Pearsall, T. P. (2012). LEDs: The 2011 Market. European Photonics Industry Consortium (EPIC). Zitiert nach Deubzer 2012
- Pehlken, Alexandra (2013). COAST, Universität Oldenburg, pers.kom. 12.09.2013.
- Perez, Maritza; Bank, David (1998): Facial skin resurfacing with the erbium:YAG laser: new findings. In: *Cosmetic Dermatology*. Online verfügbar unter http://www.thecenterforderm.com/prof_journals/index/facialskin.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2012.
- pers. kom. 2015c: Persönliche Kommunikation Fahrzeugwerkstatt und -handel 2015
- pers. kom. 2015d: Persönliche Kommunikation Fahrzeughandel 2015
- Peters, M.; Fritscher, K.; Staniek, G.; Kaysser, W. A.; Schulz, U. (1997): Design and properties of thermal barrier coatings for advanced turbine engines. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 28 (8), S. 357-362.
- Pfaffel, Sebastian; Berkhout, Volker; Faulstich, Stefan; Kühn, Paul (2012): Windenergie Report. Deutschland 2011; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES
- Pfleger, P.; Lichtblau, K.; Bardt, H.; Reller, A. (2009): Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rohstoffe. Strategien und Handlungsoptionen. Hrsg.: IW Consult; Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft, München.
- Philips (2009): Philips eröffnet neues Retouren- und Recycling-Center am Standort in Hamburg-Fuhlsbüttel. Online verfügbar unter http://www.newscenter.philips.com/de_de/standard/about/news/press/konzernmeldungen/20090213_philips_eroeffnet_neues_retouren_und_recycling_center_am_standort.wpd, zuletzt aktualisiert 13.02.2009, zuletzt geprüft am 18.06.2013.
- Philips (2013). http://www2.philips.de/licht/onlineacademy/elcap_v3/index.html#/21/, letzter Aufruf: 22.03.2013

Philips 2016: per.com. Philips Healthcare 02.2016

Philips Healthcare (2013): Brochure Medical Systems. http://www.healthcare.philips.com/pwc_hc/main/shared/Assets/Documents/About/german_publications/Ausgabe_10.pdf. Zuletzt geprüft am 13.03.2013.

PHOTON (2012): Das Solarstrommagazin. April 2012 - Anteile der verschiedenen Zelltechnologien, weltweite Solarzellenproduktion 1999 bis 2011. In: *Photon Das Solarstrom Magazin* (4).

Photovoltaics Bulletin (2003): SiGe: a key to unlocking the potential of solar cells (2003). In: *Photovoltaics Bulletin* 2003 (10), S. 7-9. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147383250301023X>, zuletzt geprüft am 11.03.2016..

Poetzsch, Michael (2012): atlantic Bonn. Persönliche Auskunft per Email am 08.11.2012

Primas, A.: Life Cycle Inventories of new CHP systems - ecoinvent report No. 20. ecoinvent centre, Dübendorf, Zürich, Dezember 2007.

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

Provaluta (o.A.): Firmenpräsentation, Online verfügbar unter <http://www.provaluta.eu/>, zuletzt geprüft am 13.01.2014.

Provaluta Metall Recycling (o.A.): Firmenpräsentation, Online verfügbar unter <http://mwf-recycling.com/>, zuletzt geprüft am 13.01.2014.

Prusseit, Werner (2013), Telefonisches Gespräch (Geschäftsführer THEVA Dünnschichttechnik GmbH, D-85737 Ismaning).

PtJ, 2015a: Projektträger Jülich 2015, Projekt EnArgus Wiki-Artikel, online abrufbar unter: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d1708419-2/*/*Alkalische%20Brennstoffzelle.html?op=Wiki.getwiki&search=Brennstoffzelle&scope=all, zuletzt aufgerufen am 21.07.2015

PV Cycle (2013a): Annual Report 2012. European Association for the Recovery of Photovoltaic Modules. Online verfügbar unter http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Annual-Report_2012_LR.pdf, zuletzt aktualisiert am 28.03.2013, zuletzt geprüft am 30.05.2013.

PV Cycle (2013b): PV CYCLE, Rücknahme und Recycling von PV-Altmodulen. Online verfügbar unter <http://www.pvcycle.org/de/>, zuletzt geprüft am 30.05.2013.

PV Cycle (2013c): mündliche Mitteilung Andreas Hess (Country Manager Germany) vom 30.10.2013.

Rademaker, Jelle H.; Kleijn, René; Yang, Yongxiang (2013): Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality: A Systemic Evaluation of the Potential Yield of NdFeB Magnet Recycling. In: *Environ. Sci. Technol.*, DOI: 10.1021/es305007w.

Radons, Gunnar; Stadtwald-Klenke, Martin (2012): Supraleiter - Aufbau, Herstellung, Probleme.

Rajashekara, Kaushik; Grieve, James; Daggett, David (2006): Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid APU System for Aerospace Applications. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hg.): Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference. Tampa, Florida, 8-12 October 2006, S. 2185-2192.

- Rajpurohit Group of Enterprises (2012): Mineral Processing Company - Advance Ceramic Materials, Industrial Minerals. Online verfügbar unter http://www.zirox.co.in/ce-rium_oxide.htm, zuletzt aktualisiert am 25.06.2012, zuletzt geprüft am 24.07.2012.
- Raugei, Marco; Bargigli, Silvia; Ulgiati, Sergio (2007): Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. In: *Energy* 32 (8), S. 1310-1318.
- Raugei, Marco; Fthenakis, Vasilis (2010): Cadmium flows and emissions from CdTe PV: future expectations. In: *Energy Policy* 38 (9), S. 5223-5228.
- REBAT (2012): Rücknahmesystem CCR REBAT. Erfolgskontrolle 2012 gemäß §15 (1) BattG. Dornach.
- ReBAT (2013): Batterierücknahmesystem CCR REBAT. Online verfügbar unter http://www.rebat.de/CCRREBAT_Batterieruecknahmesystem_de.html, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Reckziegel, Christian (2010): Recycling in der Photovoltaikindustrie. Stand und Perspektiven. In: Karl Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 677-689.
- Recycling magazin (2010): Schrott zu Gold, Ausgabe 18/2010, S. 32-33, Erscheinungsdatum: 27.09.2010.
- Recycling Magazin (2011): Neues Recycling-Verfahren für Seltene Erden aus Akkus. News - RECYCLING magazin. Online verfügbar unter http://www.recyclingmagazin.de/rm/news_detail.asp?ID=14704&SID=466914192168100100&NS=1, zuletzt aktualisiert am 17.06.2011, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Recycling magazin (2011): Neues Recycling-Verfahren für Seltene Erden aus Akkus. News - RECYCLING magazin. Online verfügbar unter http://www.recyclingmagazin.de/rm/news_detail.asp?ID=14704&SID=466914192168100100&NS=1, zuletzt aktualisiert am 17.06.2011, zuletzt geprüft am 11.12.2013.
- Recycling magazin (2013a): Honda entwickelt Recyclingprozess für NiMH-Batterien weiter, Erscheinungsdatum: 05.03.2013, Online verfügbar unter http://www.recyclingmagazin.de/rm/news_detail.asp?ID=18369, zuletzt geprüft am 13.01.2014.
- Recycling magazin (2013b): Recycling 3.0, Ausgabe 06/2013, S. 25, Erscheinungsdatum: 25.3.2013
- Redux GmbH (2013): Redux: Batteriesortierung an unseren Standorten in Dietzenbach und Bremerhaven. Online verfügbar unter <http://www.redux-gmbh.de/sortierung.html>, zuletzt aktualisiert am 06.08.2013, zuletzt geprüft am 29.08.2013.
- Reidy, R.; Simkovich, G. (1993): Electrical conductivity and point defect behavior in ceria-stabilized zirconia. In: *Solid State Ionics* 62 (1-2), S. 85-97.
- Reintjes, N. Spengler, L. (2013): PROSA Straßenbeleuchtung, Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projektes „Top 100 - Umweltzeichen für klima-relevante Produkte“, Ökopol, Öko-Institut, Februar 2013, noch nicht veröffentlicht
- Reiss 2012: persönliche Mitteilung Dr. Reiss 20.08.2012
- Rentz, O.; Engels, B.; Schultmann, F. (2001). Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und -anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des Cadmiumproblems. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

- RePro (2012): Wilts, Henning; von Gries, Nadja: Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten - AP 1.2 Lokalisierung, Quantifizierung. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit FKZ 3711 95 318; Meilensteinbericht unter <http://www.oekopol.de/archiv/material/RePro%20Meilensteinbericht%201.pdf>
- RePro (2013): Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel Elektro- und Elektronikgeräte. Projekt REPRO, FKZ: 371195318, noch in Bearbeitung, Zuarbeit Ökopol, 2013.
- RePro 2015: Fachgespräch zum Projekt Ressourcenschutz und Produktverantwortung (RePro) Langtitel „Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten FKZ 3711 95 318“, 09.09.2015 Bundespresseamt Berlin
- RESOLVED (o.J.): Wiedergewinnung von Wertstoffen der Photovoltaik, Anreicherung und Dekontamination. Projekt RESOLVED. Online verfügbar unter http://www.resolved.bam.de/pdf-veroeffentlichungen/08-01_layman_report_de_resolved.pdf, zuletzt aktualisiert am 15.01.2008, zuletzt geprüft am 30.05.2013.
- Resource (2012): Das SATURN-Projekt, Ausgabe 4/2012, S. 4-11.
- Reuter M. A.; van Schaik A (2012b): Opportunities and Limits of WEEE Recycling - Recommendations to Product Design from a Recyclers Perspective, Proceedings Electronics Goes Green 2012, Berlin, Sept 10-12, 2012, 8p., Paper A5-3.
- Reuter M.A.; Verhoef E. (2004): A dynamic model for the assessment of the replacement of lead in solders. Journal of Electronic Materials, Vol. 33(12), pp. 1567-1580.
- Reuter, M.A., Van Schaik A. (2012a) Opportunities and Limits of recycling - A Dynamic-Model-Based Analysis. MRS Bulletin, vol. 37(4), pp. 339 - 347 (special edition on Sustainability)
- Reuter, M.A.; Van Schaik, A. (2013a): Review on Metal Recycling. End-of-Life Products, Residues, Wastes, Slags, Design for Sustainability, Eco-Labeling. In proceeding of 3rd International Slag Valorisation Symposium (Eds. A. Malfliet, P. Yan, Y. Pontikes, M. Guo, B. Blanpain), Leuven, 19-20 March 2013, 115-134. (ISBN 978-94-6018-637-0).
- Reuter, M.A.; van Schaik, A. (2013b): Resource efficient metal and material recycling, REWAS 2013: Enabling Materials Resource Sustainability Edited by: Anne Kvithyld, Christina Messers, Randolph Kirchain, Gregory Krumdick, Brajendra Mishra, Markus Reuter, Cong Wang, Mark Schlesinger, Gabrielle Gaustad, Diana Lados, and Jeffrey Spangenberg TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2013, pp. 332-340.
- Reuter, M.A., Boin, U.M.J., van Schaik, A., Verhoef, E., Heiskanen, K., Yongxiang Yang, Georgalli, G. (2005): The Metrics of Material and Metal Ecology: Harmonizing the resource, technology, and environmental cycles, Developments in Mineral Processing Vol 16. Elsevier. (ISBN 0-444-51137-7).
- Rieger, Robert (2009): Die Verwendung von "Seltenen Erdmetallen" in der Elektrogeräte- und Fahrzeugproduktion und ihre Erfassungsmöglichkeiten im Materialrecycling. Diplomarbeit. TU Dresden, Dresden. Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten.
- Rinck, P. (2013): Magnetic Resonance in Medicine. The Basic Textbook of the European Magnetic Resonance Forum. 6. Auflage. Elektronische Version 6.8. Online verfügbar unter www.magnetic-resonance.org, zuletzt geprüft am 26.08.2013.
- Riviere (2008): Riviere, P., et al.: Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), Contract TREN/D1/40-

2005/LOT10/S07.56606, Draft report of Task 2, July 2008, Economic and Market analysis, Coordinator: Philippe Riviere, Armines, Brüssel, 2008

Riviere, P. et al. (2008): Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), Contract TREN/D1/40-2005/LOT10/S07.56606, Draft report of Task 2, July 2008, Economic and Market analysis, Coordinator: Philippe Riviere, Armines, Brüssel, 2008.

Roewer, G. (2014). Konsequenzen der modernen Germaniumchemie. In P. Kausch, M. Bertau, J. Gutzmer, & J. Matschullat (Eds.), *Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge* (pp. 233-259). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Rolls-Royce (2011): Journey through a jet engine. Online verfügbar unter http://www.rolls-royce.com/interactive_games/journey03/index.html, zuletzt aktualisiert am 21.11.2011, zuletzt geprüft am 15.01.2013.

Rombach (2008): Rombach, E.; Weyhe, R.; Müller, T.; Sanchez, R.; Böhlke, J.; Georgi, T.; Friedrich, B.: Rückgewinnung von Metallen aus verbrauchten Gerätebatterien. *Metall*, 62. Jahrgang, Heft 4, 2008, S. 203-208

Rombach, Georg (2003): Grenzen des Recyclings. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des IME / Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, Institut und Lehrstuhl der RWTH Aachen, 4).

Römpp (2012): online Version des Chemielexikons unter <http://www.roempp.com>.

Roskill (2011), Roskill Information Services Ltd: *Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015*. Fourteenth Edition, London.

RPA (2008): Study in the field of non-energy raw materials. Prepared by RPA. RWI Essen for the European Commission. September 2008.

Rückert (2012): Technischer Leiter der Bartz-Werke GmbH. Telefonisches Gespräch am 31.08.2012. Dillingen/Dresden.

Rückert (2013): Technischer Leiter der Bartz-Werke GmbH. Telefonisches Gespräch am 15.03.2013. Dillingen/Dresden.

RWE (2013): André Papenberg, RWE Power AG, Sparte Kernkraftwerke, Ver- und Entsorgung, Brennelementtechnik und Einsatzplanung. Persönliche Korrespondenz via Email mit C. Wiesenmaier am 15.04.2013.

RWE (2013): RWE AG - Supraleiter. Online verfügbar unter <http://www.rwe.com/web/cms/de/496848/factbook/aktuelle-begriffe/supraleiter/>, zuletzt geprüft am 25.09.2013.

RWE (o.J.a): Kraftwerk Biblis. Essen; Köln. Online verfügbar unter <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/599764/data/235582/2/rwe-power-ag/presse-downloads/kernenergie/Standortbroschuere-Biblis.pdf>, zuletzt aktualisiert am 30.03.2011, zuletzt geprüft am 28.10.2013.

RWE (o.J.b): KKW Biblis - RWE Power AG - Mit ganzer Kraft. Essen. Online verfügbar unter <http://www.rwe.com/web/cms/de/16492/rwe-power-ag/standorte/kernkraft/kkw-biblis/>, zuletzt geprüft am 28.10.2013.

RWE (o.J.c): KKW Emsland - RWE Power AG - Mit ganzer Kraft. Essen. Online verfügbar unter <http://www.rwe.com/web/cms/de/16646/rwe-power-ag/standorte/kernkraft/kkw-emsland/>, zuletzt geprüft am 28.10.2013.

- RWE (o.J.d): KKW Gundremmingen - RWE Power AG - Mit ganzer Kraft. Essen. Online verfügbar unter <http://www.rwe.com/web/cms/de/17148/rwe-power-ag/standorte/kernkraft/kkw-gundremmingen/>, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (Hrsg.) (2013): Umweltgutachten 2012 - Verantwortung in einer begrenzten Welt. Erich Schmidt Verlag. Berlin.
- Saint-Gobain (2007a): AZ-40 for Coated Abrasives. Product Codes: 1565 and 1575. Online verfügbar unter http://www.abrasivematerials.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGabrasivematerials/Documents/AZ40%201565%20and%201575%20Data%20Sheet_A4.pdf, zuletzt aktualisiert am 15.02.2007, zuletzt geprüft am 09.01.2013.
- Saint-Gobain (2007b): NZ Plus for Bonded Abrasives. Product Codes: 1544 and 1548. Online verfügbar unter http://www.abrasivematerials.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGabrasivematerials/Documents/NZ%20Plus%201544%201548%201558%20Data%20Sheet_A4.pdf, zuletzt geprüft am 09.01.2013.
- Saint-Gobain (2007c): NZ Plus for Coated Abrasives. Product Codes: 1585 and 1595. Online verfügbar unter http://www.abrasivematerials.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGabrasivematerials/Documents/NZ%20Plus%201585%20and%201595%20Data%20Sheet_A4.pdf, zuletzt aktualisiert am 15.02.2007, zuletzt geprüft am 09.01.2013.
- Salhofer, S.; Schöps, D.; Meskers, C.; Kriegl, M.; Panowitz, G. (2009): Verfahrensvergleich zur Gewinnung von Wertstoffen aus Elektroaltgeräten. In: Bilitewski; Werner; Janz (Hrsg.): Tagungsband zur Fachtagung "Brennpunkt ElektroG, Umsetzung - Defizite - Notwendigkeiten". Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 62, Seiten 23 - 29.
- Sander 2008: Sander, K., Schilling, S., Luskow, H., Gonser, J., Schwedtje, A., Küchen, V.: Review of the European List of Waste - Final Report, http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/low_review_oekopol.pdf, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- 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
- Sander 2015: Sander, K., Schilling, S., Wagner, J., Günther, M.: Maßnahmen zur Optimierung der Entsorgung von quecksilberhaltigen Gasentladungslampen und anderen Lampenarten, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3712 33 306 UBA-FB 001928, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/massnahmen-zur-optimierung-der-entsorgung-von>, zuletzt geprüft am 08.02.2016
- Sander 2015a: Sander, K.: Empfehlungen zur Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten, Vortrag im Rahmen des UBA-Fachgesprächs am 09.09.2015, Bundespresseamt Berlin, Veranstaltung im Rahmen des Projektes RePro: Ressourcenschutz und Produktverantwortung (Langtitel Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten UBA FKZ 3711 95 318).
- Sander, Knut (2012): Herausforderungen bei der Erfassung und Verwertung von Elektroaltgeräten aus Sicht der Ressourcenschonung, Vortrag bei der Deutsch-Ungarische Fachtagung im Rahmen der ÖKOTECH 2012, Budapest, 2012
- Sander, Knut, Wagner, Lukas (2015): Erfassung von Elektro- und Elektronikaltgeräten, Vortrag beim Fachgespräch zum Projekt des UBA: Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen

Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten (FKZ 3711 95 318) am 09.09.2015 im Bundespresseamt Berlin

- Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Wambach, Karsten; Schlenker, Sylke; Müller, Anja; Springer, Johann et al. (2007): Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für photovoltaische Produkte. Ökopol. Hamburg. Online verfügbar unter <http://www.oekopol.de/de/Archiv/Stoffstrom/pv-cycle/Gesamtbericht%20PVCycle%20de.pdf>, zuletzt geprüft am 27.03.2012.
- Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Wambach, Karsten; Schlenker, Sylke; Müller, Anja; Springer, Johann et al. (2007): Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für photovoltaische Produkte. Ökopol. Hamburg. Online verfügbar unter <http://www.oekopol.de/de/Archiv/Stoffstrom/pv-cycle/Gesamtbericht%20PVCycle%20de.pdf>, zuletzt geprüft am 27.03.2012.
- Sander, Knut; Zangl, Stéphanie; Reichmuth, Matthias; Schröder, Gerd (2004): Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304, Endbericht. Ökopol; Institut für Energetik und Umwelt gGmbH. Hamburg; Leipzig. Online verfügbar unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2789.pdf>, zuletzt geprüft am 21.08.2012.
- saperatec (o.J.): Betrieb einer Recyclinganlage für Photovoltaik-Module. saperatec. Online verfügbar unter <http://www.saperatec.de/index.php/technologie/referenzen>, zuletzt geprüft am 17.07.2013.
- Sauer, Dirk Uwe (2011): Die Wahrheit über Kraft aus dem Akku. WELT Online 20.03.2011. Online verfügbar unter <http://www.welt.de/12833920>, zuletzt geprüft am 23.10.2012.
- Saurat, M.; Bringezu, S. (2008): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part I: Global Supply, Use in Industry, and Shifting of Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 12, Nr. 5/6, 754-766.
- Saurat, Mathieu; Bringezu, Stefan (2008): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part 1. In: *Journal of Industrial Ecology* 12 (5-6), S. 754-767.
- Savage, Matthew (2006): Implementation of Waste Electric and Electronic Equipment Directive in EU 25. European Commission Directorate-General Joint Research Council; Institute for Prospective Technological Studies: Luxemburg.
- Sawhney, Puja; Henzler, Mikael; Melnitzky, Stefan; Lung, Anita (2008): Best practices for E-waste management in developed countries. Adelphi Research: Berlin.
- Scharp, Michael (2009): Seltene Metalle und Zukunftstechnologien. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. BewarE, 2009. Online verfügbar unter http://www.hss.de/fileadmin/migration/downloads/FachforumPhysik_Scharp.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2011.
- Scharp, Michael (2011): Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk. Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes).
- Schiemann, J.; Kerßenboom, A.; Prause, H. J.; Peil, S. (2007): Handbuch Verwertung von Brennstoffzellen und deren Peripherie. Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. Duisburg. Online verfügbar unter http://www.iuta.de/files/handbuch_brennstoffzellen_verwertung.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2013.
- Schindler, Jörg; Schmidt, Patrick (2004): Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg (Studie im Auftrag der Ferien- und Hansestadt Hamburg/ Behörde für Umwelt und Gesundheit - Endbericht) online verfügbar unter

http://www.lbst.de/ressources/docs2004/Wasserstoff-Chancen-Hamburg_040202-1.pdf ,
zuletzt geprüft am 14.03.13

- Schittl, Gernot (2012): Recyclingpotenzial von kritischen Rohstoffen in Technologien zur Energieumwandlung (Masterarbeit). Universität für Bodenkultur: Wien.
- Schleisner, L. (2000): Life cycleassessment of a wind farm related externalities. In: Renewable energy 20 (3), S. 279-288, online verfügbar unter http://media.dropdo.com.s3.amazonaws.com/3kB/Schleisner2000_LCAwind.pdf.
- Schlosser, Gunilla; Gattringer, Claudia; Laner, David; Rechberger, Helmut (2013): Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich. Gesamtwirtschaftliche Stoffflussanalysen ausgewählter kritischer Rohstoffe (AP 7). Endbericht. Hg. v. 2013. Technische Universität Wien. Wien. Online verfügbar unter http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_216991.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2013.
- Schmidt, M. (2015): Rohstoffrisikobewertung - Platingruppenmetalle, DERA Rohstoffinformationen 26, Berlin
- Schöne 2015: pers. Kom. Dr. F. Schöne, Duesmann und Hensel Recycling GmbH, März 2015
- Schöne, Friedhelm (2013): Recycling von Katalysatoren, Duesmann & Hensel Recycling, Vortrag aus Hamburg Trend 2013, Online verfügbar unter http://hamburgtrend.info/fileadmin/user_upload/pdf/Vortraege_2013/Schoene_Recycling_von_Katalysatoren.pdf, zuletzt geprüft am 13.01.2014.
- Schöps, Dirk; Salhofer, Stefan; Spitzbart, Markus; Hagelüken, Christian; Meskers, Christina E.M; Kriegl, Martin; Panowitz, Gunther (2010): Bilanzierung der Edelmetallverluste beim E-Schrottreycling. In: Karl Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 641-645.
- Schoßig, Mandy (2011): Seltene Erden - Daten & Fakten. Hintergrundpapier Seltene Erden. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1110/2011-001-de.pdf>.
- Schreyer 2013: Schreyer, S.: Pressekontakt ziv-zweirad, http://www.ziv-zweirad.de/public/pm_20.03.2013_e-bikes-weiterhin-mit-rueckenwind-unterwegs1.pdf; (letzter Zugriff 14.05.2013)
- Schüler, Doris; Buchert, Matthias; Liu, Ran; Dittrich, Stefanie; Merz, Cornelia (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Unter Mitarbeit von Doris Schüler, Matthias Buchert, Ran Liu, Stefanie Dittrich und Cornelia Merz. Hg. v. Ökoinstitut e.V. Ökoinstitut e.V. Darmstadt.
- Schulz, Uwe (2013): Abteilungsleiter „Hochtemperatur- und Funktionsschichten“, DLR. Persönliche Auskunft per Email am 16.01.2013
- Schwanzara, Dominic (2012): Fa. Butzbacher Schleifmittel-Werke GmbH. Persönliche Auskunft per Email am 06.12.2012
- Schweda, Mario Erhardt (2010): Optimierung von APS-ZrO₂-Wärmedämmschichten durch Variation der Kriechfestigkeit und der Grenzflächenrauigkeit. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Maschinenwesen. Online verfügbar unter <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2011/3536/pdf/3536.pdf>, zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- Scientific America: World's First Fuel Cell Ship Docks in Copenhagen. Online verfügbar unter <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=worlds-first-fuel-cell-ship>, zuletzt geprüft am 24.07.2012.
- Scotia Mocatta (Hrsg.) (2012): Precious Metals Forecast 2013 - Gold. Scotia Mocatta: Toronto.

- Screen Rent (2013), Public Viewing, <http://www.screen-rent.com/#/de/public-viewing/>, 19.03.2013
- Sean-CC 2011: Supporting Action on Climate Change through a Network of National Climate Change Focal Points in South-east Asia” (SEAN-CC): Room And Small Commercial Air Conditioners, Technical Study Report, 2011
- Seidl, N., 2015: Quintech, The European Fuel Cell Supplier, online verfügbar unter: <http://www.quintech.de/deutsch/Impressum.php>, zuletzt aufgerufen am 15.07.2015
- Seiler, Elisa (2010): Recycling von Windkraftanlagen. Interne Studie. Hg. v. Fraunhofer ICT. Pfinztal.
- Seiler, Elisa (2013): Fraunhofer ICT. Persönliche Kommunikation mit Till Zimmermann per Email am 28.08.2013. Pfinztal/ Bremen.
- Seiler, Elisa; Bilitewski, Bernd; Woidaski, Jörg (2011): Recycling von Windkraftanlagen. Hg. v. Fraunhofer Institut für Chemische Technologie. Pfinztal. Online verfügbar unter http://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/ue_klw_Poster_Recycling%20von%20Windkraftanlagen.pdf, zuletzt geprüft am 21.08.2013.
- Seitz, Thilo (2013): Lufthansa Technik. Persönliche Auskunft per Email am 16.01.2013
- Seitz, Thilo (2013a): Lufthansa Technik. Persönliche Auskunft per Email am 16.01.2013 und 24.01.2013
- Seitz, Thilo (2013b): Lufthansa Technik. Telefonisches Gespräch mit Till Zimmermann am 25.01.2013,
- Seitz, Thilo (2013b): Persönliches Gespräch mit Till Zimmermann und Stefan Gößling-Reisemann am 5.3.13. Lufthansa Technik. Hamburg.
- Seltene Erden Institut (2013): <http://institut-seltene-erden.org/dysprosium-dy-66/> zuletzt geprüft am 09.03.2013
- Shah, N., Phadke, A. Waide, P. (2013): Cooling the Planet: Opportunities for Deployment of Super-efficient Room Air Conditioners, 2013.
- Shell 2009: Shell PKW-Szenarien bis 2030 Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität; <http://s04.static-shell.com/content/dam/shell/static/deu/downloads/publications-2009shellmobilityscenarios.pdf>; <http://www.shell.de/aboutshell/our-strategy/mobility-scenarios.html>
- Sherwani, A.F; Usmani, J.A; Varun (2010): Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1), S. 540-544.
- Shirayama, S; Okabe, T. (2009): Selective extraction of Nd and Dy from rare earth magnet scrap into molten salt, Processing materials for Properties, The Minerals, Metals & Materials Society, 2009.
- Shotyk, William; Krachler, Michael (2007): Contamination of Bottled Waters with Antimony Leaching from Polyethylene Terephthalate (PET) Increases upon Storage. In: *Environ. Sci. Technol.* 41 (5), S. 1560-1563.
- Siegler, Peter (2004): TTL Information Technology AG. Pressemitteilung vom 04.03.2004: IT Konsolidierung in der Rentenversicherung. (T. I. AG, Hrsg.) Abgerufen am 11. August 2013 von http://ttl-ag.de/leasing/presse/pressemitteilungen_detail.cfm?Detail_ID=63.

- Siemens (2002): Pictures of the future 2002 http://www.siemens.com/innovation/de/publikationen/zeitschriften_pictures_of_the_future/pof_fruehjahr_2002/energie/supra-leitung.htm , zuletzt geprüft am 13.03.13
- Siemens 2016: pers.kom Siemens Healthcare 02.2016
- Siemens AG (2003): Magnete, Spins und Resonanzen - Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie. Online verfügbar unter http://www.healthcare.siemens.com/siemens_hwem-hwem_ssxa_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@imaging/@mri/documents/download/mdaw/mtu3/~edisp/magnete_spins_und_resonanzen-00016931.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.2013.
- Siemens Healthcare (2013): Magnetic Resonance ecoline. <http://healthcare.siemens.com/refurbished-systems-medical-imaging-and-therapy/magnetic-resonance-ecoline>. Zuletzt geprüft am 13.03.2013.
- Siemens Healthcare (2013): Magnetic Resonance ecoline. <http://healthcare.siemens.com/refurbished-systems-medical-imaging-and-therapy/magnetic-resonance-ecoline>. Zuletzt geprüft am 13.03.2013.
- Siemens medical (2007): Aktualisierte gemeinsame Umwelterklärung 2007 nach EMAS. Produktionsstandorte in Deutschland: Erlangen, Forchheim, Heidelberg, Kernath, Rudolstadt. München.
- Silent Hektik (2013): Silent Hektik Automotive Hard- und Software. Online verfügbar unter: <http://www.silent-hektik.com/q3-e2.jpg>. Zuletzt geprüft am 29.10.2013.
- Singh, Surendra (2012): Fa. Zirox. Persönliche Auskunft per Email am 10.09.2012
- Sinha, Parikhit; Cossette, Maxime; Ménard, Jean-Francois (2012): End-of-life CdTe PV recycling with semiconductor refining. In: Stefan Nowak, Arnulf Jäger-Waldau und P. Helm (Hg.): 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Proceedings of the international conference held in Frankfurt, Germany, 24 - 28 September 2012. Munchen, Germany: WIP, S. 4653-4656.
- SMH Schweizerische Metallhandels AG. (2016). Das Zollfreilager in der Schweiz, <http://www.schweizerische-metallhandelsag.ch/>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Söhn M., 2010: Matthias Söhn 2010, Kohlenstoff-Nanoröhrchen als Elektrodenmaterial für PEM-Brennstoffzellen, Dissertation TU Darmstadt 2010, intern online verfügbar unter: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2241/2/dissertation.pdf>, zuletzt aufgerufen am 24.07.2015
- Sopka, Jörg (2012): Fa. Alstom. Persönliche Auskunft per Email am 04.10.2012
- Spectaris, Fachverband für Medizintechnik (2013): Daten und Fakten zur deutschen Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien. Online verfügbar unter http://www.spectaris.de/uploads/tx_ewscontent_pi1/SPECTARIS-Jahreszahlen2012_03.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.2013.
- Speirs, Jamie; Gross, Robert; Candelise, Chiara; Gross, Bill (2011): Materials availability. Potential constraints to the future low-carbon economy. Working paper. Centre for Energy Policy and Technology (ICEPT), Imperial College.
- Spengler (2013): Spengler, L.: Reihlen, A., Sander, K., Jepsen, D., Reintjes, N. (unveröffentlicht): Expertise Leuchtdioden, UBA Forschungsvorhaben Forschungskennzahl (UFOPLAN) 3709 93 306, unveröffentlicht
- Spengler, Laura (2013): Ökopol. Telefonisches Gespräch am 21.03.2013.

- SRU, Sachverständigenrat für Umweltfragen (2012): Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt. http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.html, abgerufen am 4.6.2012.
- Stadionwelt (2012a), Videodisplays in ausgewählten Arenen, in Stadionwelt, Ratgeber LED-Video-walls S.16, 2012
- Stadionwelt (2012b), Videowallübersicht der 1. und 2. Fußball-Bundesliga, in Stadionwelt, Ratgeber LED-Video-walls S.17, 2012
- Stadionwelt (2013), http://www.stadionwelt.de/sw_stadien/index.php?head=LED-Technik-in-den-deutschen-Fussballtempeln&folder=sites&site=news_detail&news_id=613, 12.02.2013
- Stadionwelt (2013a): <http://www.stadionwelt-business.de/index.php?head=-LED-Rekorde;> 10.2.2013
- Stadionwelt (2013b), Stadien & Arenen: Top 100 in Deutschland Februar 2013, http://www.stadionwelt.de/sw_stadien/index.php?folder=sites&site=top100, 20.03.2013
- Stadtwerke Leipzig (2012): Turbinentausch im Leipziger Kraftwerk. Online verfügbar unter <http://www.swl.de/web/swl/DE/Unternehmen/presse/Pressemeldungen/2012/turbinentausch.htm>, zuletzt aktualisiert am 13.07.2012, zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- Statista 2015. Entwicklung des Fahrradabsatzes in Deutschland von 2000 bis zum 1. Halbjahr 2014 (in 1.000 Einheiten). <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/154146/umfrage/fahrradabsatz-in-deutschland-seit-2000/> (zuletzt abgerufen am: 19.01.2015).
- Statistisches Bundesamt (2012): Statistisches Jahrbuch 2012: Produktion ausgewählter Erzeugnisse 2011, Wiesbaden 2012
- Stegemann, Karl-Heinz (2013): Solarworld Innovations, Bereichsleiter Solarzellen- und Modulentwicklung. Persönliche Auskunft beim 3. Begleitkreistreffen des Projekts KRESSE am 16.09.2013.
- Stelter, M.; Zeidler, O. (2013): Recycling von Gallium aus Prozessrückständen. In: Thomé-Kozminsky, Goldmann (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe , Band 6, Seiten 471-480.
- Stelter, Werner (2013): Experteninterview mit Dipl.-Ing. Werner Stelter, Fachdozent am Bundes-technologiezentrum für Elektro- und Informationstechnik e.V. Oldenburg, 15.01.2013. pers. Gespräch an Eva Moors.
- Stevenson, R. (2011): Long-Distance Car Radar Affordable radar will let every car see through fog, brake on its own, and track other vehicles hundreds of meters ahead, online verfügbar unter: <http://spectrum.ieee.org/green-tech/advanced-cars/longdistance-car-radar/0>. Zuletzt geprüft am 27.10.2013.
- Stiftung ear 2013: http://www.stiftung-ear.de/service_und_aktuelles/fragen_und_antworten/elektro__und_elektronikgeraete/wie_erfolgt_die_abgrenzung_zwischen_lampe_und_leuchte Letzter Aufruf: 05.03.2013
- 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
- Stiftung ear, 2014: Neue Aufgaben der EAR bei der Umsetzung des neuen ElektroG. take-e-way / vere e.V., Köln, 3. April 2014. Alexander Goldberg
- Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (2013): GRS-Batterien - Start - Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien. Online verfügbar unter <http://www.grs-batterien.de/>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.

- Stillwater Mining Company (Hrsg.) (2013): Extracting Value - 2012 Annual Report. <http://investorrelations.stillwatermining.com/phoenix.zhtml?c=99837&p=irol-reportsannual> (aufgerufen am: 19.07.13).
- Stollwerk, Gunther (2001): Grundlagen der Photovoltaik. Hg. v. Deutsche Solar AG. Freiberg. Online verfügbar unter <http://www.photovoltaik-kress.de/downloads/pdf/Grundlagen-der-Photovoltaik.pdf>, zuletzt geprüft am 21.08.2012.
- Stoppato, A. (2008): Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. In: *Energy* 33 (2), S. 224-232.
- Strangman, Thomas E. (1985): Thermal barrier coatings for turbine airfoils. In: *Thin Solid Films* 127 (1-2), S. 93-106.
- Strategic Metal report (2012): By-Product Metals: The Aluminum-Gallium Relationship Pt. I. <http://strategic-metal.typepad.com/strategic-metal-report/2013/01/by-product-metals-the-aluminum-gallium-relationship-pt-i.html#more> (aufgerufen am 14.01.2014).
- strategyanalytics (2012): GaAs Market Trends & Results. blog. Online verfügbar unter <http://blogs.strategyanalytics.com/gaas/>, zuletzt aktualisiert am 16.11.2012, zuletzt geprüft am 11.12.2012.
- Subanovic, Marko (2009): Einfluss der Bondcoatzusammensetzung und Herstellungsparameter auf die Lebensdauer von Wärmedämmschichten bei zyklischer Temperaturbelastung. Schriften des Forschungszentrum Jülich. Forschungszentrum Jülich. Jülich (Energie & Umwelt / Energy & Environment, 42). Online verfügbar unter http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/3708/1/Energie%26Umwelt_42.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- Sullivan, Daniel E. (2006): U.S. Geological Survey Fact Sheet 2006-3097. Hg. v. U.S. Geological Survey. Denver, USA. Online verfügbar unter <http://pubs.usgs.gov/fs/2006/3097/fs2006-3097.pdf>, zuletzt geprüft am 19.04.2011.
- Sulzer Metco (2012a): 8% Yttria Stabilized Zirconia Agglomerated and HOSP Thermal Spray Powders. Material Product Data Sheet. Online verfügbar unter http://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating_Materials/Thermal_Spray/ProductInformation/Ceramics_Zirconium_Oxide/DSMTS_0001_2_8YOZrOHOSP.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- Sulzer Metco (2012b): 8% Yttria Stabilized Zirconia Agglomerated and Sintered Thermal Spray Powders. Material product data sheet. Online verfügbar unter http://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating_Materials/Thermal_Spray/ProductInformation/Ceramics_Zirconium_Oxide/DSMTS_0047_1_8YOZrOa-ggsint.pdf, zuletzt aktualisiert am 13.12.2012, zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- Suter, D. (2005-2012): Röntgendiagnostik, Bildgebende Methoden (Kapitel 6). In: Einführung in die Medizinphysik. http://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Medizinphysik_06/1_Folien.pdf. Aufgerufen am 14.03.2013.
- Szweda 2006: Szweda, R. (HG): Silicon Germanium Materials & Devices - A Market & Technology Overview to 2006.
- Tagesanzeiger, 2010: JAPA BRAUCHT SELTENE ERDEN, ABER NUR CHINA HAT SIE; Zürich 11.10.2010; Online verfügbar unter <http://www.tagesanzeiger.ch/wirtschaft/unternehmen-und-konjunktur/Japan-braucht-seltene-Erden-aber-der-Erzfeind-hat-sie/story/15217408>, zuletzt geprüft am 18.11.2014

- TAI (2012): World of TUI als verborgener Airline-Riese. Hg. v. Tourismuswirtschaft Austria International. Online verfügbar unter http://www.tai.at/index.php?option=com_content&view=article&id=2719:world-of-tui-als-verborgener-airline-riese&catid=9&Itemid=4&lang=de, zuletzt geprüft am 08.02.2013.
- Talens Peiro, Laura; Villalba Mendez, Gara; Ayres, Robert U. (2011): Rare and critical metals as by-products and the implications for future supply. Working paper. INSEAD. Online verfügbar unter http://flora.insead.edu/fichiersti_wp/inseadwp2011/2011-129.pdf, zuletzt geprüft am 02.04.2013.
- Tanaka, Mikiya; Oki, Tatsuya; Koyama, Kazuya; Narita, Hirokazu; Oishi, Tetsuo (2012): Recycling of Rare Earths from Scrap. In: J.C.G Bünzli und V.K Pecharsky (Hg.): Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths: Including Actinides: Elsevier Science.
- Tasaki, Tomohiro; Takasuga, Takumi; Osako, Masahiro; Sakai, Shin-ichi (2004): Substance flow analysis of brominated flame retardants and related compounds in waste TV sets in Japan. In: *Waste Management* 24 (6), S. 571-580.
- Thema, Johannes; Irrek, Wolfgang (2010): Umwelt- und Ressourcenaspekte einer verstärkten Nutzung von Leuchtdioden (LED). Kurzexpertise zu Arbeitspaket 14 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: Wuppertal.
- Thermo Scientific (2012): Determination of Platinum, Palladium, and Rhodium in Spent Automotive Catalytic Converters with Thermo Scientific Niton XL3t Series Analyzers. Online verfügbar unter http://www.niton.com/docs/literature/autocatalyticconverter_hirez_2012july18.pdf?sfvrsn=0, zuletzt aktualisiert am 18.07.2012, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Theva (2013): Bandleiter <http://www.theva.de/prod/bandleiter>, zuletzt geprüft am 13.03.13
- Theva (2013b): Werner Prusseit, THEVA Dünnschichttechnik GmbH. Persönliche Korrespondenz via Email mit C. Wiesenmaier am 08.03., 10.03., 11.03., 14.03., 28.03., 15.04.2013.
- Thiele, U.K (2004): Quo vadis polyester catalyst? In: *Chemical Fibers International* (54), S. 162-163. Online verfügbar unter http://www.polyester-technology.com/Publication/quo_vadis.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2013.
- Thomason, J. S.; Atwell, R. J.; Bajraktari, Y.; Bell, J. P. ; Barnett, D. S.; Karvonides, N. S. J.; Niles, M. F.; Schwartz, E. L. (2008): From National Defense Stockpile (NDS) to Strategic Materials Security Programme (SMSP): Evidence and Analytic Support, Vol. I; Institute for Defense Analyses (IDA): Alexandria, VA.
- Thomé-Kozmiensky, Karl J. (Hg.) (1994): Kreislaufwirtschaft. Berlin: EF-Verl. für Energie- und Umwelttechnik.
- TNS Infratest (2008), Terapeak: Facts and Figures Neue eBay-Studie zu Deutschlands Dachbodenschätzen.
- Tolcin, Amy C. (2012): 2010 Minerals Yearbook. Indium.Hg. v. U.S. Geological Survey und U.S. Department of the Interior.U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/myb1-2010-indiu.pdf>, zuletzt geprüft am 15.08.2012.
- Toriz, F.C; Thakker, A.B; Gupta, S.K (1989): Flight service evaluation of thermal barrier coatings by physical vapor deposition at 5200 H. In: *Surface and Coatings Technology* 39-40, S. 161-172.

- Toyota (27.10.2011): Toyota kündigt nachhaltige Wiederverwertung von Batterien an. Köln. Online verfügbar unter <http://www.grueneautos.com/2011/11/toyota-kundigt-nachhaltige-wiederverwertung-von-batterien-an/>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Tradium (2016): Preisentwicklung wichtiger Seltener Erden, http://www.selteneerden.de/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=57, letzter Zugriff: 22.03.2016
- TRADIUM GmbH. (2016). Ihr Spezialist für Technologiemetalle, strategische Metalle und Seltene Erden, from <http://www.tradium.com/>, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Troczyński, T.; Cockcroft, Steve; Wong, H. (1996): Thermal Barrier Coatings for Heta Engines. In: *KEM* 122-124, S. 451-462.
- Trunova, O.; Beck, T.; Herzog, R.; Steinbrech, R.W; Singheiser, L. (2008): Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma sprayed thermal barrier coating systems for gas turbines—Part I: Experiments. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (20), S. 5027-5032.
- TUIfly (2013): Über TUIfly - Das Unternehmen | TUIfly.com. TUIfly.Online verfügbar unter http://www.tuifly.com/de/unternehmen_tuifly/index.html, zuletzt aktualisiert am 18.01.2013, zuletzt geprüft am 07.02.2013.
- TVO (2010): Nuclear Power Plant Unit Olkiluoto 3 , Seite 23: online verfügbar unter http://www.tvofinland.fi/uploads/File/2010/OL3_esite_EN.pdf, zuletzt geprüft am 03.01.2013
- Tzscheuschler, Peter (2007): Stromerzeugung aus Windkraft in Deutschland. Vortragsreihe Erneuerbare Energien. Online verfügbar unter <http://www.tfz.bayern.de/veranstaltungen/26361/tzscheuschler.pdf>, zuletzt geprüft am 25.02.2013.
- U.S. Department of Energy (2010): Critical Materials Strategy. Unter Mitarbeit von Diana Bauer, David Diamand, Jennifer Li, David Sandalow, Paul Telleen und Brent Wanner. Hg. v. U.S. Department of Energy. U.S. Department of Energy. Online verfügbar unter <http://energy.gov/sites/prod/files/edg/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>, zuletzt geprüft am 23.07.2012.
- U.S. Department of Energy (2011a): Critical Materials Strategy. Hg. v. U.S. Department of Energy. Online verfügbar unter http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf, zuletzt geprüft am 18.01.2012.
- U.S. Department of Energy (2011b): Critical Materials Strategy. US DOE report. Unter Mitarbeit von Diana Bauer, David Diamond, Jennifer Li, Michael McKittrick, David Sandalow und Paul Telleen. Hg. v. U.S. Department of Energy.
- U.S. Department of Energy (2011c): Report of the DOE-DOE Workshop on Fuel Cells in Aviation: Workshop Summary and Action Plan. Fuel Cell Technologies Program Workshop Report. Online verfügbar unter http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/aircraft_report.pdf, zuletzt aktualisiert am 26.09.2011, zuletzt geprüft am 24.07.2012.
- U.S. Department of Energy, 2004: Fuel Cell Handbook (Seventh Edition) by EG&G Technical Services, Inc., Contract No. DE-AM26-99FT40575 online verfügbar unter: <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/coal/energy%20systems/fuel%20cells/FCHandbook7.pdf>, zuletzt aufgerufen am 06.08.2015
- UBA (2009): Zahl der Demontagebetriebe und der behandelten Altfahrzeuge. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=18767>, zuletzt geprüft am 15.03.2013.
- UBA (2011): Batterierecycling in Deutschland: Rücknahme- und Verwertungsergebnisse 2009. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbun->

desamt.de/abfallwirtschaft/publikationen/papier_batterierecycling_in_deutschland_ruecknahme_und_verwertungsergebnisse_2009.pdf, zuletzt aktualisiert am 27.07.2011, zuletzt geprüft am 29.08.2013.

- UBA (2012): Kraftwerke in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kraftwerke_in_deutschland_datenbank.xls, zuletzt geprüft am 04.02.2013.
- UBA (2013): Elektroaltgeräte | Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete>, zuletzt aktualisiert am 02.10.2013, zuletzt geprüft am 16.10.2013.
- Umicore (Hrsg.) (2013): Spent Automotive Catalysts - Our Process. <http://www.preciousmetals.umicore.com/recyclables/SAC/Process/> (aufgerufen am 22.10.13)
- Umicore Precious Metals Refining (2012): Umicore Electro-Optic Materials. High Purity chemical germanium tetrachloride. Online verfügbar unter <http://eom.umicore.com/en/materials/products/highPurityGermanium/>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2012, zuletzt geprüft am 12.10.2012.
- Umicore Precious Metals Refining (2013): Battery Recycling. Online verfügbar unter <http://www.batteryrecycling.umicore.com/UBR/process/>, zuletzt aktualisiert am 30.08.2013, zuletzt geprüft am 30.08.2013.
- Umweltbundesamt (2010): Daten zur Umwelt - Altfahrzeugaufkommen und -verwertung. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2304>, zuletzt geprüft am 18.06.2013.
- Umweltbundesamt (2011): Trend zu Einwegflaschen aus Kunststoff ungebrochen. Presse-Information 031/2011. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2011/pd11-031_trend_zu_einwegflaschen_aus_kunststoff_ungebrochen.htm, zuletzt geprüft am 07.01.2013.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro). Laufendes UFOPLAN Vorhaben, FKZ 3711 95 318.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2013): Abfallverbringungsrecht. Verfügbar über: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/grenzueberschreitende-abfallverbringung>. (Aufgerufen am: 12.01.2014).
- Umweltmagazin (2013): Recycling 2.0, Ausgabe 4/5/2013, S. 12-15, Erscheinungsdatum: 02.05.2013.
- Umweltperspektiven (2013): Potenziale für Wertstoffrecycling, Ausgabe 01/2013, S. 8-11.
- UNEP (2011). Recycling Rates of Metals - A Status Report. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.
- UNEP (Hrsg.) (2013a): Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. UNEP International Resource Panel: Paris.
- UNEP (Hrsg.) (2013b): Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles. A Report of the Working group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. UNEP International Resource Panel: Paris.
- UNEP 2011: Recycling Rates of Metals- A Status report. A Report of the Working Group on global Metal Flows to the International Resource Panel. Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.; Buchert, M.; Hagelüken, C.

- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2012). Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. EPA 600/R-12/572. December 2012. Cincinnati, OH. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100EUBC.pdf>
- US Geological Survey (Hrsg.) (2010): Mineral Commodity Summaries. Platinum-Group Metals. US Geological Survey. Virginia.
- US Geological Survey (Hrsg.) (2012): Mineral Commodity Summaries. Gallium. US Geological Survey. Virginia.
- US Geological Survey (Hrsg.) (2013): Metal Prices in the United States through 2010 - Scientific Investigations Report 2012-5188. US Geological Survey. Virginia.
- USGS - U.S. Geological Survey: USGS Minerals Information: Commodity Statistics and Information. Mineral Commodity Summaries. USGS - U.S. Geological Survey, Mineral Resources Program, Minerals Information Team. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>, zuletzt geprüft am 04.09.2013.
- USGS 2007 U.S. Geological Survey: MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2007 Minerals Yearbook: Volume I.-- Metals and Minerals, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/myb/> <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2007/mcs2007.pdf>
- 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
- USGS, U.S. Geological Survey (2012): <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/mis.html>.
- van Gelder, J.W; Kameraat, K. (2008): Platinum from AngloPlatinum in catalysts of European car manufacturers. Research Paper by Profundo, Castricum.
- van Schaik, Antoinette; Reuter, Markus A. (2013). Product Centric Simulated Based Design for Recycling (DfR). Herausgegeben von NVMP, MARAS; Outotec.
- Van Tichelen, P., Geerken, T., Jansen, B., Vanden Bosch, M., VanHoof, V., Vanhooydonck, L., & Vercalsteren, A. (2007). Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs - Final Report Lot 9 : Public street lighting.
- Vaßen, Robert; Kagawa, Yutaka; Subramanian, Ramesh; Zombo, Paul; Zhu, Dongming (2012): Testing and evaluation of thermal-barrier coatings. In: *MRS Bull.* 37 (10), S. 911-916.
- Vattenfall (o.J.a): Kernkraftwerk Brunsbüttel. Brunsbüttel. Online verfügbar unter http://corporate.vattenfall.de/de/file/KKB-Broschure.PDF_22081729.PDF, zuletzt aktualisiert am 01.04.2010, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- Vattenfall (o.J.b): Kernkraftwerk Krümmel. Hamburg, zuletzt aktualisiert am 23.06.2009, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- VCD (2010): Elektrofahrräder. Radeln mit eingebautem Rückenwind. Hg. v. Verkehrsclub Deutschland (VCD). Berlin, zuletzt aktualisiert am 09.04.2010, zuletzt geprüft am 26.09.2013.
- VDMA Survey, (2013): Economic Situation and Outlook of the Fuel Cell Industry in Germany, online verfügbar unter: <http://bz.vdma.org/documents/266669/906967/2013-04-11%20Praesentation.pdf/d6ba0e14-123c-4620-80ab-2fb80d9ff43b> zuletzt abgerufen am 15.09.2015

- VDMA, 2013: Presentation and Press Conference Hannover Fair 2013, online verfügbar unter: <http://bz.vdma.org/documents/266669/906967/2013-04-11%20Praesentation.pdf/d6ba0e14-123c-4620-80ab-2fb80d9ff43b>, zuletzt aufgerufen am 14.08.2015
- Venter, Irma (2009): As auto industry stumbles, what's in store for platinum? Hg. v. Mining weekly.com. Online verfügbar unter <http://www.miningweekly.com/article/as-auto-industry-stumbles-whats-in-store-for-platinum-2009-04-30>, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Verhoef E, Dijkema G, Reuter M A (2004): Process knowledge, system dynamics and metal ecology, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 8(1-2), pp. 23-43.
- Vest, M.; Georgi-Maschler, T.; Friedrich, B.; Weyhe, R. (2010): Rückgewinnung von Wertmetallen aus Batterieschrott. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82 (11), S. 1985-1990.
- Vikström, Hanna (2011): Rare Metals: Energy Security and Supply (Examensarbeit Universität Uppsala)
- Virtual University (2011): Optische Speicherplatten. WEB-SET.COM. Online verfügbar unter <http://www.virtualuniversity.ch/elektronik/digital/dvs/41.html>, zuletzt aktualisiert am 23.08.2011, zuletzt geprüft am 19.12.2012.
- Von Gries, Nadja; Wilts, Henning (2014): Resource-efficient conception of WEEE collection groups. Accepted for Publication in *Waste Management and Resources*.
- VREG 2013: Der Schweizerische Bundesrat: Entwurf der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) https://www.admin.ch/ch/d/gg/pc/documents/2124/VREG_Entwurf_de.pdf, zuletzt geprüft am 18.02.2016
- Wade 2015: A. Wade, persönliche Kommunikation, 07.02.2015
- Wade, Andreas (2012): Recyclingpotenziale bei Photovoltaikanlagen. 18. Kolloquium Abfall & Altlasten aktuell. Dresden, 2012.
- Wagner, Jörg; Heidrich, Kerstin; Baumann, Janett; Kügler, Thomas; Reichenbach, Jan (2012): Ermittlung des Beitrags der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens. UBA-Texte Nr. 14/2012. Hg. v. Umweltbundesamt. INTECUS GmbH. Dessau-Roßlau.
- Walton 2015: Walton, A, , Yi, H, Rowson, N.A., Speight, J.D., Mann, V.S.J., Sheridan, R.S., Bradshaw, R.S., Harris, I.R., Williams, A.J.: The use of hydrogen to separate and recycle neodymium-iron-boron-type magnets from electronic waste, *Journal of Cleaner Production* Volume 104, 1 October 2015, Pages 236-241, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615005806, zuletzt geprüft 08.10.2015
- Wambach, Karsten (2013): Erfassung von Solarmodulen - Zukünftige Entsorgungsmengen. Urban Mining Kongress 2013. Wambach Consulting; PV Cycle. Urban Mining e.V. Iserlohn, 2013.
- Wambach, Karsten; Wade, Andreas (2013): Rückführungskonzepte und Aufbereitungsverfahren für Photovoltaikmodule - Stand der Technik und rechtliche Rahmenbedingungen. Urban Mining Kongress 2013. First Solar; Wambach Consulting. Urban Mining e.V. Iserlohn, 2013.
- Weitkamp, Jens; Gläser, Roger (2004-2006): Katalyse. In: Roland Dittmeyer, Wilhelm Keim, Gerhard Kreysa und Alfred Oberholz (Hg.): *Chemische Technik. Prozesse und Produkte*. 5. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter http://www.wiley-vch.de/books/info/winnacker-kuechler/img/Bd1_05.pdf, zuletzt geprüft am 11.04.2013.
- Welle, Frank (2010): Recycling von Kunststoffverpackungen - PET Getränkeflaschen und andere Anwendungen - Präsentation vom 28. Oktober 2010. 9. BfR Forum Verbraucherschutz.

- Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bfr.bund.de/cm/343/recycling_von_kunststoffverpackungen.pdf, zuletzt aktualisiert am 05.11.2010, zuletzt geprüft am 04.01.2013.
- Wenk, Erik (2011): Neue Turbine, neue Computer. Hg. v. Potsdamer Neueste Nachrichten. Online verfügbar unter <http://www.pnn.de/potsdam/554325/>, zuletzt geprüft am 02.01.2013.
- Werle, Raymund (2007): Simonis Handbuch Governance (Benz; Lütz; Schimank; Simonis)
- Westphal, Elke (2013): Persönliche Kommunikation mit der Mitarbeiterin der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe per E-Mail am 22. Juli 2013.
- Wetelco (2013), Telefonat Januar 2013.
- Weyhe, R.; Friedrich, B.; Müller, T.; Heegn, H. (2002): Feasibility of a new Closed Loop Recycling Concept for Nickel-Metallhydride Batteries. In: ICBR-International Congress for Battery Recycling, Bd. 3. Online verfügbar unter http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/data/publications/2002_icbr_paepe_id_7993.pdf.
- WGI (2012): http://info.worldbank.org/governance/wgi/sc_country.asp.
- Widmer, Rolf; Wäger, Patrick (2013): Entsorgung von Automobilelektronik. Fachbericht Swico, SENS, SLRS 2013. Zürich.
- Wikipedia (2011): Festoxidbrennstoffzelle, <http://de.wikipedia.org/wiki/SOFC>, zuletzt geprüft am 13.03.13
- Wikipedia 2008b: Indium-Gallium-Arsenide, http://en.wikipedia.org/wiki/indium_gallium_arsenide, zuletzt geprüft a, 27.10.2013.
- Wilhelm, T. (2006): Wie funktioniert die Computertomographie (Kapitel 2). In: Medizintechnik - Physikalische Funktionsprinzipien und Anregungen für den Physikunterricht. http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Kap_II_Computertomographie.pdf. Abgerufen am 14.03.2013.
- Wilts, Henning; Bleischwitz, Raimund (2013): An International Metal Covenant: A Step Towards Global Sustainable Resource Management. In: Factor X: Springer, S. 87-97.
- Windspeed-Energie (2013): <http://windspeed-energie-web.de/page1.html>, zuletzt geprüft am 09.03.2013
- Winterhoff, Marc; Kahner, Carsten; Ulrich, Christopher; Saylor, Philipp; Wenzel, Eike (2009): Zukunft der Mobilität 2020. Die Automobilindustrie im Umbruch? Hg. v. Arthur D Little. Online verfügbar unter http://www.adlittle.de/uploads/tx_extthoughtleadership/ADL_Zukunft_der_Mobilitaet_2020_Kurzfassung.pdf, zuletzt geprüft am 07.03.2013.
- Winterthur Technology Group (2008): Überblick über den Schleifmittelmarkt. Online verfügbar unter http://reports.winterthurtechnology.com/2007/ar/jahresbericht/ueberblick_ueber_den_schleifmittelmarkt.htm, zuletzt aktualisiert am 26.03.2008, zuletzt geprüft am 09.01.2013.
- Witt, Julian (2012): Erstellung eines Ressourcenkatasters von Windenergieanlagen in Deutschland unter Berücksichtigung der Rohstoffverfügbarkeit (Diplomarbeit Universität Bremen, Integrierte Produktentwicklung)
- Wittmer, D.; Scharp, M.; Bringezu, S.; Ritthoff, M.; Erren, M.; Lauwigi, C.; Giegrich, J. (2011): Environmentally Relevant Metallic Raw Materials. Summary of the results of the Work Package 2 of the project „Material Efficiency und Resource Conservation“ (MaRes). Wuppertal <http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/index.html>, abgerufen am 14.7.2012

- Wittmer, Dominic; Erren, Martin; Lauwigi, Christoph; Ritthoff, Michael; Dressler, Christoph (2011a): Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Teil 2: Untersuchung zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1. des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal.
- Wittmer, Dominic; Erren, Martin; Lauwigi, Christoph; Ritthoff, Michael; Dressler, Christoph (2011b): Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Untersuchung zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1. des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal.
- Wittmer, Dominic; Erren, Martin; Lauwigi, Christoph; Ritthoff, Michael; Dressler, Christoph (2010): Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRes)“. Wuppertal Institut für Umwelt, Klima, Energie GmbH: Wuppertal.
- Woodhouse, Michael; Goodrich, Alan; Margolis, Robert; James, Ted; Dhere, Ramesh; Gessert, Tim et al. (2012): Perspectives on the pathways for cadmium telluride photovoltaic module manufacturers to address expected increases in the price for tellurium. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- World Gold Council: Technology > World Gold Council. World Gold Council. Online verfügbar unter <http://www.gold.org/technology/>, zuletzt geprüft am 25.07.2012.
- Wright, E.I; Clegg, A.J; Rahimifard, S.; Jones, L. (2007): An investigation into end-of-life management of solid oxide fuel cells. In: Conference Proceedings, 3rd International Conference on Life Cycle Management (LCM 2007). Zürich, 27.-29.8.2007. ETH Zürich. Online verfügbar unter http://www.lcm2007.org/paper/338_2.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2013.
- Wu, M.K.; Ashburn, J.R.; Torng, C.J. (1987): Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient pressure". *Physical Review Letters* 58 (9): 908-910, online verfügbar unter http://prl.aps.org/abstract/PRL/v58/i9/p908_1 zuletzt geprüft am 13.03.13
- Wuppertal-Institut (2011): Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRes) - Ressourceneffizienz - Paper 2.3 - Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, ISSN: 1867-0237, Wuppertal.
- Xu, Tao; Peng, Huiqing (2009): Formation cause, composition analysis and comprehensive utilization of rare earth solid wastes. In: *Journal of Rare Earths* 27 (6), S. 1096-1102.
- Yang, Wen-ching (2003): Handbook of fluidization and fluid-particle systems. New York: Marcel Dekker.
- Young, George Hansen; Cowfer, Joseph Allan; Johnston, Victor James (1993): Katalysator und Verfahren zu Oxychlorierung von Ethylen in Dichlorethan. Angemeldet durch Oxy Vinyls am 27.07.1993. Anmeldenr: 69310831. Veröffentlichungsnr: 0000582165.
- Young, R. (2012), LED and MOCVD Market Outlook, LED Lighting Evolution Conference: From Sapphire to Lumens, http://imsconferences.com/sidle2012/Ross_Young.pdf, 12.02.2013
- Z.Q.My, P.C. (2003): A palladium-alloy deposited Nafion membrane for direct methanol fuel cells. In *Journal of Membrane Science* 215 (pp. 327-336).
- Zepf (2015): Zepf, V.: Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen Erden - Quantitative Ergebnisse für Neodym in Deutschland -, Vortrag bei der Tagung Recycling und Rohstoffe, Berlin, 2015

- Zhaoqiang, Zhang; Alexey, Matveev; Sigurd, Øvrebø; Robert, Nilssen; Arne Nysveen: IEEE Xplore - State of the art in generator technology for offshore wind energy conversion systems, online verfügbar unter http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5994760&tag=1 , zuletzt geprüft am 18.02.2013.
- Zimmer, Hans-Otto (2012): Geschäftsführer Zimmer Katalysatoren-Recycling GmbH & Co. KG. Persönliche Kommunikation mit Viktor Knobloch per Email.
- Zimmermann, Till, & Gößling-Reisemann, Stefan (2014). Recycling Potentials of Critical Metals- Analyzing Secondary Flows from Selected Applications. *Resources*, 3(1), 291-318. doi:10.3390/resources3010291
- Zische, Eghart (2012): Fa. Zische Schleifwerkzeuge. Persönliche Auskunft per Email am 8.11.2012
- ZIV (2013): Zweirad-Industrie-Verband e. V.: Zahlen - Daten - Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland, Präsentation bei der Wirtschaftspressekonferenz am 20. März 2013, Berlin
- ZIV-Zweirad 2013: http://www.ziv-zweirad.de/public/pm_20.03.2013_beliebtheit-des-fahrrades-ungebrochen.pdf, (letzter Zugriff: 14.05.2013)
- Zuser, Anton; Rechberger, Helmut (2011): Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics. In: *Resources, Conservation and Recycling* 56 (1), S. 56-65.
- ZVEI (2012): Batterierecycling in Deutschland: Ein Musterbeispiel für den Umweltschutz. Online verfügbar unter <http://www.energievollerleben.de/News%20n%20Stories/News/Seiten/Batterierecycling-in-Deutschland.aspx>, zuletzt geprüft am 29.08.2013.

9 Anhänge

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 251: Synopse von zehn ausgewählten Kritikalitätsstudien aus Erdmann et Graedel (2012) – Teil 1: Zieldefinition und Rahmen

	DOE (DOE, 2010)	EU (EU, 2010)	General Electric (Duclos et al., 2010)	Institute for Defense Anal- yses (Thomason et al., 2008)	IW Consult (Pfleger et al., 2009)	NEDO (NEDO, 2009)	NRC (NRC, 2008)	Oakdene Hollins (Morley et al., 2008)	Öko-Institut (Buchert et al., 2009)	RWI/ ISI/ BGR (Frondelet et al., 2007)
Hauptziele	Bewertung von Chancen und Risiken von Hauptmaterialien; Entwicklung von Materialstrategien	Methodenentwicklung, um für die EU kritische Rohstoffe zu identifizieren; Identifikation der kritischen Rohstoffe	Identifikation von Materialien, deren Versorgung aufgrund von Versorgungsrisiken oder Preissteigerung gefährdet ist	Analyse der Anforderungen für das Management einer Rohstofflagerhaltung von strategischen und kritischen Rohstoffen für die nationale Verteidigung	Identifikation der Schwachstellen und Risiken der Rohstoffversorgungssicherheit	Analyse der Versorgung mit seltenen Metalle; Identifikation von Substitutionsprojekten	Entwicklung einer Methode um kritische Mineralien zu identifizieren; die Bedeutung der kritischen Materiale aufzeigen	Identifikation unsicherer Materialien, die nähere Aufmerksamkeit verdienen	Analyse der Kritikalität von Metallen für nachhaltige Zukunftstechnologien und ihr Recyclingpotenzial	Beseitigung der Sorge um die Rohstoffversorgung; Bewertung von Langzeitangebot und -nachfrage
Systemuntersuchung	Saubere/„grüne“ Technologien	Wirtschaft	Unternehmen	Verteidigungs/ Rüstungssektor	Wirtschaft	Wirtschaft	Wirtschaft	Wirtschaft	Saubere/„grüne“ Technologien	Wirtschaft
Geographischer Focus	Global	EU	keinen	USA	Bayern	Japan	USA (implizit)	Global	Global	Deutschland
Zeitraumen	0-5 Jahre und 5-15 Jahre	Weniger als 10 Jahre	Nicht explizit angegeben	Konfliktjahr plus 3 Jahre	Nicht explizit angegeben	Nicht explizit angegeben	Weniger als 10 Jahre	Langzeiteinfluss	2020 und 2050	2025

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 252: Synopse von zehn ausgewählten Kritikalitätsstudien aus Erdmann et Graedel (2012) – Teil 2: Rohstoffgruppen

	DOE	EU	General Electric	Institute f. Defense Analyses	IW Consult	NEDO	NRC	Oakdene Hollins	Öko-Institut	RWI/ ISI/ BGR
Endgültiger Rohstoffumfang	14 Hauptmetalle	41 Metalle und Industriemineralien	11 „minor metals“	68 Metalle, Industriemineralien und Zwischenprodukte	37 Metalle und Industriemineralien	39 Metalle	13 Metalle	69 Metalle und Industriemineralien	11 Metalle	12 Metalle und Industriemineralien
Vorauswahl an Rohstoffen	Erwartete Gefahren	20 vorab identifizierte Materialien; 21 Materialien, die von Expertenrat identifiziert wurden	Von 24 Elementen der GE Anschaffungswerte ausgesucht (70 Elemente sind in der Rangordnung); hohe Preisvolatilität	Routinemäßige Analyseservicevorteil 17 neuer Materialien	Veränderte Auswahl auf Basis der BGR Faktenblättern	Routinemäßige Auswahl plus 3 neuer Materialien	Ausgesucht, um die Rahmenbedingungen möglichst breit darzustellen	Nicht erklärt; militärisch strategische Materialien ausgenommen	Antizipierte /erwartete Kritikalität	Durch Risikofilter und anderen Überlegungen, daraus 47 Materialien mit Importüberschuss
Identifizierte kritische Rohstoffe	6 kurzfristig/ 5 Mittelfristig kritische	14 kritische	7 kritische	26 manifestierte Defizite	14 mit hohem Risiko	14 kritische	7 kritische	7 unsichere	Alle kritisch	Alle unkritisch

Tabelle 253: Synopse von zehn ausgewählten Kritikalitätsstudien aus Erdmann et Graedel (2012) – Teil 3: Methoden

	DOE	EU	General Electric	Institute f. Defense Analyses	IW Consult	NEDO	NRC	Oakdene Hollins	Öko-Institut	RWI/ ISI/ BGR
Grundkonzept	Kritikalitätsmatrix; Angebot- und Nachfrageprognosen	Kritikalitätsmatrix	Kritikalitätsmatrix	Angebots- und Nachfrage szenarien; Vorratsausgleich	Kritikalitätsindex	Kritikalitätsindex	Kritikalitätsindex	Kritikalitätsindex	Kritikalitätsatz; Zeitplan	Risikofilter; Angebots- und Nachfrage voraus-sage
Hauptdimensionen	Nachfragerisiken/ Bedeutung für sauberen/erneuerbare Energien	Nachfragerisiken/ Wirtschaftliche Bedeutung	Nachfrage- und Preisrisiko/ Auswirkung von Versorgungsengpässen	Angebots- und Nachfrageentwicklungen/ Vorratsbilanzierung	Quantitative und qualitative Indikatoren	Angebots- und Nachfrage risiken/ Potenzielle Regulierungsrisiken	Nachfragerisiken/ Auswirkung von Versorgungsengpässen	Versorgungsrisiken/ Materialrisiken	Versorgungsrisiken/ Nachfragesteigerung/ Recyclingsrestriktionen	Versorgungsrisikofilter/ Angebots- und Nachfrageentwicklungen
Aggregation	Ungleich gewichtete Indikatoren für beide Kritikalitätsachsen	Algorithmus für Versorgungsrisiko und wirtschaftliche Bedeutung	Gleichgewichtete Indikatoren für beide Dimensionen	Verhältnis von Angebot und Nachfrage/ Massenbilanzierung der Vorräte	Ungleich gewichtete Indikatoren für Kritikalitätsindex	Ungleich gewichtete Indikatoren für kritische Indizes	Schätzung für Nachfrage risiken und Algorithmus für Versorgungsrestriktionen	Gleichgewichtete Indikatoren für Kritikalitätsindex	Schätzung für jede der drei Dimensionen; Durch Faktorkombinationen entwickelte Zeitreihe	Einengende Filter/ Keine quantifizierte Verbindung von Angebot und Nachfrage

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 254: Liste von Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise	
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß		Polit. Zielvorgabe
1	Permanentmagnete	Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge Innovative Elektromotoren für Kraftfahrzeuge	Seltene Erden (Fe-B-Nd, SmCo, Dy, Tb, Pr)		X						X						X	Synopse Elektrische Traktionsmotoren (ISI/IZT 2009) HT Strategie: 2020 mindestens eine Million Elektrofahrzeuge
2	Permanentmagnete	Hochleistungs-Permanentmagnete Starkes Magnetmaterial für miniaturisierte IKT, Elektromotoren, Windkraftanlagen und andere Anwendungen	Magnetmaterial: Fe-B-Nd, Dy, Sm			X						X					X	Synopse Hochleistungs-Permanentmagnete (ISI/IZT 2009) HT Strategie Umbau E-Versorgung
3	Magnete	Ultraeffiziente Elektromotoren für industrielle Anwendungen Neue Generation Strom sparender Motoren	Spulen, Rotor: Cu Magnete: Nd, Sm			X		X			X						X	Synopse Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren (ISI/IZT 2009) EuP Richtlinie, VONr. 640/2009

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe	
4	Oxidations-, Speicher- und SCR-Katalysator	Hocheffiziente Abgasreinigungssysteme für Dieselfahrzeuge Partikelfilter zur Abgasreinigung auf Ottomotorenstandard	Oxydations-Katalysator: Pt, Pd SCR: W, V			X		X			X						X	(ISI/IZT, 2009) Kraftfahrzeugsteuergesetz: Nachrüstung von dieselpetriebenen Pkw mit Partikelfiltern
5	Biochemische Katalysatoren	Katalysatoren in der biochemischen Konversion von nachwachsenden Rohstoffen	u. a. Au, Pt, Pg Oxidation von Kohlenhydraten, Herstellung von Zuckersäuren (Wasch- und Reinigungsmittel), Goldkatalysierte Spaltung von Fettsäureestern, Oxidation von Fettsäuren an Gold-Bimetallkatalysatoren (Waschmitteltenside)		X			X								X		vTI Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik: „Innovative Technologien, Verfahren und Produkte mit Entwicklungspotenzial“ Substitution nicht-erneuerbarer Rohstoffe durch Biomasse
6	Biokatalysator	Biokatalyse in der Bionik Enzymatisch gesteuerte Prozesse zur CO2-Fixierung und photosynthetischen Wasserstoffherzeugung	Behälter: Stahl, Cr, Cu	X			X				X				X			

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	
7	Kohlenstoffsuperkondensator	Superkondensatoren zur Traktionsunterstützung für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge Pufferung von Elektrizität und schnelle Entladung bei Dynamikspitzen im Fahrbetrieb	C, Kohlenstoff-Aerogele, Ta, Al, Ti, Kunststoffe, organische Lösungsmittel		X		X								X		Synopse Superkondensatoren (ISI/IZT 2009)
8	Stromspeicher	Redox-Flow-Elektrizitätsspeicher Stromspeicher höchster Kapazität für stationäre und mobile Anwendungen	Struktur: Chromstahl Elektrolyt: V		X			X			X					X	Synopse Redox-Flow Elektrizitätsspeicher (ISI/ICT 2009) HT Strategie Umbau E-Versorgung
9	Metallhydrid	Metallhydrid Wasserstoffspeicher Energiespeicherung hoher Speicherdichte	Ni, Co, La, Nd		X				X	X					X		(Berger 2007:113)
10	Energiespeicher	Druckluftspeicher	Kompressor: Stahl		X		X			X						X	HT Strategie Umbau E-Versorgung

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	
11	Kathoden	Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher Elektrizitätsspeicher mit höchster Leistungs- und Energiedichte für Fahrzeuge, mobile elektronische Geräte und Powertools	Co, Mn, Ni, Li		X			X			X					X	Synopse Lithium-Ionen Hochleistungsstromspeicher (ISI/IZT, 2009) Bundesregierung: 2020 mindestens eine Million Elektrofahrzeuge
12	Fahrzeugelektronik	Hybridelektrische Kraftfahrzeuge Autarke Vollhybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge mit Netzzurückspeisung	Elektronik: Cu, Si, Sn		X					X		X			X		Synopse Elektrische Traktionsmotoren (ISI/IZT 2009)
13	Simulationselektronik	Virtuelle Präzisionssimulation Computergestützte Planung, Optimierung und Prüfung von Produkten, Fabriken und chirurgischen Eingriffen	Elektronik: Cu, Si, Sn Großdisplays: In		X			X			X			X			(Pictures of the Future 2006:73) Materialeffizienzpotenzial
14	Fertigungselektronik	3-D Drucker Auftrags-Fertigungsverfahren für kleine Bauteile aus Metall, Keramik, Kunststoff und lebenden Zellstrukturen	Elektronik: Cu, Sn, Si Struktur: Stahl, Alu Gehäuse: Polymere	X			X				X			X			(Fraunhofer Magazin 2006b:54) Materialeffizienzpotenzial durch „Production on Demand“

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe	
15	Roboter-elektronik	Service Roboter Intelligente Maschinen für Reinigungsaufgaben, für die Unterstützung behinderter Menschen oder für gefährliche Aufgaben	Elektronik: Cu, Si, Sn Struktur: Stahl Gehäuse: Polymere	X			X					X				X		(ISI/IZT 2009) Menschliche Gesundheit (als Umweltschutzgut)
16	Elektronik in der Haustechnik	Intelligente Haustechnik Vernetzung, Überwachung und Fernsteuerung der Haustechnik, Informationstechnik, Kommunikationstechnik und Sicherheitstechnik	Elektronik: Si, Cu, Sn Kabel: Cu		X		X				X				X			(ISI/IZT 2009) Smart Meters: § 21d EnWG (Energiewirtschaftsgesetz), Gefahr des Rebound
17	Elektronik in der Agrarwirtschaft	Precision Farming Hochpräzise satellitengesteuerte Bestellung landwirtschaftlicher Flächen zur bedarfsgerechten Ausbringung von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln	Elektronik/GPS: Si, Cu, Sn Fahrzeuge: Stahl, Al Sensoren und Aktoren			X	X				X					X		(ISI/IZT 2009), Nährstoffe sind Problem, s. Indikatorenbericht
18	Polymer-elektronik	Organische Elektronik (Polymer-elektronik) Kostengünstige dünne und flexible polymerelektronische Schaltung	Kunststoffe, Au		X		X					X			X			(ISI/IZT 2009) -> weniger Rohstoffe, Metallsubstitution?

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise	
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß		Polit. Zielvorgabe
19	Adaptronik	Adaptronik Aktive Systeme zur Schwingungs- und Lärmdämpfung in Fahrzeugen, Flugzeugen, Maschinen und Geräten	Sensoren und Aktoren: Quarz (SiO ₂), LiNbO ₃ , GaPO ₄ BaTiO ₃ Elektronik: Cu, Si, Sn	X			X					X				X		(Fraunhofer Magazin 2006a:43) Lärmvermeidung
20	Smart Grids	Smart Grids	Elektronik/IT: Cu, Si, Sn	X			X				X						X	Fraunhofer NH Projekt HT Strategie Umbau E-Versorgung
21	Green IT	Green IT	Regeltechnik: Cu, Si, Sn	X			X				X						X	Fraunhofer NH Projekt HT Strategie: Mehr Internet bei weniger Energieverbrauch nutzen
22	Sensoren in der Gebäudetechnik	IR-Sensoren Breites Anwendungsfeld in der Gebäude- und Sicherheitstechnik	LiTaO ₃ , LiNbO ₃ , Pb ₃ Ge ₃ O ₁₁ , La, Sc, Nb, Ta		X					X		X				X		Synopse Infrarot Detektoren (ISI/IZT 2009) (Energieeffizienzpotenzial in Gebäudetechnik)

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	
23	Funketiketten	RFID Tags Kostengünstige intelligente Funketiketten für Massenprodukte	Antenne: Ag, Cu, Al Chip: Si, Kunststoffe Substrat: PET			X		X						X		X	Synopse RFID (ISI/IZT 2009) Potenzielle Umweltentlastung z. B. bei Altgeräteerfassung + relevanten Stoffen
24	Elektroden	Transparentes Elektrodenmaterial Transparente und leitfähige Elektrode für Displays, optische Technologien und Solarzellen	In (ITO), Sn (SnO2), Sb (ATO)			X			X			X			X		Synopse ITO in der Displaytechnik (ISI/IZT 2009)
25	Kraftstoffherstellung	Biomass to Liquid (BtL) Herstellung von Kraftstoffen aus Holz, Stroh und anderer Biomasse. Erdölsubstitution und Übergangstechnologie zur Wasserstoffwirtschaft	Stahl, Co, Pt, Pd, Rh, Re Kat z. B. 98 % Co + 2 % Ru		X											X	Synopse Synthetische Kraftstoffe (ISI/IZT 2009, JRC 2011) Erneuerbare-Energien-Richtlinie: EE im Verkehrssektor 10 % energetisch 2020
26	Wertstoffrückgewinnung	Landfill/s Mining Leistungsfähige, kostengünstige Bergbautechniken zur Rückgewinnung von Wertstoffen wie beispielsweise Kupfer aus Deponien	Stahl, Cr, Ni		X		X				X				X		(ISI/IZT 2009) Gewinnung der Wertstoffe mit Umweltbelastung verbunden

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise	
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß		Polit. Zielvorgabe
27	Wertstoffrückgewinnung	Urban Mining Leistungsfähige, kostengünstige Techniken zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus der städtischen Infrastruktur	Stahl, Cr, Ni		X		X				X					X		(ISI/IZT 2009)
28	Reduzierte Bodenbearbeitung	Conservation tillage Reduzierte Bodenbearbeitung, pfluglose Anbausysteme	Elektronik/GPS: Si, Cu, Sn		X		X				X					X		(Fraunhofer NH Projekt) Verringerte Erosion, höhere Fruchtbarkeit der Böden
29	Hochwarmfeste Werkstoffe	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke Hochwarmfeste Werkstoffe für künftige Generationen von energieeffizienten und superleisen Strahltriebwerken	Cr, Co, Ti		X		X				X					X		Synopse Superlegierungen (ISI/IZT 2009)
30	Superlegierung	Hochkorrosionsfeste Superlegierungen Superlegierungen für den wirtschaftlichen Einsatz, bspw. in Meerwasserentsalzungsanlagen und submarinen Techniken	Cr, Ti, Ni, Mn, Pd, Zn(o)-Phosphat			X	X				X					X		Synopse Meerwasserentsalzung (ISI/IZT 2009)

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030			Umweltentlastungspotenzial			Hinweise	
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß		Polit. Zielvorgabe
31	Superlegierung	Hochwarmfeste Superlegierungen Steigerung der Arbeitstemperaturen von Triebwerken, Turbinen und Motoren auf über 1500 °C	Ni, Co, Ti, Cr, Keramiken		X			X			X				X			Synopse Hochwarmfeste Superlegierungen (ISI/IZT 2009)
32	Verbrennungsmotoren	HCCI Verbrennungsmotoren Effiziente, emissionsarme Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge	Fe, Al, Mg		X		X				X				X			(UBA: Zukunftsmarkt Synthetische Biokraftstoffe. 2007) EU Verordnung Nr. 443/2009 Zielwert 130g CO2/100 km 2015
33	Piezo-Keramikmotor	Piezo-Antriebsmotoren Längenänderung von Piezokeramiken in einer Wechselspannung wird in eine mechanische Drehbewegung umgesetzt. Neue Generation elektrischer Motoren	Zr, Pb, Ti		X		X					X			X			(Pictures of the Future 2006:64) Potenzielle E- und Materialeinsparung

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030			Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, dissi-	Mittel-groß	Sehr groß	
34	Stahlleichtbau	Leichtbau im Kraftfahrzeugbau Gewichtsreduktion zur Kraftstoffeinsparung durch leichte und lokal hochfeste Materialien	Stahlleichtbau (Tailored Blanks), Stahl-Alu-Hybridleichtbau, Mg-Druckgussteile, Ti, Kunststoffe			X					X				X		Synopse Stahlleichtbau mit Tailored Blanks (ISI/IZT 2009) EU Verordnung Nr. 443/2009 Zielwert 130g CO2/100 km 2015
35	Flugzeugleichtbau	Neue Leichtbauwerkstoffe im Flugzeugbau Neuartige Legierungen zur kostengünstigen Fertigung und Treibstoff einsparung	Al-Mg-Sc, Al-Li, Faserverbundwerkstoffe		X					X					X		Synopse Airframe Leichtbau (ISI/IZT 2009)
36	Fahrzeugbrennstoffzellen	PEM-Brennstoffzellen für Elektrofahrz. Brennstoffzelle als Traktionsstromquelle in Fahrzeugen	Pt		X					X						X	Synopse Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge (ISI/IZT 2009) HT Strategie: 2020 mindestens eine Million Elektrofahrzeuge

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe	
37	Mobile Brennstoffzellen	Brennstoffzellen für mobile Geräte Brennstoffzellen für die Langzeit Stromversorgung von portablen Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik	Pt			X			X			X			X			(Hagelücken 2005:148) Evtl. höhere Energieeffizienz oder Materialeffizienz durch Kombination LiOnen + BZ
38	Stationäre Brennstoffzellen	SOFC-Brennstoffzellen für stationäre Anlagen Erzeugung von Strom und Wärme für Gebäude und Blockheizkraftwerke	Feststoffelektrolyt: Y, Zr, Sc, Ga, Ce, Sm, Gd, Ba Elektrode: La, Sr, Mn, Co, Cr, Ru, La, Ni, Pt		X				X			X				X		Synopse SOFC Brennstoffzellen (ISI/IZT 2009) KWKG
39	OLED	Organische Leuchtdioden OLED Polytronische energieeffiziente organische Leuchtdioden für Beleuchtung und Displays	Kunststoffe, ITO, Ba, Ru, Mg, Ag, Glas		X		X				X					X		(Pictures of the Future 2003:45; Fraunhofer Magazin 2005:18) EU VO 244/2009: Energieeffizienz
40	LED	Weißer LED Herstellung von weißem Licht durch gelbe und blaue Dioden und für Hintergrundbeleuchtung in Liquid Crystal Displays (LCD)	Dioden: GaAs, GaInN, AlInGaP, GaN, ZnSe Elektrode: W		X					X		X				X		Synopse Weiße LED (ISI/IZT 2009) EU VO 244/2009: Energieeffizienz

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030			Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	
41	Thermische Stromgewinnung/Halbleiter	Thermoelektrische Energiewandlung Stromgewinnung aus Wärme mit thermoelektrischen Generatoren	Halbleiter: Te, Sb, Ge, Ag, Bi Drähte: Cu Keramikabdeckplatten	X				X	X			X			X		Synopse Thermoelektrische Generatoren (ISI/IZT 2009)
42	Leistungsfähige Halbleiter	Neue Chipgeneration Leistungsfähige, robuste und schnelle Halbleiter	GaAs, Ge, CdTe			X						X			X		Synopse Hochleistungsmikrochips (ISI/IZT 2009) (Langlebig)
43	Dünnschicht-Solarzelle/Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen Energie- und materialeffiziente Photovoltaik	Halbleiter: Cu, In, Se, Ga, As, Cd, Ge, Si		X				X		X					X	Synopse Dünnschicht-Photovoltaik (ISI/IZT 2009) HT Strategie Umbau E-Versorgung
44	Farbstoffsolarzelle	Farbstoffsolarzellen Technisch einfaches, kostengünstig im Siebdruck herstellbares Solarmodul für die Stromerzeugung	Photovoltaisch aktiver Stoff: Ru auf TiO2 Elektroden: SnO2, ITO, Pt Glas, Ag		X		X					X			X		Synopse Farbstoffsolarzellen (ISI/IZT 2009)

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	
45	Polymer-elektronische Solarzelle	Organische Solarzellen Kostengünstige dünne, flexible polymerelektronische Solarzelle	Kunststoffe, ZnO ₂ , ITO		X		X					X			X		Forschung (Fraunhofer Magazin 2006:8)
46	Varistoren	Varistoren Elektrisches Bauteil zur verzögerungsfreien Ableitung von Überspannungen	ZnO, dotiert mit Bi-, Cr- Mn-Oxiden. Elektroden: Ag			X	X					X			X		(ISI/IZT 2009) Ressourcenschonung durch Schadensabwehr, Lebensdauerproblem bei Consumer Electronic
47	Supraleiter	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter Mit flüssigem Stickstoff kühlbare Supraleiter der zweiten Generation mit hoher Zugfestigkeit für Generatoren, Transformatoren, Elektromotoren und Stromkabel	Y-Ca-Cu-O Bi-Sr-Ca-Cuprat Ti-Ba-Ca-Cuprat Hg-Ba-Ca-Cuprat		X		X				X				X		Synopse Hochtemperatur Supraleiter (ISI/IZT 2009)
48	Stromerzeugung aus Wind	Windkraftanlagen Regenerative Stromerzeugung	Rotorblätter: GfK Korrosionsfeste Bauteile: Stahl, Cr, Ni, Mg Generatoren: NdFeB (Dy, TB, Pr)			X	X					X				X	HT Strategie Umbau E-Versorgung

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe	
49	GUD-Kraftwerke	GUD Kraftwerke Hoch effizientes kombiniertes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk mit elektrischen Wirkungsgraden deutlich über 60 %	Stahl, Ti, Ni, Cr, Co, Keramiken, Re			X	X				X				X			(BWK 2008:32; Pictures of the Future 2007:50)
50	IGCC Kraftwerke	IGCC Kraftwerke Hoch effiziente Integrated Gasification Combined Cycle Kohlekraftwerke mit elektrischen Wirkungsgraden an die 60 %	Stahl, Ti, Ni, Cr, Keramiken, Re		X		X				X				X			(Pictures of the Future 2008:32)
51	Geothermie	Geothermie Kraftwerke	Stahl Bohrer: W	X			X				X				X			Forschung
52	Solarthermisches Kraftwerk	Solarthermische Kraftwerke Konzentration der Sonnenenergie mit Parabolrinnen auf ein Wärmeträgerfluid	Spiegel: Al, Ag		X			X			X				X			Synopse Solarthermische Kraftwerke Forschung (ISI/IZT 2009)
53	Solarthermie	Solarthermie	Gehäuse: Al Absorber: Cu Zukünftig: Kunststoffe		X		X				X				X			

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030			Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	
54	Solarthermische Kühlung	Solarthermische Kühlung	Gehäuse: Al Absorber: Cu Zukünftig: Kunststoffe				X				X				X		(ITAS: Roadmap UT 2020)
55	Wärmereflexion	Sensitive schaltbare Gläser Semitransparente und schaltbare IR-Durchlässigkeit für Verschattung und Wärmeschutz bei Fassaden- und Fensterglas	Wärmereflexion: AgCl Wärmeschutz: In2O3 Elektrode: ITO, WO3		X										X		(ISI/IZT 2009)
56	Wärmedämmung	Superisolation Vakuumisolierende Materialien und Bauteile für die Wärmedämmung von Gebäuden und Geräten	Kernmaterial: SiO2, SiC, PUR, PS, Glasfaser Hülle: Kunststoffe, Al		X		X					X				X	Synopse Vakuumisolation (ISI/IZT 2009) Forschung
57	Wärmedämmung	Aerogele ("Gefrorener Rauch") Hocheffektiver Wärmedämmstoff	SiO2, C, Al2O3, Chrom- und Zinnoxide		X		X				X					X	(ISI/IZT 2009) Forschung
58	Nährstoffrückgewinnung	Nährstoffrückgewinnung in der Abwasserbehandlung P-Rückgewinnung	Korrosionsfeste Stähle Cr, Ni	X			X				X				X		Z.T. Aufschluss über chloridische Röstung oder Säuren, Potenzial: Ersatz von 50 % des für Landwirt. importierten P

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		Hinweise	
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß		Polit. Zielvorgabe
59	Bewässerungstechnologie	Bedarfsgerechte Bewässerungstechnologien precision irrigation	Armaturen: Rotguss: Cu Elektronik/GPS: Si, Cu, Sn		X		X					X				X		(ITAS: Roadmap UT 2020)
60	Wasseraufbereitung	Dezentrale Wasseraufbereitung Kleinräumige, siedlungsbezogene autarke Wasserver- und Abwasserentsorgung	Stahl, Cr, Cu		X		X					X				X		(UBA 2007)
61	Sensoren in der Stofferkennung	Automatische Stofftrennverfahren Mechanisierte Vereinzelung, Erkennung und Trennung von Wert- und Schadstoffen im Hausmüll	IR-Detektoren: Li-TaO3, LiNbO3, Pb3Ge3O11, La, Sc, Nb, Ta		X		X					X				X		(UBA 2007; Berger 2007:79) Zur derzeitigen SdT Verbesserung der Reinheit der Wertstoffe
62	Biokunststoffen	Biokunststoffe aus verholzten Rohstoffen Herstellung von Kunststoffen aus der Lignozellulose von Biomasse	Reaktoren: Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co)		X		X					X				X		(UBA 2007; Berger 2007:155)

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030			Umweltentlastungspotenzial			Hinweise
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß	
63	Bioraffinerien	Bioraffinerien Biochemische und thermochemische Konversion von nachwachsenden Rohstoffen zu Werkstoffen, Energieträgern und Chemikalien in integrierten Standorten	Reaktoren:Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co)		X		X				X					X	HT-Strategie: Nachwachsende Rohstoffe als Alternative zum Öl
64	Fermentation	Fermentative industrielle Ethanol-Gewinnung aus verholzter Biomasse Enzymatischer Aufschluss von Lignozellulose für die Herstellung von Ethanol-Kraftstoff und Chemieprodukten	Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co)		X		X				X					X	(Fialka 2006) HT-Strategie: Nachwachsende Rohstoffe als Alternative zum Öl
65	Korrosionsschutz für Metalle	Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle Substitut für die schwermetallhaltige Eisen- und Zinkphosphatierung zur Herstellung von Konversionsschichten vor der Lackierung	Zr, Ti, F			X	X						X	X			(UMBW 2008) Risiken bei Substituten

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030			Umweltentlastungspotenzial			Hinweise	
				Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, disso-	Mittel-groß	Sehr groß		Polit. Zielvorgabe
66	Reduktion des Straßenlärms	Lärmarme Reifen	Nd			X			X					X			X	EU-Richtlinie 92/23/EWG: Grenzwerte abhängig von Breite u. Nutzung
67	Reduktion von Unterwasserlärm	Technologien zur Reduktion der akustischen Belastungen mariner Ökosysteme (lärmarme Schiffsantriebe, lärmarme Sondierungstechniken)	Rammdämme für WKA Stützen: Stahl (Cr, Ni)	X			X				X				X			(ITAS: Roadmap UT 2020) Forschung, Grenzwerte Rammschall BSH
68	Hybridpolymere	Nanocomposite Maßgeschneiderte organisch-anorganische Hybridpolymere mit anwendungsspezifischen Funktionsgruppen (hydrophob, hydrophil, antimikrobiell etc.)	Si, C		X		X						X		X			(ISI/IZT 2009) Bspw. Einsparung von Reinigungsmittel, Desinfektionsmittel etc.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Tabelle 255: Nach Metallen sortierte Technolgiealiste

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Ag	Antenne	RFID Tags			X		X					X		X		
Ag	OLED	Organische Leuchtdioden OLED		X		X				X						X
Ag	Halbleiter	Thermoelektrische Energiewandlung	X				X	X			X			X		
Ag	Elektroden	Farbstoffsolarzellen		X		X					X			X		
Ag	Elektroden	Varistoren zur Überspannungsableitung			X	X					X			X		
Ag	Spiegel	Solarthermische Kraftwerke		X			X			X				X		
Ag	Wärmereflexion AgCl	Sensitive schaltbare Gläser		X				X			X			X		
Al	Superkondensatoren	Superkondensatoren für Fahrzeuge		X		X					X			X		
Al	Fahrzeuge	Precision Farming			X	X				X					X	
Al	Antenne	RFID Tags			X		X					X			X	
Al	Verbrennungsmotoren	HCCI Verbrennungsmotoren		X		X				X					X	
Al	Stahl-Alu-Hybridleichtbau	Leichtbau im Kraftfahrzeugbau		X			X			X					X	

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Al	Al-Mg-Sc-Leichtbauwerkstoffe	Flugzeugleichtbau		X				X		X					X	
Al	Al-Li Leichtbauwerkstoffe	Flugzeugleichtbau		X				X		X					X	
Al	AlInGaP LED	Weißer LED		X				X			X					X
Al	Spiegel	Solarthermische Kraftwerke		X			X			X				X		
Al	Gehäuse	Solarthermie		X		X				X				X		
Al	Gehäuse	Solarthermische Kühlung		X		X				X				X		
Al	Hülle	Wärmedämmung: Superisolation		X		X					X				X	
Al	Gelmaterial Al2O3	Wärmedämmung: Aerogele		X		X				X					X	
Al	Struktur	3-D Drucker	X			X				X				X		
As	GaAs LED	Weißer LED		X				X			X					X
As	Halbleitermaterial: GaAs	Neue Chipgeneration			X			X				X		X		
As	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen		X				X			X					X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Au	Au-kat. Spal. v. FS-estern	Kat. in der biochem. Konversion NawaRo		X			X				X				X	
Au	Ox. v. FS an Au Bimetallkat.	Kat. in der biochem. Konversion NawaRo		X			X				X				X	
Ba	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Ba	OLED	Organische Leuchtdioden OLED		X		X				X						X
Ba	Material: TI-Ba-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Ba	Material: Hg-Ba-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Bi	Halbleiter	Thermoelektrische Energiewandlung	X				X	X			X			X		
Bi	Dotierung mit Bi-Oxiden	Varistoren zur Überspannungsableitung			X	X					X			X		
Bi	Material: Bi-Sr-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Cd	Halbleitermaterial: CdTe	Neue Chipgeneration			X				X			X		X		
Cd	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen		X				X			X					X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Ce	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Co	Metallhydrid-Speicher	Wasserstoffspeicher		X					X	X					X	
Co	Li-Ionen Batterie	Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher		X			X			X						X
Co	Katalysator	Biomass to Liquid (BtL)		X				X		X						X
Co	Hochwarmfeste WS	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke		X		X				X				X		
Co	Superlegierung	Hochwarmfeste Superlegierungen		X			X			X				X		
Co	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Co	Werkstoff	GUD Kraftwerke			X	X				X				X		
Co	Rostfreier Stahl	Biokunststoffe aus verholzten Rohstoffen		X		X				X				X		
Co	Rostfreier Stahl	Bioraffinerien		X		X				X						X
Co	Rostfreier Stahl	Fermentative industrielle Ethanol-Gewinnung aus verholzter Biomasse		X		X				X						X
Cr	Behälter	Biokatalyse in der Bionik	X			X				X					X	
Cr	Bergbautechnik	Landfills Mining		X		X				X				X		

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Cr	Bergbautechnik	Urban Mining		X		X				X					X	
Cr	Hochwarmfeste WS	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke		X		X				X				X		
Cr	Superlegierung	Hochkorrosionsfeste Superlegierungen			X	X				X				X		
Cr	Superlegierung	Hochwarmfeste Superlegierungen		X			X			X				X		
Cr	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Cr	Dotierung mit Cr-Oxiden	Varistoren zur Überspannungsableitung			X	X					X			X		
Cr	Korrosionsfeste Bauteile	Windkraftanlagen			X	X					X					X
Cr	Werkstoff	GUD Kraftwerke			X	X				X				X		
Cr	Werkstoffe	IGCC Kraftwerke		X		X				X				X		
Cr	Gelmaterial Cr- + Zn-oxide	Wärmedämmung: Aerogele		X		X				X					X	
Cr	Werkstoff	Dezentrale Wasseraufbereitung		X		X				X				X		
Cr	Rostfreier Stahl	Biokunststoffe aus verholzten Rohstoffen		X		X				X				X		
Cr	Rostfreier Stahl	Bioraffinerien		X		X				X						X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Cr	Rostfreier Stahl	Fermentative industrielle Ethanol-Gewinnung aus verholzter Biomasse		X		X				X						X
Cr	Korrosionsfeste Stähle	Nährstoffrückgewinnung (P Rückgewinnung aus Abwässern)	X			X				X				X		
Cr	Elektronik (GPS, MSR)	Bewässerungstechnologie (Precision irrigation)		X		X					X			X		
Cr	Korrosionsfeste Stähle	Lärmarme marine Technologien	X			X					X			X		
Cu	Spulen, Rotor	Ultraeffiziente E-Motoren für ind. Anwend.			X		X			X						X
Cu	Behälter	Biokatalyse in der Bionik	X			X				X					X	
Cu	Fahrzeugelektronik	Hybridelektrische Kraftfahrzeuge		X					X		X				X	
Cu	Simulationselektronik	Virtuelle Präzisionssimulation		X				X			X			X		
Cu	Fertigungselektronik	3-D Drucker	X			X				X				X		
Cu	Roboterelektronik	Service Robotik	X			X					X			X		
Cu	Elektronik	Intelligente Haustechnik		X		X				X				X		

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Cu	Kabel	Intelligente Haustechnik		X		X				X				X		
Cu	Elektronik	Precision Farming			X	X				X					X	
Cu	Elektronik	Adaptronik	X			X					X			X		
Cu	Antenne	RFID Tags			X		X					X		X		
Cu	Kabel	Thermoelektrische Energiewandlung	X				X	X			X			X		
Cu	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen		X				X			X					X
Cu	Material: Y-Ca-Cu-O	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Cu	Material: Bi-Sr-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Cu	Material: Tl-Ba-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Cu	Material: Hg-Ba-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Cu	Absorber	Solarthermie		X		X				X				X		
Cu	Absorber	Solarthermische Kühlung		X		X				X				X		
Cu	Werkstoff	Dezentrale Wasseraufbereitung		X		X				X				X		

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Cu	Elektronik	Smart Grids	X			X				X					X	
Cu	Elektronik	Green IT	X			X				X					X	
Cu	Elektronik (GPS, MSR)	Schonende Bodenbearbeitung (Conservation tillage)		X		X				X				X		
Dy	Permanentmagnete	Elektrische Traktionsmotoren für Fhzgene		X					X		X				X	
Dy	Generatoren	Windkraftanlagen			X	X					X				X	
F	Korrosionsschutzmittel	Schwermetallfreier Korrosionsschutz			X	X						X	X			
Fe	Verbrennungsmotoren	HCCI Verbrennungsmotoren		X		X				X			X			
Fe	Rostfreier Stahl	Biokunststoffe aus verholzten Rohstoffen		X		X				X			X			
Fe	Rostfreier Stahl	Bioraffinerien		X		X				X					X	
Fe	Rostfreier Stahl	Fermentative industrielle Ethanol-Gewinnung aus verholzter Biomasse		X		X				X					X	
Ga	Sensoren und Aktoren: GaPO4	Adaptronik	X			X					X		X			
Ga	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X				X	

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Ga	GaAs LED	Weißer LED	X					X		X					X	
Ga	GaInN LED	Weißer LED	X					X		X					X	
Ga	AllInGaP LED	Weißer LED	X					X		X					X	
Ga	GaN LED	Weißer LED	X					X		X					X	
Ga	Halbleitermaterial:GaAs	Neue Chipgeneration			X			X			X		X			
Ga	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen	X					X		X					X	
Gd	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen	X					X		X					X	
Ge	IR-Sensoren: Pb3Ge3011	Sensoren in der Gebäudetechnik	X					X			X		X			
Ge	Halbleiter	Thermoelektrische Energiewandlung	X				X	X		X			X			
Ge	Halbleitermaterial	Neue Chipgeneration			X			X			X		X			
Ge	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen	X					X		X					X	
Ge	IR-Detektoren: Pb3Ge3011	Automatische Stofftrennverfahren	X			X				X			X			

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Hg	Material; Hg-Ba-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter	X			X				X				X		
In	Großdisplays	Virtuelle Präzisionssimulation	X					X			X			X		
In	Elektrode ITO	Transparentes Elektrodenmaterial			X			X			X			X		
In	GaInN LED	Weißer LED	X						X		X					X
In	AllInGaP LED	Weißer LED	X						X		X					X
In	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen	X					X			X					X
In	Elektrode: ITO	Farbstoffsolarzellen	X			X					X			X		
In	Elektrode: ITO	Organische Solarzellen	X			X					X			X		
In	Wärmeschutz: In2O3	Sensitive schaltbare Gläser	X					X			X			X		
In	Elektrode: ITO	Sensitive schaltbare Gläser	X					X			X			X		
La	Metallhydrid-Speicher	Wasserstoffspeicher	X						X	X					X	
La	IR-Sensoren	Sensoren in der Gebäudetechnik	X						X			X		X		
La	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen	X					X			X					X
La	IR-Detektoren	Automatische Stofftrennverfahren	X			X				X				X		

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Li	Li-Ionen Batterie	Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher	X				X			X						X
Li	Al-Li Leichtbauwerkstoffe	Flugzeugleichtbau	X					X		X				X		
LiTaO3	IR-Sensoren	Sensoren in der Gebäudetechnik	X						X			X		X		
Mg	Verbrennungsmotoren	HCCI Verbrennungsmotoren	X			X				X				X		
Mg	Mg-Druckgussteile	Leichtbau im Kraftfahrzeugbau			X					X				X		
Mg	Al-Mg-Sc-Leichtbauwerks	Flugzeugleichtbau	X					X		X				X		
Mg	OLED	Organische Leuchtdioden OLED	X			X				X						X
Mg	Korrosionsfeste Bauteile	Windkraftanlagen			X	X					X					X
Mn	Li-Ionen Batterie	Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher	X				X			X						X
Mn	Superlegierung	Hochkorrosionsfeste Superlegierungen			X	X				X				X		
Mn	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen	X					X			X					X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Mn	Dotierung mit Mn-Oxiden	Varistoren zur Überspannungsableitung			X	X					X			X		
Nb	Sensoren und Aktoren: LiNbO3	Adaptronik	X			X					X			X		
Nb	IR-Sensoren: LiNbO3	Sensoren in der Gebäudetechnik		X					X			X		X		
Nb	IR-Sensoren	Sensoren in der Gebäudetechnik		X					X			X		X		
Nb	IR-Detektoren: LiNbO3	Automatische Stofftrennverfahren		X		X				X				X		
Nb	IR-Detektoren	Automatische Stofftrennverfahren		X		X				X				X		
Nd	Permanentmagnete	Elektrische Traktionsmotoren für Fhzge.		X					X		X					X
Nd	Magnete	Ultraeffiziente E-Motoren für ind. Anwend			X		X			X						X
Nd	Metallhydrid-Speicher	Wasserstoffspeicher		X					X	X					X	
Nd	Generatoren	Windkraftanlagen			X	X					X					X
Nd	Katalysator	Lärmarme Reifen			X			X				X				X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Ni	Metallhydrid-Speicher	Wasserstoffspeicher		X					X	X					X	
Ni	Li-Ionen Batterie	Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher		X			X			X						X
Ni	Bergbautechnik	Landfills Mining		X		X				X				X		
Ni	Bergbautechnik	Urban Mining		X		X				X					X	
Ni	Superlegierung	Hochkorrosionsfeste Superlegierungen			X	X				X				X		
Ni	Superlegierung	Hochwarmfeste Superlegierungen		X			X			X				X		
Ni	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Ni	Korrosionsfeste Bauteile:	Windkraftanlagen			X	X					X					X
Ni	Werkstoff	GUD Kraftwerke			X	X				X				X		
Ni	Werkstoffe	IGCC Kraftwerke		X		X				X				X		
Ni	Rostfreier Stahl	Biokunststoffe aus verholzten Rohstoffen		X		X				X				X		
Ni	Rostfreier Stahl	Bioraffinerien		X		X				X						X
Ni	Rostfreier Stahl	Fermentative industrielle Ethanol-Gewinnung aus verholzter Biomasse		X		X				X						X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Ni	Korrosionsfeste Stähle	Nährstoffrückgewinnung (P Rückgewinnung aus Abwässern)	X			X				X				X		
Ni	Elektronik (GPS, MSR)	Bewässerungstechnologie (Precision irrigation)		X		X					X			X		
Ni	Korrosionsfeste Stähle	Lärmarme marine Technologien	X			X					X			X		
Pb	Piezo-Keramikmotor	Elektromotoren		X		X					X			X		
Pb	IR-Detektoren: Pb3Ge3011	Automatische Stofftrennverfahren		X		X				X				X		
Pd	Oxydations-Katalysator:	Hocheffiziente Abgasreinigungs. f. Dieself.			X		X			X						X
Pd	Katalysator	Biomass to Liquid (BtL)		X				X		X						X
Pd	Superlegierung	Hochkorrosionsfeste Superlegierungen			X	X				X				X		
Pr	Permanentmagnete	Elektrische Traktionsmotoren für Fahrz.		X					X		X					X
Pr	Generatoren	Windkraftanlagen			X	X					X					X
Pt	Katalysator	Biomass to Liquid (BtL)		X				X		X						X
Pt	Katalysator	PEM-Brennstoffzellen für Fahrzeuge		X				X		X						X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Pt	Katalysator	Brennstoffzellen für mobile Geräte			X			X			X			X		
Pt	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Pt	Elektroden	Farbstoffsolarzellen		X		X					X			X		
Pt	Oxydations-Katalysator	Hocheffiziente Abgasreinigsys. f. Dieself.			X		X			X						X
Re	Katalysator	Biomass to Liquid (BtL)		X				X		X						X
Re	Werkstoff	GUD Kraftwerke			X	X				X				X		
Re	Werkstoffe	IGCC Kraftwerke		X		X				X				X		
Rh	Katalysator	Biomass to Liquid (BtL)		X				X		X						X
Ru	Kat z. B. 98 % Co + 2 % Ru	Biomass to Liquid (BtL)		X				X		X						X
Ru	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Ru	OLED	Organische Leuchtdioden OLED		X		X				X						X
Ru	Aktiver Stoff: Ru auf TiO2	Farbstoffsolarzellen		X		X					X			X		
Sb	Elektrode (ATO)	Transparentes Elektrodenmaterial			X			X			X			X		
Sb	Halbleiter	Thermoelektrische Energiewandlung	X				X	X			X			X		

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Sc	IR-Sensoren	Sensoren in der Gebäudetechnik		X					X			X				
Sc	Al-Mg-Sc-Leichtbauwerkstoff	Flugzeugleichtbau		X						X				X		
Sc	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen		X							X					X
Sc	IR-Detektoren	Automatische Stofftrennverfahren		X		X				X				X		
Se	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen		X							X					X
Si	Fahrzeugelektronik	Hybridelektrische Kraftfahrzeuge		X							X				X	
Si	Simulations-elektronik	Virtuelle Präzisionssimulation		X							X			X		
Si	Fertigungselektronik	3-D Drucker	X			X				X				X		
Si	Roboterelektronik	Service Roboter	X			X					X			X		
Si	Elektronik	Intelligente Haustechnik		X		X				X				X		
Si	Elektronik	Precision Farming			X	X				X					X	
Si	Elektronik	Adaptronik	X			X					X			X		

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Si	Chip	RFID Tags			X		X					X		X		
Si	Halbleiter	Dünnschicht-Solarzellen		X				X				X				X
Si	Kernmaterial: SiO2	Wärmedämmung: Superisolation		X		X						X			X	
Si	Kernmaterial: SiC	Wärmedämmung: Superisolation		X		X						X			X	
Si	Gelmaterial SiO2	Wärmedämmung: Aerogele		X		X				X					X	
Si	Hybridpolymere	Nanocomposite		X		X						X			X	
Si	Elektronik	Smart Grids	X			X				X						X
Si	Elektronik	Green IT	X			X				X						X
Si	Elektronik (GPS, MSR)	Schonende Bodenbearbeitung (Conservation tillage)		X		X				X					X	
Si (SiO2, Quarz)	Sensoren und Aktoren	Adaptronik	X			X						X		X		
Sm	Permanentmagnete	Elektrische Traktionsmotoren für Fhzgene		X					X			X				X
Sm	Magnete	Ultraeffiziente E-Motoren für ind. Anwend.			X		X			X						X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Sm	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Sn	Fahrzeugelektronik	Hybridelektrische Kraftfahrzeuge		X					X		X				X	
Sn	Simulationselektronik	Virtuelle Präzisionssimulation		X				X			X			X		
Sn	Fertigungselektronik	3-D Drucker	X			X				X				X		
Sn	Roboter Elektronik	Service Roboter	X			X					X			X		
Sn	Elektronik	Intelligente Haustechnik		X		X				X				X		
Sn	Elektronik	Precision Farming			X	X				X					X	
Sn	Elektronik	Adaptronik	X			X					X			X		
Sn	Elektrode: SnO ₂	Transparentes Elektrodenmaterial			X			X			X			X		
Sn	Elektrode: SnO ₂	Farbstoffsolarzellen		X		X					X			X		
Sn	Elektrode: ITO	Organische Solarzellen		X		X					X				X	
Sn	Elektronik	Smart Grids	X			X				X						X
Sn	Elektronik	Green IT	X			X				X						X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Sn	Elektronik (GPS, MSR)	Schonende Bodenbearbeitung (Conservation tillage)		X		X				X					X	
Sn	Elektronik (GPS, MSR)	Bewässerungstechnologie (Precision irrigation)		X		X					X			X		
Sr	Elektrode	SOFC-Brennstoffzellen		X				X			X					X
Sr	Material: Bi-Sr-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
Stahl	Behälter	Biokatalyse in der Bionik	X			X				X					X	
Stahl	Struktur	Redox-Flow-Elektrizitätsspeicher		X			X			X						X
Stahl	Struktur	3-D Drucker	X			X				X				X		
Stahl	Struktur	Service Roboter	X			X					X			X		
Stahl	Fahrzeuge	Precision Farming			X	X				X					X	
Stahl	Reaktorwerkstoff	Biomass to Liquid (BtL)		X				X		X						X
Stahl	Bergbautechnik	Landfills Mining		X		X				X				X		
Stahl	Bergbautechnik	Urban Mining		X		X				X					X	
Stahl	Korrosionsfeste Bauteile	Windkraftanlagen			X	X					X					X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schränkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Stahl	Werkstoff	GUD Kraftwerke			X	X				X				X		
Stahl	Werkstoffe	IGCC Kraftwerke		X		X				X				X		
Stahl	Werkstoffe	Geothermie	X			X				X				X		
Stahl	Werkstoff	Dezentrale Wasseraufbereitung		X		X				X				X		
Ta	Superkondensatoren	Superkondensatoren für Fahrzeuge		X		X					X			X		
Ta	IR-Sensoren	Sensoren in der Gebäudetechnik		X					X			X		X		
Ta	IR-Detektoren: LiTaO3	Automatische Stofftrennverfahren		X		X				X				X		
Ta	IR-Detektoren	Automatische Stofftrennverfahren		X		X				X				X		
Tb	Permanentmagnete	Elektrische Traktionsmotoren für Fhzge		X					X		X					X
Tb	Generatoren	Windkraftanlagen			X	X					X					X
Te	Halbleiter	Thermoelektrische Energiewandlung	X				X	X			X			X		
Te	Halbleitermaterial: CdTe	Neue Chipgeneration			X				X			X		X		
Ti	Superkondensatoren	Superkondensatoren für Fahrzeuge		X		X					X			X		

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
Ti	Sensoren und Aktoren: Ba-TiO3	Adaptronik	X			X					X			X		
Ti	Hochwarmfeste WS	Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke		X		X				X				X		
Ti	Superlegierung	Hochkorrosionsfeste Superlegierungen			X	X				X				X		
Ti	Superlegierung	Hochwarmfeste Superlegierungen		X			X			X				X		
Ti	Piezo-Keramik-motor	Elektromotoren		X		X					X			X		
Ti	Leichtbauwerkstoffe	Leichtbau im Kraftfahrzeugbau			X					X				X		
Ti	Werkstoff	GUD Kraftwerke			X	X				X				X		
Ti	Werkstoffe	IGCC Kraftwerke		X		X				X				X		
Ti	Korrosionsschutzmittel	Schwermetallfreier Korrosionsschutz			X	X						X		X		
Ti	Material: Ti-Ba-Ca-Cuprat	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter		X		X				X				X		
V	SCR	Hocheffiziente Abgasreinigsys. f. Dieself.			X		X			X						X
V	Elektolyt	Redox-Flow-Elektrizitätsspeicher		X			X			X						X

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial		
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe
W	SCR	Hocheffiziente Abgasreinigsys. f. Dieself.			X		X			X					X	
W	Elektrode	Weißer LED	X						X			X			X	
W	Elektrode WO3	Sensitive schaltbare Gläser											X			
Y	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen	X					X			X				X	
Y	Material: Y-Ca-Cu-O	Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter	X			X				X			X			
Zn	Superlegierung Zn-(o)-Phosphat	Hochkorrosionsfeste Superlegierungen			X	X				X			X			
Zn	Elektrode:ZnO2	Organische Solarzellen	X			X					X		X			
Zn	Varistormaterial ZnO	Varistoren zur Überspannungsableitung			X	X					X		X			
Zn	Gelmaterial Cr- + Zn-oxide	Wärmedämmung: Aerogele	X			X				X				X		
Zn	LED: ZnSe	Weißer LED			X				X			X			X	
Zr	Piezo-Keramikmotor	Elektromotoren	X			X					X		X			
Zr	Feststoffelektrolyt	SOFC-Brennstoffzellen	X					X			X				X	

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Rohstoffe und Werkstoffe	Komponenten	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030				Recyclingpotenzial 2030				Umweltentlastungspotenzial			
			Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Sehr sensitiv	Ja	Einge-schänkt	Nein	Nein, dis-	Mittel-groß	Sehr groß	Polit. Zielvorgabe	
Zr	Korrosionsschutzmittel	Schwermetallfreier Korrosionsschutz			X	X							X	X			

Ergänzender Hinweis: Als Zusatzinformation bzw. für Folgeprojekte und der Vollständigkeit halber sind auch Metalle in der Tabelle enthalten, die von der Untersuchung ausgeschlossen wurden, wie beispielsweise Aluminium oder Arsen.

9.1 Daten zum Indikator Umweltrisiko

Die realen Umweltbelastungen aus der Rohstoffgewinnung sind u. a. von der Einhaltung von Umweltschutzstandards abhängig. Entspricht der Umgang mit gefährlichen Stoffen bspw. dem Stand der Technik, ist das Umweltbelastungsrisiko gering, eine Kontamination durch einen Unfall jedoch nicht ausgeschlossen. Jedoch wird ein großer Teil der weltweit geförderten Rohstoffe unter Missachtung von Umwelt-, Sozial- und Sicherheitsstandards gewonnen. Aber auch bei Einhaltung derartiger Standards bei Abbau und Verhüttung sind negative Auswirkungen auf die biologische Vielfalt, die Freisetzung von Klimagasen, die Mobilisierung von geogenen toxischen und versauernden Stoffen, sowie die massive Beeinflussung des lokalen Wasserhaushalts zwar reduzierbar, aber aufgrund der Größenordnung des Eingriffes in die Natur nahezu unvermeidbar (SRU, 2012).

Die Umweltbelastungen durch Bergbau sind weltweit gravierend: So sind im Bericht des Blacksmith Institutes zu den zehn „The World's Worst Polluted Places“ vier Minenstandorte genannt (Blacksmith Institute, 2007).

Minenstandorte unter den zehn „The World's Worst Polluted Places“

Ort	Schadstoff	Aktivität
Sukinda, Indien	Sechswertiges Chrom	Chromit Minen
La Oroya, Peru	Blei und andere Schwermetalle	Bergbau und Metallherstellung
Norilsk, Russland	Schwermetalle, Feinstaub	Bergbau und Schmelzen
Kabwe, Sambia	Blei	Bergbau und Schmelzen

Im aktuellen Bericht des Blacksmith Institutes „The Top Ten Worst Toxic Pollution Problems“ (Blacksmith Institute, 2011) werden die weltweit 20 größten Umweltprobleme durch toxische Belastung genannt. Davon sind acht dem Bergbau- und Hüttensektor zuzuordnen:

- Artisanaler Goldbergbau (Freisetzung von Quecksilber aus Amalgamierungsverfahren)
- Bleischmelze (Freisetzung von Blei)
- Bergbau und Erzaufbereitung (Freisetzung von Quecksilber)
- Bergbau und Erzaufbereitung (Freisetzung von Blei)
- Bergbau und Erzaufbereitung (Freisetzung von Arsen)
- Bergbau und Erzaufbereitung (Freisetzung von Cadmium)
- Bergbau und Erzaufbereitung (Freisetzung von Zyanid)
- Uranbergbau und Erzaufbereitung (Freisetzung von Radionukliden)

9.1.1 Erzgehalte

Hinzu kommt, dass zumindest regional die Konzentration mancher Metalle im Erz abnimmt. Das bedeutet pro Tonne Metall mehr Bergematerial (taubes Nebengestein, engl. waste rock), Aufbereitungsrückstände (engl. tailings), ein höherer Energiebedarf sowie ein erhöhter Bedarf an Chemikalien und Wasser. Diesen Zusammenhang konnte der australische Forscher Mudd in mehreren Arbeiten für australische Minen empirisch nachweisen (Mudd, 2012). Allerdings besteht Forschungsbedarf bei der Frage, inwieweit die Entwicklung abnehmender Erzgehalte ein Indiz für

eine Erschöpfung der Lagerstätten ist und generell mit einer Zunahme der Umweltbelastungen verbunden ist. In Tabelle A-2 sind zu verschiedenen Metallen einschlägige Studien aufgeführt; in einigen von ihnen wird in Analogie zum Peak-Öl von einem Peak-Minerals gesprochen. Dies betrifft Au, Cu, Ni, PGM, Zn, Pb, Co. Es gibt aber auch andere Autoren, die daraufhin weisen, dass es eine Tendenz bei den Minenbetreibern gibt, Minen mit geringeren Erzgehalten länger weiter zu betreiben als in der Vergangenheit (Crowson, 2012).

9.1.2 Radioaktivität

Seltene Erden sind oft in ihren Lagerstätten mit Thorium und Uran vergesellschaftet, was bei Einhaltung international anerkannter Umwelt- und Sicherheitsstandards einen ökonomischen Abbau zum Teil unmöglich macht.

9.1.3 Chemikalieneinsatz

Bei einem Interview mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde auch das Thema des Einsatzes besonders umweltschädlicher Chemikalien im Bergbau angesprochen. Dabei wies die BGR daraufhin, dass der Einsatz von beispielsweise Flotationsmitteln bei fast allen Metallen erfolgt. Zum Teil sind zum Aufschluss der Mineralien besonders harte Bedingungen nötig, die einen besonderen Einsatz von Chemikalien nötig machen, etwa bei:

- Au (CN, Hg),
- Al/Ga (NaOH, Rotschlamm),
- W (Sodaschmelze oder NaOH unter Druck), sowie
- Ta/Nb (HF).

Dennoch gibt es aber auch „grünes Gold“ ohne Chemikalieneinsatz, etwa bei der Gewinnung von Rheingold im Rahmen des Kiesabbaus (Elsner, 2009). Die Umweltstandards können laut BGR auch im Kleinbergbau realisiert werden, doch operieren diese Minen häufig illegal, so dass keine Rücksicht auf Arbeits- oder Umweltstandards genommen wird.

Übersicht über einschlägige Studien zur Verringerung von Erzgehalten (nicht vollständig)

Metalle	Zusammenfassung (englisch)	Region	Literatur
Au	Long-term gold production trends include declining ore grades and increasing solid wastes (tailings, waste rock) and open cut mining; issues include water, energy and chemical consumption and pollutant emissions— ‘resource intensity’; judgement of the sustainability of gold mining must take account of the sensitivity of the ore grade in gold production. This has implications for environmental policy and sustainability reporting in the gold mining sector.	Australia, North America, Africa, Asia-Pacific	Mudd, G.M. (2007): "Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability?" Resources Policy 32, 42–56

Metalle	Zusammenfassung (englisch)	Region	Literatur
Au,Pt (mines)	Preliminary compilation and analysis of the water reported to have been consumed by a range of various mineral commodities and compares it to mine production data; some mines have made substantive improvements in reducing water; the embodied water of minerals is clearly significant, and will likely gradually increase in the future.	Australia and America	Mudd, G.M. (2008): "Sustainability Reporting and Water Resources: a Preliminary Assessment of Embodied Water and Sustainable Mining". Mine Water & the Environment, 27 (3), 136-144
Cu	Results indicate that the exergy decrease was 65.4 Mtoe, while the exergy replacement cost 889.9 Mtoe; the US extracted the equivalent of 2.5 and 1.2 times of its current national exergy reserves and base reserve of copper.	US	Valero, A. (2008): "Evolution of the decrease in mineral exergy throughout the 20th century. The case of copper in the US". Energy 33, 107-115
Cu	In summary, the observed decline in the average yield of copper ore milled has come from a combination of the exhaustion of other types of copper deposits with higher average grades than porphyry coppers and from the tendency for head grades to fall towards a deposit's ore grade as mining proceeds. African and Australian average grades are higher than the global average, changes in the share of Central Africa in global output have affected the global average grade; The relationship may be affected by movements in metal prices: many ores contain other valuable metals besides copper, copper yields will sometimes be subordinated to the extraction of these other metals.	World	Phillip Crowson (2012): Some observations on copper yields and ore grades. Resources Policy 37 (2012) 59-72
Cu	Equality principle can be applied to traditional mining activities as waste management of natural resources. A cost structure should improve the exploitation of the natural resources and save energy-> cost benefit analysis; the model for Efficient Use of Resources for Optimal Production Economy (EUROPE); optimize the mining slope and the ore-concentration when utilizing there sources of the rock and provide management	Sweden	Stenis, J., Hogland, W. (2011): "Optimization of mining by application of the equality principle". Resources Policy 36, 285-292

Metalle	Zusammenfassung (englisch)	Region	Literatur
Ni	Critical 'mega-trends' in the Ni industry; economic Ni resources are found in either sulfide or laterite-type ores; the majority is contained in laterite ores; future demand for Ni, there is an increasing amount of Ni being mined from laterite ores—leading to increasing energy and greenhouse gas emission costs for Ni production; paper investigated and synthesized a wide range of historical data on trends in Ni mining, placing these in context with environmental issues and the sustainability of Ni production.	The Sudbury Basin and Thompson fields in Canada and the Kambalda field in Australia and the Taimyr and Kola Peninsulas in Russia	Mudd, G.M. (2010): "Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites". <i>Ore Geology Reviews</i> 38, 9–26
Pt	Recent ore grades for major PGM companies are shown in Fig. 4, showing a gradual decline for all plotted, especially Anglo Platinum. Based on current economic resources (Table 4), it can be expected that ore grades will stabilise and remain in the range of 3–5 g/t for most companies (assuming that current mining techniques and the primary focus on Merensky-UG2 ore continues)	South Africa, Russia, Zimbabwe, Canada, US	B.J. Glaister, G.M. Mudd / <i>Minerals Engineering</i> 23 (2010) 438–450
Zn	For Australia, the ore grades are dominated by large fields such as Broken Hill, Mt Isa and Rosebery, and more recently by Century Zinc, Cannington, Golden Grove and McArthur River. The obvious trend is a long-term decline in lead grade, plus a lesser decline in zinc grade. In Canada, lead production has historically been dominated by a small number of major fields and mines, such as the Kimberley-Sullivan field of British Columbia, Brunswick and Heathe-Newcastle in New Brunswick, Faro and Keno-Elsa in Yukon, Polaris, Baffin Island and Pine Point in the Northwest Territories, and a range of minor producers such as copper-zinc mines and districts (especially in Quebec and Manitoba). A decline in the ore concentration is not visible.	Australia, Canada, US	G. M. Mudd, Monash University, September (2010): <i>The Arrival of Peak Lead: Peak Environmental Impacts?</i> www.lead.org.au/
Cu, Ni, Au, Zn, Pb, Ag, Fe, Bauxit, Mn, Diamonds (C)	Study on historical trends in Australian mining, including ore milled, ore grades, open cut versus underground mining, overburden/waste rock and economic resources range of fundamental data and issues which help towards quantifying their source and environmental sustainability of mining	Australia	Mudd, G.M. (2010): "The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints". <i>Resources Policy</i> 35, 98–115

Metalle	Zusammenfassung (englisch)	Region	Literatur
Ni, Co, Pb, Zn, Au	The peak minerals metaphor describes a paradigm that parallels most of Australia's mineral production: from easy and cheap in the industry's infancy, changing to harder and more expensive now and into the future.	Australia	Prior, T., et al. (2011): Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. Global Environ. Change, article in press doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009
Minerals	The benefits and impacts of mineral resource extraction and processing in Australia are changing; Australia's largest export industry, mining brings financial benefits to the nation, extraction and production are becoming more challenging; Minerals processing faces higher energy costs and is becoming more energy intensive despite technological improvements.	Australia	Giurco, D. et al.(2010): "Peak Minerals in Australia: A review of changing impacts and benefits". Cluster research report 1.2 for CSIRO Minerals Down Under Flagship
Pb	Lead mining is amongst one of the oldest sectors of the global mining industry; lead is a non-renewable and finite resource, there are always concerns that we may eventually run out of remaining lead deposits to mine.	China, Australia, US, Canada, Mexico, Peru	Mudd, G.M. (2010): "The Arrival of Peak Lead: Peak Environmental Impacts?" www.lead.org.au/
PGM	Growing popularity of platinum group metals; discussing the costs in terms of energy, pollution, greenhouse gas emissions, water, land use impacts, social impacts, economic aspects associated with this globally important industry	South Africa, Russia, Zimbabwe, Canada, US	Glaister, B.J. (2010): "The environmental costs of platinum-PGM mining and sustainability: Is the glass half-full or half-empty?" Minerals Engineering 23, 438-450

9.2 Berechnung der Wirtschaftlichen Bedeutung

Gewichtung	Wirtschaftliche Bedeutung											Summe wirtschaftliche Bedeutung 100%	
	Produktion	Anteil DE am Weltverbrauch	Anteil DE am Weltverbrauch	Änderung Anteil DE an WE (2004-2008)	Änderung der Importe DE (2004-2008)	Zukunftstechnologien mit Umweltentlastungspotenzial	Preise 2001	Preise 2010	Preissteigerung (2001-2010)	Substituierbarkeit	Zukunfts-technologien (Globaler Nachfrageimpuls)		Zukunfts-technologien (Globaler Nachfrageimpuls)
Einheit	t	-	-	-	-	-	US-D/kg	US-D/kg	%	-	-	-	
1 Antimon	197.000	0,085	0,70	0,33	0,09	0,59	1,4	8	471	0,64	unkritisch	0	0,48
2 Beryllium	141	0,001	0,00	2,00	0,50	0	152	506	233	0,79	sensitiv	0,7	0,37
3 Cobalt	75.900	0,045	0,30	0,34	0,21	0,43	23,3	32,2	38	0,90	intensiv	0,3	0,48
4 Gallium	78	0,200	1,00	1,00	0,10	0,68	650	670	3	0,74	sehr sensitiv	1	0,86
5 Germanium	138	0,200	1,00	0,24	0,18	0,61	900	950	6	0,80	sehr sensitiv	1	0,85
6 Gold	2450	0,040	0,30	-0,01	3,95	0,58	8.500	52.350	516	0,74	intensiv	0,3	0,48
7 Indium	570	0,030	0,3	0,1	0,103	0,58	120	550	358	0,90	sehr sensitiv	1	0,70
8 Kupfer	15.900.000	0,088	0,70	0,16	0,17	0,36	1,8	7,5	317	0,56	intensiv	0,3	0,48
9 Mangan	10.800.000	0,021	0,30	-0,06	-0,07	0,5	0,529	3,3	524	1,00	unkritisch	0	0,45
10 Molybdän	200.000	0,061	0,70	-0,08	0,00	0	5,2	34,83	570	0,71	unkritisch	0	0,35
11 Nickel	1.480.000	0,063	0,70	-0,07	-0,05	0,38	5,9	19,5	231	0,90	intensiv	0,3	0,57
12 Niob	62.900	0,079	0,70	0,14	0,10	0,45	19,7	42	113	0,70	unkritisch	0	0,46
13 Palladium	220	0,110	1,00	0,16	3,21	0,53	12.000	21.700	81	0,75	intensiv	0,3	0,65
14 Platin	445	0,064	0,70	-0,78	0,33	0,57	19.800	55034	178	0,75	sensitiv	0,7	0,68
15 Rhenium	46	0,097	0,70	0,83	0,79	0,39	950	2300	142	0,84	sensitiv	0,7	0,66
16 Rhodium	25	0,069	0,70	0,53	-0,13	0,55	51.441	74910	46	0,75	sensitiv	0,7	0,68
17 Seltene Erden	133.000	0,040	0,30	0,51	0,49	0,63	6	50	733	0,87	sehr sensitiv	1	0,70
18 Silber	21800	0,105	1,00	0,81	0,25	0,48	140	552	294	0,71	intensiv	0,3	0,62
19 Tantal	1160	0,073	0,70	0,00	-0,08	0,41	73,1	400	447	0,40	intensiv	0,3	0,45
20 Titan	7.035.000	0,105	1,00	0,21	0,36	0,36	7,8	13,9	78	0,32	unkritisch	0	0,42
21 Wolfram	68.000	0,157	1,00	0,12	0,53	0,53	65	250	285	0,77	intensiv	0,3	0,65
22 Zink	12.050.000	0,066	0,70	-0,02	-0,03	0,53	0,97	2,28	135	0,30	unkritisch	0	0,38
23 Zinn	260.000	0,100	1,00	-0,02	0,04	0,39	6,94	26,1	276	0,82	intensiv	0,3	0,63
Bezugsjahr	2010	2008				2009	2011	2011	2011	2008	2008	2008	
Literatur	IZT	IZT				EU	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	

(rot markierte Metalle = vom UBA zur Prüfung benannt)

9.3 Berechnung des Versorgungsrisikos

Gewichtung	Versorgungsrisiko												Summe Versorgungsrisiko	
	Länderkonzentration der Reserven	Länderisiko globale Produktion	Firmenkonzentration der glob. Produktion	Neben-/Hauptprodukte	Neben-/Hauptprodukte	Recyclingfähigkeit	Recyclingquote heute	Recyclingquote heute	Umweltrelevanz (spez. KEA)	Umweltrelevanz (KEA)	Umweltrelevanz (KEA)			
	15%	10%	10%		15%	15%	5%		MJ/t	TJ	30%	100%		
Einheit	-	-	-	-	-	-	%	-	MJ/t	TJ	-			
1 Antimon	0,74	0,76	0,51	überw. HP	0,3	0,67	1-10 %	0,7	50.438	9.936	0,0	0,42	Sb	
2 Beryllium	0,8	0,14	1	überw. HP	0,3	0,78	<1%	1	261.210.200	36.831	0,3	0,54	Be	
3 Cobalt	0,82	0,21	0,16	überw. NP	0,7	0,58	>50%	0	103.009	7.818	0,0	0,35	Co	
4 Gallium	0,58	0,14	0,5	nur NP	1	0,84	<1%	1	2.706.710	211	0,0	0,48	Ga	
5 Germanium	0,46	0,61	0,71	nur NP	1	0,67	<1%	1	50.438	7	0,0	0,50	Ge	
6 Gold	0,46	0,58	0,28	überw. HP	0,3	0,53	>50 %	0	261.210.200	639.965	1,0	0,58	Au	
7 Indium	0,37	0,48	0,56	nur NP	1	0,71	<1%	1	1.981.627	1.130	0,0	0,47	In	
8 Kupfer	0,48	0,08	0,31	überw. HP	0,3	0,34	>50 %	0	50.438	801.964	1,0	0,51	Cu	
9 Mangan	0,66	0,19	0,25	nur HP	0	0,34	>50 %	0	48.016	518.573	1,0	0,49	Mn	
10 Molybdän	0,82	0,35	0,38	nur HP	0	0,6	>50 %	0	148.889	29.778	0,3	0,38	Mo	
11 Nickel	0,56	0,17	0,46	überw. HP	0,3	0,36	>50 %	0	157.771	233.501	0,7	0,46	Ni	
12 Niob	0,68	0,24	0,99	überw. HP	0,3	0,66	>50 %	0	3.355.827	211.082	0,7	0,58	Nb	
13 Palladium	0,99	0,44	0,77	überw. NP	0,7	0,53	>50 %	0	143.552.174	31.581	0,3	0,54	Pd	
14 Platin	0,99	0,26	0,66	überw. HP	0,3	0,53	>50 %	0	213.608.641	95.056	0,3	0,46	Pt	
15 Rhenium	0,8	0,13	0,8	nur NP	1	0,54	>50 %	0	148.889		0,0	0,44	Re	
16 Rhodium	0,99	0,59	0,77	überw. NP	0,7	0,53	>50 %	0	467.871.970	11.697	0,3	0,56	Rh	
17 Seltene Erden	0,69	0,76	0,76	überw. HP	0,3	0,75	<1%	1	1.668.287	221.882	0,7	0,67	SE	
18 Silber	0,46	0,19	0,18	überw. NP	0,7	0,41	>50 %	0	1.668.287	36.369	0,3	0,36	Ag	
19 Tantal	0,73	0,12	0,61	nur HP	0	0,63	<1%	1	3.355.827	3.893	0,0	0,33	Ta	
20 Titan	0,61	0,61	0,43	nur HP	0	0,22	>50 %	0	417.783	2.939.103	1,0	0,53	Ti	
21 Wolfram	0,78	0,65	0,5	nur HP	0	0,45	>10-25 %	0,3	52.412	3.564	0,0	0,31	W	
22 Zink	0,37	0,14	0,2	nur HP	0	0,53	>50 %	0	42.271	509.366	1,0	0,47	Zn	
23 Zinn	0,53	0,25	0,4	nur HP	0	0,63	>50 %	0	263.923	68.620	0,3	0,33	Sn	
Bezugsjahr	2008	2008	2008	2008		2008	2011	2011	2012	2012				
Literatur	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	UNEP	UNEP	Texte	Texte				

(rot markierte Metalle = vom UBA zur Prüfung benannt)

9.4 Identifizierung relevanter Abfallarten

Nachfolgend sind die auf Basis der Abfallanalysendatenbank ABANDA⁸⁶ des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen identifizierten relevanten Abfallarten mit den Gehalten der für das Vorhaben interessanten Metallen entsprechend dem in der Methodik (Kapitel 5.1.2) beschriebenen Vorgehen dargestellt. Daneben sind ebenfalls weitere relevante Abfallarten, zu denen Daten auf Basis der Produktanalyse vorliegen bzw. zu erwarten sind mit aufgeführt. Auf Basis der Mengenrelevanz in der Abfallstatistik des Bundes wurden diese identifizierten Abfallarten gewichtet. Soweit nicht anders ausgewiesen, basieren Informationen zur Beschreibung und charakteristischen Zusammensetzung einzelner Abfallschlüsselnummern auf den Abfallsteckbriefen des IPA (Informations-Portal-Abfall)⁸⁷.

AVV 06 03 – Abfälle aus HZVA von Salzen, Salzlösungen und Metalloxiden

- 06 03 15* Metalloxide, die Schwermetalle enthalten → **Cer** (15.400 mg/kg) und **Lanthan** (23.300 mg/kg) (jeweils n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 7.600 Mg
- 06 03 16 Metalloxide mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 03 15 fallen → Spiegeleintrag zu 06 03 15*; Abfallmenge 2010: 83.600 Mg

In Verbindung der für AVV 06 03 15* und 06 03 16 durch ABANDA bestimmten Gehalte mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **1.400 Mg Cer** und **2.100 Mg Lanthan** erwartet werden.

AVV 06 04 – Metallhaltige Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 03 fallen

- **06 04 05*** Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten → **Gold, Palladium, Platin und Rhodium** (je 50 mg/kg und n=2) und **Cer** (237.200 mg/kg, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 49.800 Mg

In Verbindung der für AVV 06 04 05* durch ABANDA bestimmten Gehalte mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **2 Mg Gold, Palladium, Platin und Rhodium** sowie **11.800 Mg Cer** erwartet werden.

AVV 10 02 – Abfälle aus der Eisen- und Stahlindustrie

⁸⁶Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Recklinghausen: Abfallanalysendatenbank (ABANDA), abgerufen am 14.02.2013 unter: <http://www.lanuv.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm>

⁸⁷ Informations-Portal-Abfallbewertung (IPA): Abfallsteckbriefe, abgerufen am 14.2.2013 unter: <http://www.abfallbewertung.org/reppen.php?report=ipa>

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

- 10 02 01 Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke → i.d.R. Abfälle in ähnlicher Zusammensetzung wie das Ausgangsmaterial (Schlacke), die nicht den gewünschten Qualitätskriterien (z.B. Korngröße) entsprechen; Anteil metallisches Eisen bzw. Stahl entsprechend der Legierung < 1 - 10 %; sehr geringe Mengen an **Gold** und **Gallium** als Legierungselemente möglich; Abfallmenge 2010: 541.400 Mg
- 10 02 02 unbearbeitete Schlacke → Schlacke, die möglicherweise nicht den Produktstandards, technischen Vorschriften etc. genügt; Anteil metallisches Eisen bzw. Stahl entsprechend der Legierung < 1 - 10 %; sehr geringe Mengen an **Gold** und **Gallium** als Legierungselemente möglich; Abfallmenge 2010: 4.936.700 Mg
- 10 02 07* feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten → überwiegend Eisenoxide sowie mitgerissene Schlackenpartikel bzw. Schlackenbildner; Anteil Eisen als FeO, teilweise auch metallisch 10 - 90 % (35 - 60 % Sinteranlagen; 10 - 60 % Gichtstäube; 45 - 90 % Stahlwerkstäube); **Gallium** (22 mg/kg, n=1) und **Yttrium** (21 mg/kg, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 472.900 Mg
- 10 02 08 Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 02 07 fallen → Spiegeleintrag zu 10 02 07*; Abfallmenge 2010: 348.800 Mg
- 10 02 10 Walzzunder → die Zusammensetzung des Walzzunders entspricht der Zusammensetzung der verarbeiteten Stahllegierung, Anteil Eisen als FeO 50 - > 99 %; geringe Mengen an **Gold** und **Gallium** als Legierungselemente möglich; Abfallmenge 2010: 142.800 Mg
- 10 02 13* Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten → der Feststoffanteil der abgetrennten Schlämme entspricht in seiner Zusammensetzung im Wesentlichen der der Abgasstäube; Anteil Eisen als FeO, teilweise auch metallisch 10 - 90 % (35 - 60 % Sinteranlagen; 10 - 60 % Gichtstäube; 45 - 90 % Stahlwerkstäube); evtl. sehr geringe Mengen an **Gold** und **Gallium** als Legierungselemente möglich; Abfallmenge 2010: 109.700 Mg
- 10 02 14 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 02 13 fallen → Spiegeleintrag zu 10 02 13*; Abfallmenge 2010: 167.800 Mg

I.d.R. ist hier nur von Spurengehalten der Metalle der Metallauswahl auszugehen, bei den hier auftretenden Schwermetallen handelt es sich eher um Mangan, Chrom, Vanadium und Nickel. Besonders relevant wird hier AVV 10 02 10 sein, im Walzzunder können Legierungsmetalle in Mengenverhältnissen enthalten sein, die etwa der Zusammensetzung der verarbeiteten Stahlqualitäten entspricht.

In Verbindung der für AVV 10 02 durch ABANDA quantifizierbaren Gehalte mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **18,1 Mg Gallium** und **17,3 Mg Yttrium** erwartet werden.

10 11 - Abfälle aus der Herstellung von Glas und Glaserzeugnissen

- 10 11 03 Glasfaserabfall → **Germanium** und **Erbium** nach Produktanalyse; Abfallmenge 2010: 20.000 Mg
- 10 11 05 Teilchen und Staub

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

- 10 11 09* Gemengeabfall mit gefährlichen Stoffen vor dem Schmelzen; **Gallium** (5 mg/kg, n=1), **Yttrium** (16,5 mg/kg, n=1), **Cer**(150 mg/kg, n=1) und **Lanthan**(110 mg/kg, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 1.300 Mg
- 10 11 10 Gemengeabfall vor dem Schmelzen mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 11 09 fällt → Spiegeleintrag zu 10 11 09*; Abfallmenge 2010: 3.400 Mg
- 10 11 11* Glasabfall in kleinen Teilchen und Glasstaub, die Schwermetalle enthalten (z.B. aus Elektronenstrahlröhren)
- 10 11 12 Glasabfall mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 11 11 fällt
- 10 11 13* Glaspolier- und Glasschleifschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten
- 10 11 14 Glaspolier- und Glasschleifschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 11 13 fallen

Bei der Herstellung von Spezialgläsern werden Seltene Erden, wie **Cer** und **Neodym** eingesetzt, um die Gläser zu entfärben und ihnen bestimmte Eigenschaften zuzuweisen. Als Glasadditive bzw. für optisches Glas werden **Cer** und **Erbium** eingesetzt. Dies führt zu der Annahme, dass sich diese Seltenen Erden in den Glasabfällen sowie auch als Abrieb in den Glaspolier- und Glasschleifschlämmen wieder finden. In Verbindung der für 10 11 09* durch ABANDA quantifizierbaren Gehalte (und unter Berücksichtigung des zugehörigen Spiegeleintrags) mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **0,02 Mg Gallium**, **0,08 Mg Yttrium**, **0,7 Mg Cer** und **0,5 Mg Lanthan** erwartet werden.

AVV 11 01 - Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung und Beschichtung von Metallen und anderen Werkstoffen (z.B. Galvanik, Verzinkung, Beizen, Ätzen, Phosphatieren, alkalisches Entfetten und Anodisierung)

- 11 01 05* saure Beizlösungen → **Gallium** (6,9 mg/kg), **Yttrium** (1,1 mg/kg), **Cer** (630 mg/kg) und **Lanthan** (2 mg/kg) (jeweils n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 118.900 Mg
- 11 01 08* Phosphatierschlämme → **Gallium** (2,8 mg/kg), **Yttrium** (7,8 mg/kg), **Cer** (132 mg/kg) und **Lanthan** (43 mg/kg) (jeweils n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 11.300 Mg
- 11 01 09* Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten → **Gold** (0,8 mg/kg), **Palladium** (50 mg/kg) und **Platin** (0,7 mg/kg) (jeweils n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 562.900 Mg
- 11 01 10 Schlämme und Filterkuchen mit Ausnahme derjenigen, die unter 11 01 09 fallen → Spiegeleintrag zu 11 01 09*; Abfallmenge 2010: 119.400 Mg
- 11 01 11* wässrige Spülflüssigkeiten, die gefährliche Stoffe enthalten → **Gold** (1,5 mg/l im Eluat, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 752.700 Mg
- 11 01 12 wässrige Spülflüssigkeiten mit Ausnahme derjenigen, die unter 11 01 11 fallen → Spiegeleintrag zu 11 01 11*; Abfallmenge 2010: 33.800 Mg
- 11 01 15* Eluate und Schlämme aus Membransystemen oder Ionenaustauschsystemen, die gefährliche Stoffe enthalten → Zusammensetzung ist vergleichbar mit den verbrauchten Prozesslösungen (metallionenhaltige Spülwässer); Abfallmenge 2010: 5.200 Mg

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

- 11 01 16* gesättigte oder verbrauchte Ionenaustauscherharze →weisen einen hohen Metallanteil auf; Abfallmenge 2010: 0 Mg
- 11 01 98* andere Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten →**Yttrium** (10.500 mg/kg, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 13.700 Mg

In Verbindung der für AVV 11 01 durch ABANDA quantifizierbaren Gehalte mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **0,8 Mg Gallium, 0,6 Mg Gold, 34 Mg Palladium, 0,5 Mg Platin, 144,1 Mg Yttrium, 76,4 Mg Cer und 0,7 Mg Lanthan** erwartet werden.

AVV 12 01 - Abfälle aus Prozessen der mechanischen Formgebung sowie der physikalischen und mechanischen Oberflächenbearbeitung von Metallen und Kunststoffen

- 12 01 01 Eisenfeil- und -drehspäne
- 12 01 02 Eisenstaub und -teile
- 12 01 03 NE-Metallfeil- und -drehspäne
- 12 01 04 NE-Metallstaub und -teilchen
- 12 01 13 Schweißabfälle
- 12 01 14* Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten →Metallgehalt 2 - 20 % (abhängig vom Bearbeitungsverfahren und von den bearbeiteten Werkstoffen, Fe- oder NE-Metalle); **Gold, Palladium, Platin** (je 10 mg/kg, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 14.900 Mg
- 12 01 15 Bearbeitungsschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 14 fallen → Spiegeleintrag zu 12 01 14*; Abfallmenge 2010: 12.400 Mg
- 12 01 16* Strahlmittelabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten →**Gallium** (20 mg/kg), **Gold, Palladium, Platin** (je 5 mg/kg), **Rhodium** (2 mg/kg), **Yttrium** (20 mg/kg), **Cer** (20 mg/kg), **Dysprosium** (6 mg/kg), **Erbium** (5 mg/kg), **Europium** (2 mg/kg), **Gadolinium** (6 mg/kg), **Lanthan** (7 mg/kg), **Neodym** (30 mg/kg), **Samarium** (6 mg/kg) und **Terbium** (2 mg/kg) (jeweils n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 28.500 Mg
- 12 01 17 Strahlmittelabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 16 fallen → Spiegeleintrag zu 12 01 16*; Abfallmenge 2010: 114.400 Mg
- 12 01 18* ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme) →Metallgehalt 40 - 80 % (abhängig vom Bearbeitungsverfahren und von den bearbeiteten Werkstoffen, Fe- oder NE-Metalle); **Dysprosium** (100 mg/kg, n=1), **Neodym** (53.450 mg/kg, n=2) und **Samarium** (42.450 mg/kg, n=2) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 55.700 Mg
- 12 01 20* gebrauchte Hon- und Schleifmittel, die gefährliche Stoffe enthalten
- 12 01 21 gebrauchte Hon- und Schleifmittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 20 fallen

Bearbeitungsöle und -emulsionen werden prozessbedingt auch mit Metallen (werkstoffabhängig) verunreinigt, Öle/Emulsionen werden i.d.R. im Kreislauf gefahren, eingetragene Späne und Abrieb werden mittels Sedimentation oder Filtration von den Ölen abgetrennt. In Schlämmen und Strahlmittelabfällen konnten Edelmetalle und teilweise auch Seltene Erden nachgewiesen werden.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

In Verbindung der für AVV 12 01 durch ABANDA quantifizierbaren Gehalte mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **2,9 Mg Gallium, 1,0 Mg Gold, 1,0 Mg Palladium, 1,0 Mg Platin, 0,3 Mg Rhodium, 2,9 Mg Yttrium, 2,9 Mg Cer, 6,5 Mg Dysprosium, 0,7 Mg Erbium, 0,3 Mg Europium, 0,9 Mg Gadolinium, 1,0 Mg Lanthan, 2.981,5 Mg Neodym, 2.365,4 Mg Samarium und 0,3 Mg Terbium** erwartet werden.

AVV 15 02 - Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung

- 15 02 02* Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich Ölfilter a. n. g.), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind → **Palladium** (15.000 mg/kg, n=1) und **Platin** (500 mg/kg, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 138.900 Mg
- 15 02 03 Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung mit Ausnahme derjenigen, die unter 15 02 02 fallen → Spiegeleintrag zu 15 02 02*; Abfallmenge 2010: 21.600 Mg

Abhängig vom Herkunftsbereich, zumeist mit Polierpasten und Schleifmittel verunreinigt, auch Abrieb vom bearbeiteten Werkstück (Metall, Keramik) kann anhaften.

Anhaftungen je nach Materialart:

- Aufsaugmaterialien, Reinigungstücher und Putzlappen/ Öl- und Chemikalienbindemittel → 0 - 10 % anorg. Chemikalien (je nach Einsatzfall, z. B. Laugen, Säuren, Salze, Metalle und Metallverbindungen)
- Filtermaterialien → 0 - 50 % Metalle (Gehäuse von Filterkartuschen: Eisen/Stahl, Aluminium Metallspäne/-abrieb bei Filtern aus der Metallbearbeitung) → 0 - 10 % anorg. Chemikalien (je nach Einsatzfall, z. B. Laugen, Säuren, Salze, Metallverbindungen, Schleifmittelabrieb)
- Verunreinigte Schutzkleidung → 0 - 5 % anorg. Chemikalien (je nach Einsatzfall, z. B. Laugen, Säuren, Salze, Metalle und Metallverbindungen)
- Feste ölverschmutzte Betriebsmittel → 0 - 50 % Metalle (Bauteile, Rohrleitungen, Gehäuse von Filterkartuschen: Eisenwerkstoffe und NE-Metallwerkstoffe)

In Verbindung der für AVV 15 02 durch ABANDA quantifizierbaren Gehalte mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **2.407,5 Mg Palladium** und **80,3 Mg Platin** erwartet werden.

AVV 16 01 - Altfahrzeugeverschiedener Verkehrsträger (einschließlich mobiler Maschinen) und Abfälle aus der Demontage von Altfahrzeugen sowie der Fahrzeugwartung (außer 13, 14, 16 06 und 16 08)

- 16 01 04* Altfahrzeuge → Altfahrzeuge, wie zur Entsorgung abgegeben, die Öle, Kraftstoffe oder andere gefährliche Bestandteile (Bleibatterien oder **Katalysatoren**) enthalten; Abfallmenge 2010: 530.600 Mg
- 16 01 06 Altfahrzeuge, die weder Flüssigkeiten noch andere gefährliche Bestandteile enthalten → nach Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung

- 16 01 07* Ölfilter →metallenes Gehäuse sowie Mikrofilter, in dem Feinpartikel - z. B. Metallabrieb - zurückgehalten werden
- 16 01 08* quecksilberhaltige Bestandteile →bis ca. 1995 für Beleuchtungsschalter, Air-Bag-Sensoren und ABS-Systeme verwendet, mittlerweile durch mikromechanische Sensoren ersetzt; weiterhin kann Quecksilber in Leuchtmitteln (z. B. Höchstdruckgasentladungslampen (Xenonlicht in Autoscheinwerfern)) enthalten sein
- 16 01 10* explosive Bauteile (z.B. aus Airbags) →Gasgenerator von Air-Bags, Gurtstraffer
- 16 01 18 Nichteisenmetalle →Bauteile, die aus Verwertungsgründen vor Zerkleinerung des schadstoffentfrachteten Altfahrzeugs demontiert werden, z. B. Motorblöcke oder Felgen aus Aluminium. Zum Teil werden dem Abfallschlüssel auch Kabelbäume zugeordnet.
- 16 01 20 Glas →Einscheiben- oder Verbundsicherheitsglas; entsprechend der Produktanalyse kann hier Cer als UV-Filter in Windschutzscheiben erwartet werden; Abfallmenge 2010: 63.000 Mg
- 16 01 21* gefährliche Bauteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 01 07 bis 16 01 11, 16 01 13 und 16 01 14 fallen → verschiedene Bauteile, für die kein spezifischerer Abfallschlüssel besteht. So werden in der Praxis z. T. Russpartikelfilter von Dieselmotoren dem AS 160121* zugeordnet. Sie bestehen aus Stahlblechgehäuse und einem keramischen oder metallenen Filterelement, z. B. dünne Lochfolien aus Chrom-Nickel-Stahl. Ebenso werden **Brennstoffzellen**, die derzeit nur im Rahmen von Demonstrations- und Testvorhaben in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden dem AS 160121* zugeordnet. Sie bestehen aus komplexen galvanischen Zellen mit Elektroden aus katalysatorbeschichtetem Metall oder Kohlenstoffnanoröhrchen. Die elektrolytgefüllten Zellen sind in der Praxis zu sogenannten Stapelspeichern ("Stacks") zusammengefasst. Es existieren unterschiedliche Typen von Brennstoffzellen, die sich in der Zusammensetzung, insbesondere Elektrolyten und Membranen, stark unterscheiden; Abfallmenge 2010: 0 Mg
- 16 01 22 Bauteile a.n.g. →Der Abfallschlüssel 160122 wird vielfach zur Deklaration von nicht gefährlichen Bauteilen genutzt, die - je nach Material - spezifischer deklariert werden könnten, z. B. Nichteisenmetalle 160118 oder Kunststoffe 160119

Einzelne Bestandteile von Altfahrzeugen werden nach der Demontage einer anderen Abfallschlüsselnummer zugeordnet. So fallen beispielsweise separierte Bleibatterien unter die Schlüsselnummer 16 06 01* und Autokatalysatoren unter 16 08 03 oder 16 08 07*. Gleiches gilt für die geschredderte Karosserie, hier werden bspw. NE-Metallabfälle der AVV 19 10 02 und die Shredderleichtfraktion der AVV 19 10 03* oder 19 10 04 zugeordnet.

Durch ABANDA liegen keine Analysen vor, die Gehalte von Metallen der Metallauswahl ausweisen. Aufbauend auf den Ergebnissen der Produktanalyse können hier allerdings schon jetzt Gehalte relevanter Metalle (z. B. Cer in Windschutzscheiben) erwartet werden. Hier könnten nach Abschluss der Produktanalyse überschlägige Hochrechnungen erfolgen.

AVV 1606 - Batterien und Akkumulatoren

- **16 06 05** andere Batterien und Akkumulatoren → vereinzelt Zink-Kohle Batterien, den überwiegenden Anteil machen neuere Bauarten aus, z. B. Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Batterien, **Nickel-Metallhydroxid-Akkus**, Zink-Luft-Knopfzellen; große Typenvielfalt, die sich in unterschiedlichsten Bauformen und Materialzusammensetzungen widerspiegelt → nach Produktanalyse enthalten NiMH-Batterien **8 -10 % Seltene Erden (Lanthan, Cer, Neodym)**; Abfallmenge 2010: 5.700 Mg

Je nach Herkunft erfolgt die Zuordnung von Batterien zu unterschiedlichen Abfallschlüsselnummern. Werden diese mit Elektro-, Elektronikgeräten und Spielzeugen erfasst und beim Recycling der Elektroaltgeräte abgetrennt, so werden die separierten Batterien je nach Art einer der 6-stelligen Nummern unter AVV 16 06 zugeordnet. Erfolgt allerdings die Erfassung der Batterien über die Haushaltsnahe Sammlung von Batterien und Akkumulatoren, so werden diese den Abfallschlüsselnummern 20 01 33* oder 20 01 34 zugeordnet.

Basierend auf der Statistik⁸⁸ des Gemeinsamen Rücknahmesystems Batterien (GRS) soll hier überschlägig über den Anteil der NiMH-Batterien der Anteil dieser Batterieart in der Abfallschlüsselnummer 16 06 05 abgebildet werden. Batterien, die über eine eigenständige Abfallschlüsselnummer erfasst werden, wie Nickel-Cadmium-, Alkali-Mangan- und quecksilberhaltige Batterien, wurden dabei nicht berücksichtigt. Unter den verbleibenden Batteriearten machen die NiMH-Batterien einen Anteil von etwa 21 % aus.

Über diesen Ansatz sowie die in der Produktanalyse ermittelten Gehalte an Seltenen Erden und in Verbindung mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten für die Abfallschlüsselnummer 16 06 05 zwischen **96 und 120 Mg Seltene Erden (Lanthan, Cer und Neodym)** erwartet werden.

AVV 1608 - Gebrauchte Katalysatoren

- **16 08 01** gebrauchte Katalysatoren, die **Gold, Silber, Rhenium, Rhodium, Palladium, Iridium** oder **Platin** enthalten (außer 16 08 07) → gebrauchte edelmetallhaltige Katalysatoren aus der chemischen Industrie und Kfz-Katalysatoren (hier vor allem **Platin, Palladium** und **Rhodium**), die Katalysatoren können nur dann dem Schlüssel 160801 zugeordnet werden, wenn keine gefährlichen Bestandteile oder Anhaftungen enthalten sind, z. B. kanzerogene Mineralien oder Ruß; Abfallmenge 2010: 10.900 Mg
- **16 08 02*** gebrauchte Katalysatoren, die gefährliche Übergangsmetalle oder deren Verbindungen enthalten → Übergangsmetalle im Sinne des Abfallverzeichnisses: Scandium, Vanadium, Mangan, Kobalt, Kupfer, **Yttrium**, Niob, Hafnium, Wolfram, Titan, Chrom, Eisen, Nickel, Zink, Zirkonium, Molybdän und Tantal, wenn sie als gefährliche Stoffe eingestuft wurden. Ggf. zuzuordnen sind hier Katalysatoren aus einigen chemischen Prozessen und Katalysatoren des SCR-Verfahrens zur Reinigung von Abgasen aus Verbrennungsanlagen; **Gold, Palladium, Platin und Rhodium** (jeweils 50 mg/kg, n=1) durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 12.500 Mg
- **16 08 03** gebrauchte Katalysatoren, die Übergangsmetalle oder deren Verbindungen enthalten, a. n. g. → die Katalysatoren der chemischen und petrochemischen Industrie sowie der Abgasbehandlung von Verbrennungsanlagen, die Übergangsmetalle (evtl. **Yttrium**) oder deren Verbindungen enthalten, die nicht als gefährlich eingestuft sind; Abfallmenge 2010: 7.300 Mg

⁸⁸ GRS Batterien: Erfolgskontrolle 2011, S. 13: Masse zurückgenommener Batterien nach Typengruppen und Systemen / § 15 (1) Nr. 2 und Nr. 4 BattG; abgerufen am 18.02.2013 unter <http://www.grs-batterien.de/grs-batterien/zahlen-und-fakten.html>

- **16 08 04** gebrauchte Katalysatoren von Crackprozessen (außer 16 08 07) →Katalysatoren die z. T. Edelmetalle oder Übergangsmetalle enthalten, Metallkomponente unterstützt den Crackprozess, z. B. **Seltene Erden**, bzw. den Hydrierungs- und Dehydrierungsprozess, z. B. **Palladium, Platin** oder Nichtedelmetallsulfide auf Basis von Mo, W, Co; aufgrund ihrer Herkunft (Crackprozess) dem Abfallschlüssel 160804 zugeordnet, wenn in gefährlichem Maße mit Kohlenwasserstoffen verunreinigt, dann unter 160807* (*deshalb hier entsprechende Gehalte nach ABANDA von 16 08 07* für die Berechnung herangezogen*); Abfallmenge 2010: 300 Mg
- 16 08 05* gebrauchte Katalysatoren, die Phosphorsäure enthalten →der chemischen, petrochemischen und pharmazeutischen Industrie (Polymerisierung, Alkylierung, Carbonylierung), neben der Phosphorsäure können Promotoren, z. B. Bor oder Fluorid, und Verunreinigungen, z.B. Kohlenwasserstoffe, enthalten sein; Abfallmenge 2010: 300 Mg
- **16 08 07*** gebrauchte Katalysatoren, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind →insbesondere die Kfz-Katalysatoren, deren Quellmatte aus kanzerogenen Mineralfasern besteht, 2009 war dies bei ca. 80 % der anfallenden Kfz-Katalysatoren der Fall, bei der Herstellung werden bereits nicht-kanzerogene Materialien eingesetzt. Dem Schlüssel 160807* werden oftmals auch die Rußfilter aus Dieselfahrzeugen zugeordnet, da sie aufgrund ihrer Verunreinigung mit Ruß als gefährlicher Abfall einzustufen sind; **Palladium** (20.000 mg/kg, n=1), **Platin** (4.000 mg/kg, n=1) und **Rhodium** (41.672 mg/kg, n=6)durch ABANDA nachgewiesen; Abfallmenge 2010: 11.700 Mg

In Verbindung der für AVV 16 08 durch ABANDA quantifizierbaren Gehalte mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier **0,6 Mg Gold, 240,6 Mg Palladium, 48,6 Mg Platin und 500,7 Mg Rhodium** erwartet werden. Eine weitere Hochrechnung könnte hier aufbauend auf den Ergebnissen der Produktanalyse über die Gehalte der Industriekatalysatoren erfolgen.

19 01 - Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen

- 19 01 11* Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten; Abfallmenge 2010: 554.300 Mg
- 19 01 12 Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen; Abfallmenge 2010: 7.111.700 Mg

Gehalt an Seltenen Erden in der Schlacke wird auf eine Konzentration von etwa 25 ppm⁸⁹ geschätzt. In Verbindung dieser Angabe mit dem entsprechenden Abfallaufkommen im Jahr 2010, könnten hier immerhin **192 Mg Seltene Erden** erwartet werden.

⁸⁹Institut für Seltene Erden und Metalle e.V.: Die schwierige Suche nach den Seltenen Erden; abgerufen am 20.02.2013 unter: <http://institut-seltene-erden.org/die-schwierige-suche-nach-den-seltenen-erden/>

9.5 Bewertung der Datenqualität

Je nach analysiertem Produkt stellen sich die Datenverfügbarkeit und die Qualität der Datenquellen unterschiedlich dar. Entsprechend der im Projekt angewandten Methodik (vgl. Abschnitt 0), nach der für jeden Parameter die verschiedenen Quellen in Reihenfolge ihrer Zuverlässigkeit heranzuziehen sind, erfolgt auch die Bewertung der Qualität der Letzen Endes verwendeten Daten zunächst einzeln für jeden Parameter unter Betrachtung der verwendeten Quellen. Zusätzlich wird der zeitliche Bezug der verwendeten Daten qualitativ bewertet, was in erster Linie für die Parameter Verweildauer und Metallkonzentration von Relevanz ist. Eine starre Bewertung des zeitlichen Bezugs der Daten aufgrund des Alters erscheint nicht zielführend, da sich zum einen die Verweildauern der Produkte deutlich voneinander unterscheiden, wodurch sich gänzlich unterschiedliche Anforderungen an die Aktualität ergeben, und sich zum anderen die Geschwindigkeit der technologischen Weiterentwicklung (insb. bezogen auf die Effizienz des Materialeinsatzes) von Produkt zu Produkt variiert. Daher wird hier qualitativ zwei Abstufungen unterschieden: Als Aktuelle Daten gelten Daten die aufgrund ihres Alters als für im Betrachtungsraum in Verkehr gebrachte Produkte als repräsentativ anzusehen sind. Demgegenüber stehen Daten, die aufgrund ihres Alters als möglicherweise ungenau einzustufen sind.

Für jeden Parameter erfolgt eine Abstufung nach Verlässlichkeit der Quellen, bspw. bei der in Verkehr gebrachten Menge von im peer-review Verfahren begutachteten wissenschaftlichen Quellen (mit sechs Punkten bewertet) bis zu begründeten Schätzungen (ein Punkt). Wenn die erhobenen Daten auf verschiedenen Quellen beruhen, erfolgt die Punktvergabe zunächst entsprechend der höchstrangigen Quelle, für Quellen jeder weiteren Kategorie wird je ein zusätzlicher Punkt vergeben.

Im Ergebnis erhält man für jeden Parameter eine Einstufung der Datenqualität von niedrig (weniger als drei Punkte), mittel (drei oder vier Punkte) und hoch (5 oder mehr Punkte), sowie Einstufung der Datenqualität über alle Parameter. In Fällen bei denen aus gutem Grund für einzelne Parameter keine Daten erhoben wurden, wird die Gesamtbewertung entsprechend korrigiert.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	6	
	Erhebungen der Konsumgüterforschung oder von Verbänden	5	
	Export/Import und Produktionsstatistiken	4	
	graue Literatur	3	
	Expertenbefragung	2	
	begründete Schätzungen	1	
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	6	
	Sonstige Studien über Lebensdauern	5	
	Angaben von Ämtern und Behörden	4	
	Herstellerangaben	3	

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
	Expertenaussagen	2	Red
	begründete Schätzungen	1	Red
Metallkonzentrationen	Primärquellen: Herstellerangaben	6	Green
	Primärquellen: Recycler, Verwerter (Zerlegestudien und chemische Analysen)	5	Green
	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	4	Yellow
	Graue Literatur	3	Yellow
	Expertenaussagen	2	Red
	begründete Schätzungen	1	Red
Exporte aus der Nutzungsphase	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	6	Green
	Erhebung der statistischen Ämter und der Verbände	5	Green
	Hersteller/ Vertreiberangaben	4	Yellow
	Marktstudien, sonstige Literatur	3	Yellow
	Expertenaussagen	2	Red
	begründete Schätzungen	1	Red
Datenqualität - Gesamt	hoch	>=21	Green
	mittel	11-20	Yellow
	niedrig	<=10	Red

9.5.1 Industriekatalysatoren

Im Folgenden wird die Datenqualität getrennt für PGM-haltige, Ge-haltige und SE-haltige Industriekatalysatoren dargestellt. Für alle betrachteten Katalysatorarten lässt sich eine ausreichende Aktualität der erhobenen Daten feststellen.

9.5.1.1 PGM-haltige Kats

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Wissenschaftliche Veröffentlichung	6	Green
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichung	6	Green

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
Metallkonzentrationen	<i>nicht relevant, da Metallmengen direkt aus Literatur verfügbar</i> (Wissenschaftliche Veröffentlichung)	(6)	
Exporte aus der Nutzungsphase	Wissenschaftliche Veröffentlichung	6	
Datenqualität - Gesamt	hoch	24	

9.5.1.2 Ge-haltige Kats

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Angaben von Verbänden, graue Literatur	6	
Verweildauern	Sonstige Studien über Lebensdauern	5	
Metallkonzentrationen	graue Literatur	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	<i>nicht relevant</i> (anhand der sonstigen erhobenen Daten)	(6)	
Datenqualität - Gesamt	mittel	20	

9.5.1.3 SE-haltige Kats

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Angaben von Verbänden, graue Literatur	6	
Verweildauern	Experten- und Herstellerangaben	3	
Metallkonzentrationen	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, graue Literatur, Expertenaussagen	8	
Exporte aus der Nutzungsphase	<i>nicht relevant</i> (anhand der sonstigen erhobenen Daten)	(6)	
Datenqualität - Gesamt	hoch	23	

9.5.1.4 Automobile und -katalysatoren

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Zulassungszahlen	6	
Verweildauern	Statistische Daten zum Alter von außer Betrieb gesetzten Autos	5	

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
Metallkonzentrationen	Oftmals Herstellerangaben und wissenschaftliche Literatur jedoch mit Lücken bzw. Schwächen bei einzelnen Elementen und wg. der heterogenen Produktzusammensetzung (Vielzahl der Fahrzeugmodelle, -varianten und -versionen, Wichtige Rolle von Sonderausstattung) in der Quantifizierung der Gesamtmengen schwach	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	Die Abfallmenge ist als Anzahl der Produkte (Altfahrzeuge) aufgrund von Meldepflichten bekannt. Es liegen keine Daten zu den Fahrzeugmodellen, -varianten, -versionen vor, sodass die Metallmengenbestimmung mit größeren Datenunsicherheiten erfolgt.	3	
Datenqualität - Gesamt	mittel	17	

9.5.2 Metallurgie/ Legierungen

Durch die INTECUS GmbH wurden nur ausgewählte Parameter bearbeitet, welche nachfolgend entsprechend ihrer Datenquellen bewertet sind. Die erhobenen Daten sind als ausreichend aktuell einzustufen.

Parameter	Datenquelle (n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Export/Import und Produktionsstatistiken, Expertenbefragung	5	X
Verweildauern	<i>(Keine expliziten Erhebungen durch INTECUS zur Verweildauer von Mischmetallen vorgenommen)</i>	-	
Metallkonzentrationen	Primärquellen: Herstellerangaben; Expertenaussagen	7	X
Exporte aus der Nutzungsphase	<i>(Keine expliziten Erhebungen durch INTECUS zu Exporten aus der Nutzungsphase für Mischmetalle vorgenommen)</i>	-	
Datenqualität - Gesamt (Summe nur für die erhobenen Daten)	hoch	≥21	
	mittel	11-20	X
	niedrig	≤10	

9.5.3 Batterien

Prinzipiell ist zu bemerken, dass eine hohe Datenqualität für die in Verkehr gebrachten Mengen und die Metallkonzentrationen vorliegt, was vor allem auf die gesetzlichen Regelungen im Batteriegesetz (BattG vom 25. Juni 2009) zurückzuführen ist. Hinsichtlich der Verweildauern bestehen durch den so genannten Hoarding-Effekt und bei „Exporten aus der Nutzungsphase“ durch

schwer zu kontrollierende Exporte z.B. von gebrauchten Mobiltelefonen und gebrauchten Elektrogeräten in Entwicklungsländer gewisse Unsicherheiten. Die erhobenen Daten sind als ausreichend aktuell einzustufen.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung
in Verkehr gebrachte Mengen	Erhebungen der Konsumgüterforschung oder von Verbänden	5
Verweildauern	Expertenaussagen	2
Metallkonzentrationen	Primärquellen: Herstellerangaben	6
Exporte aus der Nutzungsphase	begründete Schätzungen	1
Datenqualität - Gesamt	mittel	14

9.5.4 Anwendungen der optischen Industrie

9.5.4.1 Poliermittel

Die erhobenen Daten sind als ausreichend aktuell einzustufen.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung
in Verkehr gebrachte Mengen	Erhebungen der Konsumgüterforschung oder von Verbänden, Expertenbefragung, begründete Schätzungen	7
Verweildauern	Sonstige Studien über Lebensdauern: Erhebungen von Verbänden	5
Metallkonzentrationen	Expertenaussagen	2
Exporte aus der Nutzungsphase	Irrelevant, es handelt sich vielmehr um unmittelbar in der Produktion anfallende Abfall- bzw. Stoffströme.	-
Datenqualität - Gesamt	mittel	14

9.5.4.2 Spezialgläser

Die erhobenen Daten sind - soweit vorhanden - als ausreichend aktuell einzustufen.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung
in Verkehr gebrachte Mengen	Expertenbefragung, begründete Schätzungen	3
Verweildauern	Expertenaussage	2

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
Metallkonzentrationen	Expertenaussage	2	
Exporte aus der Nutzungsphase	keine Angaben bzw. keine Relevanz, da es fast ausschließlich um in AKWs verbaute Gläser geht.	-	
Datenqualität - Gesamt	niedrig	7	

9.5.5 Laseranwendungen

Die erhobenen Daten sind - soweit vorhanden - als ausreichend aktuell einzustufen.

9.5.5.1 Nd:YAG Laser

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Expertenbefragung	1	
Verweildauern	Expertenaussage	2	
Metallkonzentrationen	graue Literatur, Expertenbefragung	4	
Exporte aus der Nutzungsphase	Expertenbefragung, begründete Schätzungen	2	
Datenqualität - Gesamt	niedrig	9	

9.5.5.2 Er:YAG Laser

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Expertenbefragung, begründete Schätzungen	3	
Verweildauern	Expertenaussage	2	
Metallkonzentrationen	Expertenaussagen, begründete Schätzungen	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	Expertenaussagen	2	
Datenqualität - Gesamt	niedrig	10	

9.5.6 Windenergie

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, graue Literatur	7	
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, graue Literatur	7	
Metallkonzentrationen	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, graue Literatur	4	
Exporte aus der Nutzungsphase	sonstige Literatur	3	
Datenqualität - Gesamt	hoch	21	

9.5.7 Medizinische Geräte

9.5.7.1 MRTs

Die erhobenen Daten sind - soweit vorhanden - als ausreichend aktuell einzustufen.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	graue Literatur, begründete Schätzungen	4	
Verweildauern	Expertenaussage, begründete Schätzungen	3	
Metallkonzentrationen	graue Literatur, Expertenaussagen	4	
Exporte aus der Nutzungsphase	Expertenaussagen	1	
Datenqualität - Gesamt	mittel	12	

9.5.7.2 Röntgengeräte/ CTs

Die erhobenen Daten sind - soweit vorhanden - als unklar bzgl. ihrer Aktualität einzustufen.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	graue Literatur, begründete Schätzungen	4	
Verweildauern	graue Literatur	3	
Metallkonzentrationen	graue Literatur	3	

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
Exporte aus der Nutzungsphase	begründete Schätzungen	1	
Datenqualität - Gesamt	mittel	11	

9.5.8 Brennstoffzellen

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Statistiken, graue Literatur	5	
Verweildauern	Studien über Lebensdauern	5	
Metallkonzentrationen	graue Literatur	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	-	-	
Datenqualität - Gesamt	mittel	13	

9.5.9 Optische Faseranwendungen

9.5.9.1 Telekommunikationsinfrastruktur

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	graue Literatur, begründete Schätzungen, Expertenangaben	3	
Verweildauern	Studien, Expertenaussagen	5	
Metallkonzentrationen	Graue Literatur, Expertenaussagen	4	
Exporte aus der Nutzungsphase	Herstellerangaben, Expertenangaben	5	
Datenqualität - Gesamt	mittel	17	

9.5.9.2 Glasfaser in Rechenzentren

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Wissenschaftliche Veröffentlichung	6	
Verweildauern	begründete Schätzung	5	
Metallkonzentrationen	Graue Literatur, Expertenaussagen	4	
Exporte aus der Nutzungsphase	Expertenaussagen, begründete Schätzung	3	
Datenqualität - Gesamt	mittel	18	

9.5.9.3 EDFAs

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Expertenaussagen, begründete Schätzungen	3	
Verweildauern	Herstellerangaben	3	
Metallkonzentrationen	Expertenaussage	2	
Exporte aus der Nutzungsphase	Expertenaussagen, begründete Schätzung	3	
Datenqualität - Gesamt	mittel	11	

9.5.10 Photovoltaik

Die zu Photovoltaikzellen erhobenen Daten weisen insgesamt eine hohe Aktualität auf.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Veröffentlichungen des BMU, wissenschaftl. Veröffentlichungen, graue Literatur	6	
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, Studien zur Lebensdauer, Herstellerangaben	7	
Metallkonzentrationen	Herstellerangaben, wissenschaftliche Veröffentlichungen	7	
Exporte aus der Nutzungsphase	<i>nicht relevant innerhalb des betrachteten Zeitraums</i>	(6)	

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
Datenqualität - Gesamt	hoch	26	

9.5.11 LEDs

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Die Daten basieren zwar teilweise auch auf Erhebungen der Konsumgüterforschung. Da jedoch Übertragungsschritte notwendig sind für den regionalen Bezugsrahmen bzw. die im Projekt betrachteten Teilprodukte kommt eine zusätzliche Datenunsicherheit hinein.	4	
Verweildauern	Zwar sind in der Bestimmung der Verweildauern auch Herstellerangaben zur technischen Lebensdauer aufgenommen. Die tatsächliche Verweildauer basiert allerdings auf Expertenaussagen und teilweise auch auf begründeten Schätzungen.	2	
Metallkonzentrationen	Es handelt sich zwar teilweise auch um wissenschaftliche Veröffentlichungen. Die Dynamik in der Zusammensetzung und die große Spannbreite möglicher Zusammensetzungen führt zu einer zusätzlichen Datenunsicherheit (daher keine Qualität „4“).	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	Exporte sind aller Wahrscheinlichkeit nach nicht relevant. Da aber keine Daten vorliegen muss ja die Einstufung innerhalb dieses Schemas „1“ sein.	1	
Datenqualität - Gesamt	mittel	10	

9.5.12 Haushaltsanwendungen

9.5.12.1 Elektrofahrräder

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Erhebungen der Konsumgüterforschung oder von Verbänden	5	
Verweildauern	begründete Schätzungen	1	
Metallkonzentrationen	Graue Literatur	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	Keine Informationen	0	
Datenqualität - Gesamt	niedrig	9	

9.5.12.2 Nabendynamos

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Erhebungen der Verbände sowie begründete Schätzung	3	
Verweildauern	begründete Schätzungen	1	

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
Metallkonzentrationen	Graue Literatur	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	Keine Informationen	0	
Datenqualität - Gesamt	niedrig	7	

9.5.12.3 Raumklimaanlagen

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Erhebungen der Konsumgüterforschung oder von Verbänden	5	
Verweildauern	begründete Schätzungen	1	
Metallkonzentrationen	Wissenschaftliche Veröffentlichung	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	Keine Informationen	0	
Datenqualität - Gesamt	niedrig	9	

9.5.13 Keramiken

9.5.13.1 Schleifkeramiken

Die Datenlage zu Schleifkeramiken erlaubte nur eine grobe Abschätzung. Teilweise konnten keine oder nur wenige Informationen bzgl. der einzelnen Parameter erhoben werden.

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	begründete Schätzung	1	
Verweildauern	begründete Schätzung	1	
Metallkonzentrationen	Herstellerangaben	6	
Exporte aus der Nutzungsphase	<i>nicht relevant</i>	-	
Datenqualität - Gesamt	niedrig	8	

9.5.14 TBC- Stationäre Gasturbinen

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Annahmen anhand von amtlichen Statistiken bzw. Statistiken von Verbänden und Expertenaussagen	4	
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, Expertenaussagen	7	

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
Metallkonzentrationen	Herstellerangaben, wissenschaftliche Veröffentlichungen, graue Literatur, Expertenaussagen	8	
Exporte aus der Nutzungsphase	<i>nicht relevant</i>		
Datenqualität - Gesamt	hoch	19	

9.5.15 TBC- Flugzeugtriebwerke

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Annahmen anhand von Herstellerangaben (-statistiken) und Expertenaussagen	3	
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichungen, Herstellerangaben	7	
Metallkonzentrationen	Herstellerangaben, wissenschaftliche Veröffentlichungen, graue Literatur, Expertenaussagen	8	
Exporte aus der Nutzungsphase	<i>nicht relevant</i>	-	
Datenqualität - Gesamt	hoch	18	

9.5.16 Absorbermaterial, Kontrollstäbe

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	graue Literatur	3	
Verweildauern	Expertenaussage	2	
Metallkonzentrationen	Hersteller- und Expertenangaben	6	
Exporte aus der Nutzungsphase	graue Literatur	3	
Datenqualität - Gesamt	mittel	14	

9.5.17 Hochtemperatursupraleiter

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	graue Literatur,	3	
Verweildauern	graue Literatur	3	
Metallkonzentrationen	graue Literatur	3	
Exporte aus der Nutzungsphase	graue Literatur	3	
Datenqualität - Gesamt	mittel	12	

9.5.18 Rechenzentren

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Wissenschaftliche Veröffentlichung	6	
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichung	6	
Metallkonzentrationen	Wissenschaftliche Veröffentlichung	4	
Exporte aus der Nutzungsphase	begründete Annahme	2	
Datenqualität - Gesamt	mittel	18	

9.6 Aufbereitungsverfahren und Verfahren zur Metallrückgewinnung

Insofern weitere verfahrenstechnische Informationen für die identifizierten Technologien vorlagen, wurde dies in der Spalte „Prozessart“ stichpunktartig vermerkt. Verfahren, welche ReStra-Produkte aufbereiten, aber erzeugte Zwischenprodukte letzten Endes momentan nicht der Rückgewinnung der ReStra-Metalle dienen, sind mit aufgeführt.

Tabelle 256: Aufbereitungsverfahren und Verfahren zur Metallrückgewinnung

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ga	Nalco, Angul	IN	Industriemaßstab für Produktionsabfälle	Ablauge der Aluminiumoxid-Raffinerie	Hydrometallurgisch					Re-Pro2013
Au, (Ag, Pb, Pb-Sn-Zn-Mischoxid)	Montanwerke Brixlegg	AT	Industriemaßstab	Altmetalle	Pyro- und Hydrometallurgie		Au, (Ag, Pb, Pb-Sn-Zn-Mischoxid)			Re-Pro2013
Au	DERA und BGR; Prof. Axel Schippers (BGR)	DE	in Bezug auf Abfälle im Labor- bzw. Pilotmaßstab; einige Metall-Biologungsverfahren zur Metallgewinnung aus Industrieabfällen bereits patentiert	Aufbereitungsrückstände, Metalle aus industriellen Rückständen und Abfällen wie Flugaschen der Abfallverbrennung, Schlacken, Galvanikschlamm, aber auch aus Elektronikschrott	Biolaugung, Biotechnologisches Verfahren; Aufbereitung mit autotrophen und/oder heterotrophen Mikroorganismen "Bio-mining"		Au	x		Euwid 2011c, AMS 2009
	Xstrata-Kidd Metallurgical Division, Timmins	CA	Industriemaßstab	kupfer- und edelmetallhalt. Altmaterialien	Pyro- und Hydrometallurgie			x	x	Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ga, In	Preussag Pure Metals, Langelsheim	DE	Industriemaßstab für Produktionsabfälle	Nebenprodukte anderer Metallindustrien, Schrotte und Rückstände aus der Waferbearbeitung	chemische Auflösung - Elektrolyse - Hydrometallurgie		Ga, In			Re-Pro2013
Nd, Pr, Tb, Dy *1	Shin Etsu, Tokyo	JP	Industriemaßstab für Produktionsabfälle, Kompressoren und Klimaanlagen	Recycling von Produktionsabfällen, Kompressoren und Klimaanlagen (z.B. Permanentmagneten)	Pyro- & Hydrometallurgie		SE			Re-Pro2013, Tagesanzeiger 2010
Pd, Ga, In, Au, Rh, Pt, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Ce, La	Ecoloop GmbH Goslar	DE	Anlage zur Gewinnung v. hochw. Synthesegas aus PVC-Abf. in Betrieb, E-Schrott mgl., Verf. patent.	Schrott, E-Schrott, EAG, Aschen	Schrott und kohlenstoffhaltige Materialien werden in einem Gegenstromvergaser mit Schüttgutwandlerbett, der Red.- und Oxidationszone aufweist, in Gegenwart von alkal. St. unter reduktiven Gesamtbed. ($\lambda < 1$) oxidiert		"...Metalle, Edelmetalle und Metalle der seltenen Erden werden als Oxide und/oder in elementarer Form zumindest teilweise an den alkalischen Stoffen gebunden. Schließlich werden sie durch physikalische Trennmethode aus dem Prozess als angereichertes Gemisch gewonnen."	x	x	DEPATIS 2012a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
La, Ce, Pr, Nd oder Gemische davon	Santoku Metal Industry Co. LTD., Kobe	JP	Patent	SE und Nickel enthaltender Legierungsschrott	Hydrometallurgisch Lösen der SE enthaltenden Legierung in einer Säure (meist Salzsäure), pH-Wert < 5, Metalle gehen bereitwillig und rasch in Lösung		Selten Erden-Metalloxalate		x	DEPATIS 2000
Metallhaltige Schlacke mit Edelmetallen	Currenta, Krefeld-Uerdingen	DE	Verfahren zum Patent angemeldet, Pilotanlage	Sonderabfall/E-Schrott	thermische Abtrennung von Metallen bei der Sonderabfallverbrennung	Abfälle müssen vorsortiert werden, da jede Abfallsorte eigene Prozessparameter hat	metallhaltige Schlacke frei von Schadstoffen	x		Recycling magazin 2010
Ga	Magyar Aluminium, Ajka	HU	Industriemaßstab für Produktionsabfälle	Nebenprodukt des Bayer-Prozesses zur Aluminiumproduktion	Hydrometallurgisch					Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Keine spezifischen Stoffangaben *2	KALI Umwelttechnik GMBH, Sondershausen	DE	Patent	Batteriemodule Nickel-Metallhybrid-Traktionsbatterien	Zerkleinerung der Batteriemodule mit anschl. thermischer Beh., Siebklassierung, saure Laugung der Feinfraktion unter Gewinnung eines für die Regeneration der Negativelektrode brauchbaren Löserückstandes sowie einer Laugungslösung, aus der Fe, Mn und SE durch Elektrolyse gewonnen werden		Laugungslösung, aus der Fe, Mn und SE durch Elektrolyse gewonnen werden Dabei werden durch das mehrstufige Aufbereitungsverfahren nacheinander eine Eisen-Nickelfraktion mit geringem Kobaltanteil, ein Löserückstand aus Nickel, Kobalt, Seltenen Erden und wenig Eisen als Ausgangsmaterial für die Regeneration der Negativelektrode, ein kobaltarmes Nickel-Ammoniumsulfat als Ausgangsmaterial für die Regeneration der positiven Elektrode und eine Kobaltfraktion wieder gewonnen	x	x	DEPATIS 2006a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
La, Nd, Dy, Pr, Sm, Ce etc. oder Mischungen aus denselben	TreibacherAuermetProduktions-ges. m.b.H., Varta Batterie AG	AT, DE	Patent	NiMH-Batterien	mechanische Zerkleinerung, Herstellung Grobfraction und Feinfraction, Feinfraction wird mittels einer starken Säure in Lösung gebracht, Extraktion der Metalle schrittweise durch selektive Fällung und/oder Flüssig-Flüssig-Extraktion		Seltenerdchlorid oder Seltenerdoxid, welches einer elektrometallurgischen Reduktion zum Seltenerdmetall oder zu einer Mischung aus mehreren derselben (Mischmetall) unterworfen wird		x	DEPATIS 1996
Keine spezifischen Stoffangaben*2	Mitsui Metal Mining Co	JP	Pilot-/geplante Anlage	NiMH-Batterien	Unklar		SE			Re-Pro2013
Keine spezifischen Stoffangaben*2	Lyman u Palmer, 1995	?	unklar	NiMH-Batterien	Hydrometallurgie, Laugung von SE mit 4M Salzsäure		SE-Salze			Bin-nemans et al. 2013a
Keine spezifischen Stoffangaben*2	Zhang et al., 1999	?	unklar	NiMH-Batterien	Hydrometallurgischer Prozess		SE-Oxide			Bin-nemans et al. 2013a
Keine spezifischen Stoffangaben*2	Li et al., 2009	?	unklar	NiMH-Batterien	Hydrometallurgischer Prozess (3-molarer Schwefelsäure, Solvent Extraktion)		SE-Chlorid-Lösung			Bin-nemans et al. 2013a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
La, Ce	Kanamori et al., 2009	?	unklar	NiMH-Batterien	Hydrometallurgi-scher Prozess		Lanthan- und Cer-Oxide			Bin-nemans et al. 2013a
Keine spe-zifischen Stoffanga-ben *2	Provazi et al., 2011	?	unklar	NiMH-Batterien	Hydrometallurgi-scher Prozess		SE			Bin-nemans et al. 2013a
Keine spe-zifischen Stoffanga-ben *2	Umicore AG & Co KG (Hoboken) und Rhodia	BE, FR		NiMH-Akkus	Kombination des patentierten Ultra-hochtemperatur-Batterie-Recycling-prozesses von Umicore mit Rhodias Know-how in der Raffinierung von Seltenen Erden; Nach der Abtren-nung von Nickel und Eisen von den Seltenen Erden, werden diese durch Umicore in ein hochwertiges Kon-zentrat umgewan-delt welches in der Anlage von Rhodia in La Rochelle (Frankreich) in Sel-tene-Erden-Materi-alien veredelt wird		SE-Konzentrat zu-Selten-Erden-Mate-rialien veredelt	x	x	Recycling magazin 2011

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Mischmetall-Schlacke mit (mit La, Ce, Nd, Pr)	RWTH-UVR-Verfahren und UVR-FIA GmbH	DE		NiMH-Alt Batterien	Kombination mechanischer, pyrometallurgischer sowie hydrometallurgischer Verfahrensschritte Zerkleinerung der Batterien in Hammermühle; Nasssiebung mit SE im Feinanteil; Zugabe spezieller Schlackenbildner im Lichtbogenofen zu einer Nickel-Kobalt-Legierung sowie einer Schlacke umgeschmolzen, in der sich die Seltenen Erden bereits zu 85 Prozent angereichert haben		Schlacke mit SE	x		Vest et al., 2010 Heegn et al., 2003

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Keine spezifischen Stoffangaben *2	Honda und Japan Metals & Chemicals Co. Ltd. (JMC), Tokio	JP	unklar, aber bereits 400 NiMH-Bat. aus Neuwagen (beim Erdbeben zerstört) recycelt, Recycling von Produktionsabfällen	NiMH-Batterien von Hybrid-Autos	Schmelzflusselektrolyse Rückgewinnung von SE-Oxiden aus NiMH-Akkus weiterentwickelt, so dass SE direkt für neue NiMH-Akkus für Hybridautos wiederverwendet werden können (80% der SE mit >99% Reinheit zurückgewonnen)		SE	x	x	Recyclingmagazin 2013a, Euwid 2013c
Keine spezifischen Stoffangaben *2	Umicore, Olen	BE	Industriemaßstab	Batterien	Ultra-Hochtemperatur-Schmelz-Technologie zur Schlackengewinnung		Oxid-Schlacken mit u.a. Seltenen Erden werden in eine spezifische Schlackeaufbereitungsanlage von Umicore zur SE-Rückgewinnung gegeben	x	x	Bin-nemans et al. 2013a
Au, (Ag)	Wesermetall, Nordenham	DE	Industriemaßstab für Produktionsabfälle	Bleipaste von Harzmetall	Pyrometallurgischer Prozess				x	Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ce	Terzievand Min-kova, 1997	?	?	Cer-Oxid-Polier-Pul-ver-Abfall	Hydrometallurgi-scher Prozess Lösen des Pulvers in Salpeter-säure/Wasserstoff-peroxid-Mixtur, SE lösen sich als Car-bonate, diese wer-den durch Kalzina-tion in Oxide umge-wandelt		Cer-Oxid-Polier-Pul-ver	x		Bin-nemans et al. 2013a
Ce	Kato et al., 2000	?	?	Cer-Oxid-Polier-Pul-ver-Abfall	Hydrometallurgi-scher Prozess Cer-Oxid-Polierpul-ver mit konzentrier-ter Natronlauge 1h bei 50-60°C be-handelt, Alumi-nium- und Silizi-umoxid gehen in Lösung, Cer-Oxid wird durch Filtra-tion rückgewonnen		Cer-Oxid-Polier-Pul-ver	x		Bin-nemans et al. 2013a
Ce	Kim et al., 2011	?	?	Cer-Oxid-Polier-Pul-ver-Abfall	Hydrometallurgi-scher Prozess (Schaumflotation und Lösung in konz. Natronlauge)		Cer-Oxid-Polier-Pul-ver	x		Bin-nemans et al. 2013a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ce	Adachi and co-workers; Ozaki et al., 1999	?	?	Cer-Oxid-Polier-Pulver-Abfall	Hydrometallurgischer Prozess Rückgewinnung von Polierpulver (Chlorierung der SE mit einer Chlor-Stickstoff-Gas-Mischung, gefolgt von einer Gasphasenabscheidung)		Ce	x		Bin-nemans et al. 2013a
La, Y und Gd	Jiang et al. 2004, 2005	?	?	optisches Borosilicatglas (43,12m% La ₂ O ₃ , 9,37m% Y ₂ O ₃ , 4,60m% Gd ₂ O ₃)	hydrometallurgischer Prozess, beruht auf der Umwandlung der SE zu unlöslichen SE-Hydroxiden durch heiße konz. Natronlauge (55 Gew-%) bei 413 K, gefolgt von der Laugung der SE-Hydroxide durch heiße 6M Salzsäure-Lösung bei einer Temp. über 363 K, dieser Vorgang ergibt eine wässrige Lösung von SE-Chloriden (in SE-Trennanlage)		SE-Chlorid-Lösung		x	Bin-nemans et al. 2013a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ga, In	Molycorp, Peterborough	CA	Industriemaßstab für Produktionsabfälle	minderwertige Herstellerabfälle und -rückstände	Hydrometallurgie					Re-Pro2013
In	ohne konkrete Nennung ausführender Firmen	??	Industriemaßstab	ITO aus Sputter-Prozess (Kathodenzerstäubung)	ITO-Target Recycling (Produktionsabfall)		In		x	Euwid 2010, Elsner et al. 2010
In, Ga	Akita Rare Metals (Dowa Group), Furumichi-Shimokawabata, Akita	JP	Industriemaßstab für Produktionsabfälle	ITO-haltige Produktionsabfälle	Pyrometallurgie		In, Ga		x	Re-Pro2013
Rh, Pd, Pt	Duesmann& Hensel Recycling GmbH (DHR) und Duesmann& Hensel International GmbH (DHI), Aschaffenburg	DE	Industriemaßstab	(Auto)-Katalysatoren und andere edelmetallhaltige Materialien (Dieselpartikelfilter, Lambdasonden)	mechanische Zerkleinerung; Wertbestimmung im Analyselabor;		homogenisiertes, wertbestimmtes Material, welches in externe Schmelzhütte/Scheidebetrieb (pyrometallurgisches Verfahren) gegeben wird zur Gewinnung von Pt, Pd und Rh	x	x	Euwid 2011a, Duesmann& Hensel o.A., Schöne 2013
PGM	Nippon PGM (Dowa group), Otarube, Kosaka, Akita Prefecture	JP	Industriemaßstab	Alte Katalysatoren	Pyrometallurgie		PGM		x	Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ce, Tb	F&E Autokatre-cycling: Firma Zimmer-Katalysator Recycling	DE	Forschung, welche Mengen zu erwarten sind	Autokatalysatoren	Forschung an der Optimierung des Kat-Recyclings hinsichtlich der potenziellen Rückgewinnung der Nebenmetalle (z.B. Cer und Terbium)	Inputmaterial muss gleichbleibende Zusammensetzung haben, derzeitige Rückgewinnung der Nebenmetalle noch nicht wirtschaftlich			x	Zimmer 2012
Pt, Pd, Rh	Schopf, Walter, Dipl.-Ing., Grävenwiesbach	DE	Patent	edelmetallhalt. Katalysatoren	Vorrichtung zur Identifikation und Selektierung gebrauchter Kfz-Katalysatoren mit Einrichtungen zur Freilegung, Erkennung und Rückgewinnung der Inhaltswertstoffe		identifizierte, klassifizierte und sortierte und vorbereitete Katalysatoren zur Weitergabe zum geeigneten Recycling	x		DEPATIS 2012b
Pd	Universita' Degli Studi di Trieste, Trieste	IT	Patent	edelmetallhalt. Katalysatoren	Hydrometallurgisch Palladiumrückgewinnung in einem einzigen Schritt (Vorbehandlung zur Palladiumauflösung wird vermieden)		Paladium ist gelöst und wird mit Addukten extrahiert	x	x	DEPATIS 2008
Au, Pt, Pd, (Ag)	EHR GmbH & Co. KG, Augsburg	DE	Industriemaßstab	edelmetallhalt. Katalysatoren, Schmuck	Pyrometallurgischer Prozess				x	Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
La, Ce, Nd	He and Meng, 2011; Vierheilig, 2012	??	??	FCC-Katalysatoren	Hydrometallurgi-scher Prozess Recycling von SE aus FCC-Kats durch Laugung mit sauren Lösungen		La, Ce, Nd	x	x	Bin-nemans et al. 2013a
(Co)	Gulf chemical & Metallurgical Corp, Freeport	US	Industriemaß-stab	gebrauchte Katalysa-toren	Pyro- & Hydrome-tallurgie		(Co)		x	Re-Pro2013
Pt, Pd, Rh	Umicore AG & Co KG, Pforzheim	DE	Industriemaß-stab	Industrie- und Auto-kat.	Mobile Anlage zur Entmantelung, Zer-klenerung und Analyse auf Edel-metallgehalte der Katalysatoren		in Fässern gesam-melter Keramik-staub der Katalysa-toren, welcher nach chemischer Analyse der entsprechen-nden Edelmetall-scheidung zuge-führt wird	x	x	Euwid 2012d, DEPATIS 2006b
Au und PGM, Ga, In	Umicore, Hoboken	BE	Industriemaß-stab	Industrie- und Auto-katalysatoren, auch Recycling von E-Schrott	Pyro- & Hydrome-tallurgie	SE (vor allem Cer) gehen mit der Schlacke aus dem ersten, pyrometal-lurgischen Schritt des Recyclingpro-zesses verloren (ist nach Aussage des Autors jedoch auch weniger von Inte-resse bei diesem Verfahren)			x	Bin-nemans et al. 2013a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Pd	Jiangmen Asahi PretecKanfort Environmental Company (Joint Venture mit Asahi Holding Group), Jiangmen City, Guangdong	CN	Industriemaßstab für Industrieabfälle, nicht-post-consumer Abfällen und Prozessvorstufen	Industriekatalysatoren	?					Re-Pro2013
(Co), ggf. weitere	Nickelhütte Aue	DE	Industrie-maßstab für Industrieabf.	industrielle verbrauchte Katalysatoren	Pyro- & Hydrometallurgie		Co		x	Re-Pro2013
Au, Rh, Pd, Pt	Provaluta Metall Recycling GmbH (ehemals MWF Metallrecycling GmbH, Tochter von RecycCommodities SE), Karlsruhe	DE	Industrie-maßstab	Katalysatoren, Elektronik, Erze oder Legierungen	pyrometallurgisches Verfahren labortechnische Identifizierung des Metallgehalts im Katalysator (ICPOES-Analyse), Refining (Schmelzen) zur Gewinnung der Edelmetalle		Au, Rh, Pd, Pt	x	x	Euwid 2011c, Provaluta.o.A., ProvalutaMetall Recycling o.A.

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Edelme-talle (Pt, Pd)	Heraeus, Hanau	DE	Verfahren hat Technologie-reife erlangt	Katalysatoren, Sys-tem an unterschiedl. Einsatzmaterialien anpassbar	thermische Konditi-onierung (Vera-schen im Kammer-Ofen) und Wieder-aufbereitung (Ka-pazität: 600 Mg/a, Edelmetalle werden zu weit über 90 % zurückgeführt)		edelmetallangerei-chte Aschen wer-den in betriebsei-gener Edelmetall-scheiderei aufbe-reitet zur Gewin-nung von Pt, Pd	x	x	Euwid 2013b
Ga, Y, Rh, Pd, Pt, Eu	Sumitomo Che-mical Co	JP	Patent	Mineralsäure-Lau-gungslösung von Er-zen, Erzschlacken, Katalysatoraus-schuss	Hydrometallurgisch Kontaktieren einer stark sauren, Me-talle enthaltenden Lösung mit einem Chelatharz (dieses enthält eine Poly-merhauptkette an die eine funktio-nelle Gruppe mit dem Gehalt von ei-nem Phosphoratom gebunden ist)		Chaltaharze, wel-che Seltene Erden wie Ga, Y, Rh, Pd, Pt, Eu abtrennen können		x	DEPATIS 1993

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ge	Fraunhofer ICT (Koordinator), Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), ISC, WKI, IKTS, ISI, IGB, Pfinztal, Dresden	DE	Projekt bis 2014, Labor-reife (zuständig: IKTS)	MVA-Stäube, Katalysatoren	Projekt Molecular-Sorting - Gasfiltration, Katalysator-technologien, Entwicklung heißgas-fähiger Sensoren, mit speziell entwickeltem keramischen Filter werden bestimmte Inhaltsstoffe bei über 850 °C erst selektiv abgeschieden und nach einem Recyclingschritt möglichst als Reinprodukt wiedergewonnen		Abscheidung von u.a. Germanium an keramischen Filtern, daraus Rückgewinnung des Reinproduktes möglich		x	Recycling magazin 2013b, Umweltmagazin 2013
Y, Gd, Nd, Dy, La	Treibacher AG, Althofen	AT	Industriemaßstab	Produktionsrückstände und Industrieabfälle EAG möglich, derzeitiger Input: verbrauchte Industriekat., Kessel- oder Vergasungsrückstände, Nickel-Galvanik-Rückstände, Hochleistungskeramik, Produktionsrückstände	Pyrometallurgisch				x	DEPATIS 1980
	XstrataCopper, Montréal-East	CA	Industriemaßstab	99,1% Kupferanoden	Pyro- und Hydrometallurgie				x	Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Au, Ag, Pb	Xstrata Copper, Rouyn-Noranda, Quebec	CA	Industriemaßstab	Kupferkonzentrate aus Minen, kupfer- und edelmetallhaltige Altmaterialien	Pyrometallurgie				x	Re-Pro2013
Nd, La	Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST), Braunschweig	DE	Forschung	Dauermagnete, FCC-Kats						Euwid 2012c
Nd, Ce, Sm, Dy	Vacuumschmelze GmbH, Hanau (SE-Endprodukthersteller, Teilnahme an "MORE)	DE	Patent	Dauermagnete, Produktionsabfälle	Pyrometallurgisch		Wiederverwendung des gewonnenen Dauermagnet-Materials	x	x	DEPATIS 1999
Nd, Dy, Tb, Edelmetalle, Ce, Eu, La	Hitachi		Forschung	Festplatten, NdFeB-Magnete, Leiterplatten	Automatisch maschinelle Separierungsmethode/ Demontierung durch Aggregat, welches durch Rüttel- und Prallwirkung nahezu zerstörungsfrei Schrauben und andere Verbindungselemente löst, damit Gewinnung einzelner Bestandteile mit hohen Konzentrationen der Zielmetalle		Nd, Dy, Tb, Edelmetalle, Ce, Eu, La	x		Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Nd	Losser Chemie Hainichen (Dr. Wolfram Palitzsch (Entwicklungsmanager)), Hainichen	DE	Pilotmaßstab (Pilotanlage in Hainichen in Betrieb)	Magnete	Magnete werden vollständig in Säure gelöst und daraus Chemikalien wie bspw. Eisenchlorid, Neodymoxid und Borsäure erzeugt	Magneten sind fest integrierter Bestandteil ausgewählter Produkte und entsprechend Abfälle. Die Konstruktionen erschweren vielmals die alleinige Abtrennung der Magneten. Eine recyclinggerechte Konstruktion der Produkte sollte angestrebt werden	u.a. Neodymoxid		x	ISE 2013a; Loser 2014
Nd, Dy	Hitachi	JP	Laborversuche	Magnete von Festplatten, Motoren, Klimaanlage und andere Kompressoren	Pyrometallurgie		SE		x	Re-Pro2013
Nd, Dy, Tb, Ce, La	Gemeinschaftsprojekt von Umicore und Rhodia, La Rochelle	FR BE	Demonstrationsanlage, Gemeinschaftsprojekt mit Umicore	Magnete von Windturbinen, el. Fahrzeugen und Festplatten, NiMH-Akkus	hydrometallurgische Aufbereitung von Konzentraten (von auf das Magnetrecycling spezialisierten Partnern (Umicore))		Neodym, Praseodym, Dysprosium, Terbium	x	x	Euwid 2011b, Euwid 2012b

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Nd (NdFeB)	Universität von Birmingham (Dr. Allan Walton), Birmingham	GB	Pilotmaßstab	NdFeB-Magnete aus Festplatten	Feststoffintern mit Wasserstoff (Urform-Fertigungsverfahren), Extraktion von NdFeB (Zusammensetzung Nd ₂ Fe ₁₄ B) bei Raumtemperatur unter Einsatz von Wasserstoff (1 bar H ₂) → NdFeB wird aus dem Magneten gelöst (Puderform), zu Nd ₂ Fe ₁₄ B aufbereitet		Nd (NdFeB)		x	EU-Recycling 2013
Nd	Ames Laboratory (US), Ames, Iowa	US	Industriemaßstab	Nd-Magnete	Pyrometallurgisch, Schmelze in Radiowellenofen mit Mg, SE-Reinheit 97 % (Mix)		SE, Nd		x	Re-Pro2013
Nd, Dy	Mitsubishi Electric		Forschung	Kompressoren aus Raumklimaanlagen	automatisches Zerlegen der Kompressoren mit anschließender Entfernung der Magneten		Magneten mit SE	x		Bin-nemans et al. 2013a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Edelme-talle (Pd, Pt, Rh)	Universität Gie-ßen (weitere: TU DD, Helmholtz-Z Leipzig, Uni Tomsk (Rus), Me-socosm GmbH Homberg und Re-notherm GmbH Kempen), Gießen	DE	Forschung (Projekt NANO-POP)	metallhaltige Abfälle und Abwasser, An-wendung auf EAG un-klar	Biometallurgisch Bioleaching: Ein-satz schwermetall-toleranter Bakte-rien, mikrobielles Wachstum, Metall-reduktion und Bil-dung von Nanopar-tikeln läuft parallel ab; Edelmet-Nano-partikelkat. soll für Entfernung langle-biger Schadstoffe u pathogener MO ein-gesetzt werden (Vorteile: geringer Energieaufwand, kein Einsatz giftiger Chemikalien)		Edelmetall-Nano-partikel	x		Euwid 2013a
(Ta)	Buss&Buss, Sagard	DE	Industriemaß-stab für Pro-duktionsab-fälle	Produktionsabfälle	Pyrometallurgie		(Ta)		x	Re-Pro2013
Ta	H.C. Starck, Go-slar/München	DE	Industriemaß-stab für Pro-duktionsab-fälle	Produktionsabfälle und Schrotte	Pyro- & Hydrometal-lurgie		Ta	x	x	Re-Pro2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
SE (im Projektmaßstab Nd), Edelmetalle	Fraunhofer ICT-Pfintal (Koordinator), Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), ISC, WKI, IKTS, ISI, IGB, Stuttgart	DE	Projekt bis 2014, Laborreife (zuständig: IGB))	niedrig konzentrierte Metalllösungen	Projekt Molecular-Sorting - Extraktion mittels Mikroorganismen (Bio-leaching), Adsorption, Membrantechnologie, elektrophysikalische Trennung (Elektrophorese/ Elektrolyse) gezielte Rückgewinnung von Metallen aus Salzen		abgetrennte Rohstoffkleinstmengen (SE, Edelmetalle)		x	Recyclingmagazin 2013b

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Pt	National Chung Hsing University in Taiwan (Jing-Fang Huang und Hao-Yuan Chen), Taiwan	CN	Labormaßstab	platinhaltige Reststoffe	elektrochemische Auflösung von Platin in einer ionischen Flüssigkeit, gelöstes Platin lässt sich anschließend als reines Metall oder als Legierung mit Zink auf einer Trägerelektrode abscheiden (umweltschonenderes Auflösen und Recycling von Platin als bei herkömmlichen Verfahren, der Prozess soll auch auf andere Edelmetalle anpasst werden)		reines Platin oder Legierung aus Platin und Zink		x	Euwid 2012a

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Ga	M. Stelter und O. Zeidler	?	?	Gallium aus Prozessrückständen (Ätzlösungen der Herstellung v. Ga-Wafer u -Chips)	hydrometallurgischer Prozess, Feststoffe in wässrige Phase überführen u. Raffination; Gewinnung metallisches Ga durch Elektrolyse; Hochreinigung durch gerichtete Erstarrung; Nutzung freier Restsäure u -lauge entlastet die Abwasserbehandlung und erspart den Einsatz v. Laugungschemikalien beim Recycler	hohe Verbrauch an NaOH und HCl	Ga-Lösung in wählbarer Matrix	x	x	Stelter et al. 2013
SE ohne Einzelnenennung (inputabhängig)	Rhodia, La Rochelle	FR	Demonstrationsanlage	Industrie-Schlacke aus Hochöfen	Solventextraktion		Seltene Erden	x	x	ISE 2013c

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
SE ohne Einzelnen-nung (in-putabhän-gig)	Firma Tartech (Berlin) und Stadtreinigung Hamburg (Dr. Stefan Lübben (SR Hamburg) Claus Gronholz (Tartech Chefingenieur)), Hamburg	DE	Pilotmaßstab (Anlage für April 2014 ge-plant)	MVA-Asche	Mechanisches Ver-fahren, Aschepartikel sollen mit einer Geschwindigkeit von 1000 km/h auf einen Rotor ge-schleudert werden, wodurch minerali-sche Anhaftungen abspringen, übrig bleibt der metalli-sche Kern, daraus Fe- und NE-Metalle abgeschieden, übrig bleiben sollten SE		Metallpartikel von SE		x	ISE 2013c
Au (SE ge-plant), nachgewie-sen: Au, Pt, Rh, Pd, Gd, Nd, Y, Ga, Ge, In	ZAR und Kezo, Hinwil (Zürich)	CH	Großanlage soll in Hinwil realisiert wer-den (2014 in Betrieb), ge-plant Kapazi-tät: 100.000 Mg/a	MVA-Schlacke	Thermorecycling (Thermo-re): ther-mischer Aufschluss im Verbrennungs-ofen und trockener Schlackenaustrag, Ziel: max. Metall-rückgewinnung	in Deutschland wer-den deutlich mehr Metallfraktionen über Separat-sammlungen er-fasst als in der Schweiz, schwierig zu sagen, ob das Thermorecycling hier wirtschaftlich ist	Gold wird bereits gewonnen (aus 40.000 Mg Schla-cke/a werden 10 kg Gold separiert, Potenzial (81 kg/a) noch nicht voll aus-geschöpft; Poten-zial Nd: 1,5 Mg/a)	x	x	Euwid 2013c, Umwelt Perspek-tiven 2013

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
Dy, Nd	Fraunhofer ICT (Koordinator), Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), ISC, WKI, IKTS, ISI, IGB, Pfinztal, Holzkirchen/ Stuttgart	DE	Projekt bis 2014, Labor-reife (Versuchslabor Holzkirchen, IBP), Techni-kumsmaßstab (Behandlungs-kaskade) ge-plant, An-schlussprojekt für Demonstra-tionsanlage ab 2016 bean-tragt	MVA-Schlacke, feste Verbunde (Kupfererz und Wirtsgestein), Ziel Schlackeverwer-tung als Zementer-satz	Projekt Molecular-Sorting - Elektro-dynamische Fragmen-tierung durch ultra-kurze Hochleis-tungsimpulse, Druckwelle sprengt Material entlang der Korngrenzen auf, aus der Feinfraktion ist pot. SE-Gewin-nung möglich	geeignete Prozess-wasseraufbereitung wird benötigt um vor allem Chloride und Sulfate effektiv abzuscheiden, Energieverbrauch muss minimiert werden (derzeit 3-4 kWh/Mg, (bvT me-chanische Aufberei-tung kommt mit 2-3kWh/Mg aus)), Technologie wird dennoch als Ansatz für die Recycling-wirtschaft der Zu-kunft gesehen (Sze-narioanalyse für 2030 selbst im Fall "Gewinn über Nachhaltigkeit" po-sitiv)	Feinfraktion der Schlacke aus der im folgenden Schritt SE zurück-gewonnen werden können	x		Recycling maga-zin2013b
	RWTH Aachen	DE	Projekt, Ver-suchsanlage (Salzgitter)	Siedlungsabfälle	Saturn Projekt, Auf-bereitung von NE Metall Vorkonzent-raten aus mech. Behandlung von Siedlungsabfällen (MBA), sensorge-stütztes Sortierver-fahren		hochwertige Sor-tierprodukte zum Einsatz in der Me-tallurgie (je nach Input z.B. Al, Cu, Zn sortenrein in ver-schiedenen Quali-täten	x		ReSource 2012

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
In, Ga, (Cd, Te)	Firma Loser Chemie (Dr. Wolfram Palitzsch), Langenweißbach	DE	Verfahrensansätze, geplante Anlage	Dünnschichtsolarzellen (perspektivisch auch Katalysatoren, Permanentmagnete, Elektroschrott)	Hydrometallurgisch	die Dünnschichtmodule werden gewöhnlich zerkleinert; Aus diesem Verbundmaterial die strategischen Metalle verfügbar zu machen ist schwierig umzusetzen Siliziummodule gelangen gewöhnlich zum Flachglasrecycling; die hierbei entstehenden Kunststoff-Aufbereitungsreste können zur Al- und Ag-Rückgewinnung genutzt werden (nicht großtechnisch umgesetzt)	Polymetallsalzlösungen zur weiteren Aufbereitung	x		ISE 2013b, Loser 2014
In, Ga (Ge?)	Lobbe Industrieservice	DE	Anlage zum großtechnischen Recycling geplant	kristalline und Dünnschichtsolarzellen	Mit dem zum Patent angemeldeten Verfahren sollen durch Kaltver sprödung und Säurewäsche die Metalle der Solarzellen mit einer hohen Qualität zurückge wonnen werden		Metallsulfid- oder Metallhydroxid-Fällprodukt als Schlamm nach der Kammerfilterpresse	x	x	DEPATIS 2012c

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Metalle	Firmenname/ Information durch	Land	Technologie-reife	Inputmaterial	Prozessart	Hemmnisse für Technologie:	Output	Auf-ber.	Metall-rück-gew.	Quellen
unklar (evtl. In, Ga (Ge?))	Sunicon, Tochterunternehmen von Solar World, Freiberg und Bitterfeld/ Wolfen, Sola Cycle	DE	Pilotanlage in Freiberg, Industrieanlage in Bitterfeld/ Wolfen seit 2012	Solarzellen (kristallin und Dünnschicht)	Entschichtung der Module auf nasschemischem Wege durch Ausnutzung unterschiedlicher chemischer Reaktionseigenschaften			x	x	EEM 2011
	Saperatec	DE	Labormaßstab mit Erfahrungen aus anderen Verbundstoffen	PV-Module	Trennung von Glas und Halbleiterbeschichtung mit Hilfe speziell entwickelter Flüssigkeiten ab		gewonnenen Halbleiterbeschichtungen zur Weitergabe an Verwerter	x		saperatec (o.J.)
Nd, nachgewiesen auch für andere SE u Edelmetalle	Mauricio C. Palmieri a, Oswaldo Garcia Jr. a,*, Petr Melnikov	?	?		Biosorption von Seltenen Erden und Edelmetallen an Algenbiomasse		Algenbiomasse, welche in nachgeschaltete energetische Nutzung mit Aschegewinnung geht	x		Kuchta 2013

*1 Keine konkreten Angaben zu einzelnen Seltenen Erden in diesbezüglichen Quellen, daher alle allgemein üblichen SE-Metalle in Permanentmagneten entsprechend Kapitel 2.2.22 – Permanentmagneten angegeben

*2 Keine konkreten Angaben zu einzelnen Seltenen Erden in diesbezüglichen Quellen, daher alle allgemein üblichen SE-Metalle in NiMH-Batterien entsprechend Kapitel 3.2 – Erfassungs- und Rücknahmesysteme – Autokatalysatoren und Fahrzeugbatterien angegeben

9.7 Energieaufwand für die Produktion von Metallen

9.7.1 Energieaufwand für die Produktion von Gallium

Tabelle 257: KEA Primärproduktion Gallium

KEA Erneuerbare Biomasse	KEA Fossil	KEA Nuklear	KEA Primärwald	KEA Sonne	KEA Wasser	KEA Wind	Einheit
20,9840	2558,2	391,1800	0,0013	0,0910	49,6460	6,3101	MJ-Eq

Quelle: ecoinvent (2010)

Die Daten beinhalten die Produktion und Reinigung von reinem Gallium (99.9999%) durch hydrometallurgische Prozesse (Rhône-Poulenc-Prozess) (ecoinvent 2010).

Daten zur Sekundärproduktion liegen nicht vor.

9.7.2 Energieaufwand für die Produktion von Germanium

In der Literatur konnten keine KEA-Werte zur Primär- und Sekundärproduktion von Germanium gefunden werden.

9.7.3 Energieaufwand für die Produktion von Gold

Tabelle 258: KEA Primärproduktion Gold

Vorkommen	KEA Erneuerbare Biomasse	KEA Fossil	KEA Nuklear	KEA Primärwald	KEA Sonne	KEA Wasser	KEA Wind	Einheit
- Australien	3.251,10	192.650,00	21.306,00	0,2634	2,3436	2.429,10	106,56	MJ-Eq
- Kanada	24.316,00	160.600,00	77.908,00	0,13704	0,90762	42.865,00	1921,00	MJ-Eq
- Tansania	1.901,00	214.010,00	6.638,70	0,3773	1,4591	1.301,40	89,6740	MJ-Eq
- USA	3.170,90	231.210	37.480	0,26498	7,1347	3.999,7	226,47	MJ-Eq
- Südafrika	2.895,3	145.540	32.244	0,073345	2,6272	2.228	82,4930	MJ-Eq

Quelle: ecoinvent (2010)

Die oben genannten Daten beschreiben die Goldgewinnung in Australien, Kanada, Tansania, USA und Südafrika. Sie beinhalten Energie- und Wasserverbrauch, Landnutzung, Transporte, Abfallbeseitigung sowie Emissionen in Luft und Wasser (ecoinvent 2010).

Gold kann durch entsprechende Verfahren aus Goldlegierungen, goldführenden Produktionsabfällen und vergoldeten Materialien wiedergewonnen werden (Wittmer et al 2010). Wie in der folgenden Tabelle zu erkennen ist, variieren die Umweltbelastungen je nach rezykliertem Produkt. Nach (ecoinvent v2.2 in UNEP 2013b) kann bei der Sekundärproduktion von Gold der Energieaufwand bis zu 98 % unter dem Energieverbrauch der Primärproduktion liegen.

9.7.4 Energieaufwand für die Produktion von Indium

Tabelle 259: KEA Primärproduktion Indium

KEA Erneuerbare Biomasse	KEA Fossil	KEA Nuklear	KEA Primärwald	KEA Sonne	KEA Wasser	KEA Wind	Einheit
14,3550	1851,1	401,8400	0,0019417	0,041058	303,26	2,6781	MJ-Eq

Quelle: ecoinvent (2010)

Diese Daten beinhalten die Produktion von Indium durch Zink-Abbau und hydrometallurgische Prozesse. Die Infrastruktur und der Transport nach Europa sind mit einbezogen. Die Daten beschreiben die Primär-Produktion von Indium-Metall (99.999%, 5N) im europäischen Durchschnitt. Sekundärstoffe von post-consumer-Abfällen werden nicht berücksichtigt (ecoinvent 2010).

Der Abbau und die Aufbereitung der Zinkerze zur Indiumproduktion verursachen zwar Umweltbelastungen, jedoch werden als Ursachen des Abbaus und der Aufbereitung im Allgemeinen die Gewinnung der Hauptprodukte angesehen (Zink, Zinn, Kupfer, Blei). Eine Allokation der Umweltbelastungen nach Metallern bewirkt, dass dem Indium nur Umweltbelastungen von geringerem Umfang zugeordnet werden (Wittmer et al. 2010).

9.7.5 Energieaufwand für die Produktion von PGM

Tabelle 260: KEA Primärproduktion PGM

Vorkommen	KEA Erneuerbare Biomasse	KEA Fossil	KEA Nuklear	KEA Primärwald	KEA Sonne	KEA Wasser	KEA Wind	Einheit
Palladium (Russland)	1841,1000	129020,00	40199,00	1,7884	10,5860	4821	738,49	MJ-Eq
Palladium (Südafrika)	2907,1	135490	63289	0,48868	16,6820	7423,1	1165,3	MJ-Eq
Platin (Russland)	2739,6	192000	59817	2,6610	15,7520	7173,8	1098,9	MJ-Eq
Platin (Südafrika)	4323,6	201500	94128	0,72679	24,81	11040	1733,2	MJ-Eq
Rhodium (Russland)	6000,4	420540	131000	5,8299	34,4980	15711	2406,6	MJ-Eq

Recyclingpotenzial strategischer Metalle

Vorkommen	KEA Erneuerbare Biomasse	KEA Fossil	KEA Nuklear	KEA Primärwald	KEA Sonne	KEA Wasser	KEA Wind	Einheit
Rhodium (Südafrika)	9470,2	441370	206170	1,5920	54,3420	24181	3796,2	MJ-Eq

Quelle: ecoinvent (2010)

Diese Daten beinhalten den Abbau und die Aufbereitung sowie die Entsorgung von Abraum und Bergematerial. Ebenso beinhalten die Daten den Metallurgie-Schritt mit der Entsorgung der Schlacke, mit der Infrastruktur und der Trennung der Co-Produkte Nickel und Kupfer, sowie den Veredelungs-Schritt der den gewünschten PGM-Mix ergibt (ecoinvent 2010).

Tabelle 261: KEA Sekundärproduktion PGM

Metall	KEA Erneuerbare Biomasse	KEA Fossil	KEA Nuklear	KEA Primärwald	KEA Sonne	KEA Wasser	KEA Wind	Einheit
Palladium	155,61	8798,5	4656,1	0,0055812	1,2290	547,16	85,53	MJ-Eq
Platin	155,59	8796,8	4655,2	0,0055802	1,2288	547,05	85,5140	MJ-Eq
Rhodium	156,82	8866,9	4692,3	0,0056246	1,2386	551,41	86,1950	MJ-Eq

Quelle: ecoinvent (2010)

Diese Daten beschreiben die Sammlung von Autokatalysatoren in Deutschland, die Demontage der Katalysatoren, sowie einen pyrometallurgischen Prozess, gefolgt von einem hydrometallurgischen Reinigungsschritt. Die Daten beinhalten einen Sammelschritt, mit dem Transport des Abfalls zum Zwischenhändler, sowie einen Aufbereitungsschritt und einen metallurgischen Schritt (ecoinvent 2010). Die Umweltbelastungen der Primär- und der Sekundär-Produktion von Platingruppenmetallen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Man erkennt, dass das Recycling allgemein ein relevantes Potenzial zur Senkung der Umweltbelastungen mit sich bringt.

Tabelle 262: Umweltbelastungen der Primär- und Sekundärproduktion von Platingruppenmetallen im Vergleich

Betrachtungsbereich	Einheit	Ohne Allokation	Nach Allokation zu Pt	Nach Allokation zu Pd	Nach Allokation zu Rh	Nach Allokation zu PGMs
Primärproduktion in t/t PGMs	CO ₂ eq	41,350.84	39,892.65	7,221.62	46,829.35	23,451.09
	SO ₂ eq	7267.15	1942.92	1,545.12	2,308.42	1,792.31
	TMR	593,090.23	683,564.91	99,891.12	802,707.88	388,602.19
Sekundärproduktion in t/t PGMs	CO ₂ eq	4,407.40	2,875.36	787.71	3,322.04	1,851.46
	SO ₂ eq	39.86	26.01	7.12	30.05	16.75
	TMR	13,974.25	8,738.82	2,394.01	10,096.40	5,626.99
Verhältnis Primär/Sekundär	CO ₂ eq	9.38	13.87	9.17	14.10	12.67
	SO ₂ eq	182.31	74.71	216.88	76.83	107.03
	TMR	42.44	78.22	41.73	79.50	69.06

Quelle: Saurat und Bringezu (2008)

Die Rückgewinnung erfolgt zudem, wie aus der folgenden Tabelle zu entnehmen ist, mit einem wesentlich geringeren Energieaufwand.

Tabelle 263: Energieeinsparung beim Recycling von PGM

Metall	Energieeinsparung
Palladium	92 – 98%
Platin	95%
Rhodium	98%

Quelle: ecoinvent v2.2 in UNEP 2013b, S. 86

Die Primärproduktion von Palladium erfolgt aus niedrig konzentrierten Erzen. Dagegen sind die Palladiumkonzentrationen in Altgeräten sehr viel höher und die Rückgewinnung erfolgt mit einem sehr viel geringeren Energieeinsatz (entsprechend einem geringeren Kohlendioxid-Äquivalent) (Wittmer et al. 2010).

9.7.6 Energieaufwand für die Produktion von Seltenen Erden

Tabelle 264: KEA Primärproduktion Seltene Erden

Metall	KEA Erneuerbare Biomasse	KEA Fossil	KEA Nuklear	KEA Primärwald	KEA Sonne	KEA Wasser	KEA Wind	Einheit
- Cer	2,8616	139,4	15,5460	0,14302	0,0036843	2,3403	0,25496	MJ-Eq
- Dysprosium	/	/	/	/	/	/	/	
- Erbium	/	/	/	/	/	/	/	
- Europium	8,9982	986,41	89,3860	0,14374	0,020268	13,4070	1,3998	MJ-Eq
- Gadolinium	8,9982	986,41	89,3860	0,14374	0,020268	13,4070	1,3998	MJ-Eq
- Lanthan	2,9949	157,8	17,15	0,14304	0,0040446	2,5807	0,27983	MJ-Eq
- Neodym	6,7876	681,29	62,7860	0,14348	0,014294	9,4203	0,98738	MJ-Eq
- Samarium	8,9982	986,41	89,3860	0,14374	0,020268	13,4070	1,3998	MJ-Eq
- Terbium	/	/	/	/	/	/	/	
- Yttrium	/	/	/	/	/	/	/	

Quelle: ecoinvent (2010)

Die Daten der zugrunde liegenden Prozesskette beinhalten Rösten und Spalten der Seltenerdkonzentrate mit 98 % Schwefelsäure bei 500 °C in einem Drehrohrofen. Für die darauffolgende Trennung der verschiedenen Seltenerdoxide wird eine Lösemittel-Extraktion (SX) verwendet. Das erzielte Seltenerdoxid-Produkt hat eine Reinheit von bis zu 99,9 % (ecoinvent 2010).

Für die Seltenen Erden Dysprosium, Erbium, Terbium und Yttrium konnten in der Literatur keine Daten gefunden werden.