

IZT-Text 7-2018

Recycling von Technologiemetallen

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Sg	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uug	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

↓

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Fallstudie

IZT-Text 7-2018

Recycling von Technologiemetallen

Fallstudie

Autor
Siegfried Behrendt

Berlin, 2018

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „Evolution2Green - Transformationspfade zu einer Green Economy: den Pfadwechsel gestalten“. Das Projekt wurde von adelphi gemeinsam mit dem IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und dem Borderstep Institut im Rahmen des vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Schwerpunktprogramms "Nachhaltiges Wirtschaften" der Sozial-Ökologischen Forschung durchgeführt (SÖF; Förderkennzeichen FKZ 01UT1407).



© 2018 IZT - Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie.
Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-941374-41-6

Herausgeber:

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH,
Schopenhauerstr. 26, 14129 Berlin
Tel.: 030-803088-0, Fax: 030-803088-88, E-Mail: info@izt.de

Abbildung Titel: © UNEP (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

Kurzfassung

Die vorliegende Transformationsfeldanalyse wurde im Rahmen des Projekts „Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy: den Pfadwechsel gestalten“ angefertigt. Als eine von vier Studien aus dem Bereich Rohstoffe untersucht sie das Recycling von Technologiemetallen. Zusammen mit der Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft führt die Verbreitung von Umwelttechnologien zu einer zunehmenden Nachfrage nach Technologiemetallen. Sie sind aufgrund ihrer Eigenschaften für die Funktionalität von Umwelttechnologien unerlässlich. Allerdings ist die Rohstoffversorgung mit Technologiemetallen keineswegs sicher und könnte deshalb zu einem Hemmnis für eine „grüne“ Transformation werden. Obgleich Recycling von Technologiemetallen ein wichtiger Ansatz für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement ist, sind dessen Potenziale bis dato kaum erschlossen worden.

Das Papier beschreibt das Transformationsfeld sowie beteiligte Akteure. Im Rahmen der Untersuchung wurden Pfadabhängigkeiten identifiziert, die eine Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise verhindern, sowie relevante Transformationsansätze analysiert.

Das Recycling von Technologiemetallen stößt vor allem auf folgende Pfadabhängigkeiten:

- Die dissipative Verwendung von Technologiemetallen in Endprodukten erschwert das Recycling.
- Die Erfassung und Sammlung von technologiemetallhaltigen Abfällen sowie die Einsteuerung dieser Abfälle in die dafür am besten geeigneten Recyclingketten ist unzureichend. Dies gilt vor allem für Altprodukte aus dem Konsumbereich.
- Die Aufarbeitsverfahren für Altprodukte und Schrotte sind heute noch weitestgehend auf Massenströme ausgelegt. Shreddern von technologiemetallhaltigen Produkten ohne Vorzerlegung führt zur Verteilung der Technologiemetalle in alle Outputströme und damit zu großen Verlusten.
- Erhebliche Mengen der technologiemetallhaltigen Altgeräte und –produkte fließen nicht in den geregelten Stoffkreislauf zurück. Grund sind legale und illegale Exporte von Altprodukten in Entwicklungs- und Schwellenländer:
- International gelingt das Recycling von Technologiemetallen nur vereinzelt und für wenige Abfallfraktionen. Volatile Preise, wie sie zum Beispiel bei Seltenen Erdelementen festzustellen sind, verhindern Investitionen in Anlagen zum Recycling von Technologiemetallen.

Besonders stark ausgeprägt ist die Pfadabhängigkeit bei der Dissipation der Technologiemetalle. Durch die zunehmende Miniaturisierung und Leistungsverdichtung werden immer geringere Konzentrationen von Technologiemetallen für vergleichbare Funktionen verwendet. Gleichzeitig nimmt die Vielfalt der Stoff- und Materialkombinationen zu. Dadurch beschleunigt sich die Dissipation der Technologiemetalle. Die Entwicklung der Recyclingverfahren kann dem gegenüber kaum Schritt halten. Für eine Transformation weg von einem massebasierten Recycling hin zu einem Recycling, das Technologiemetalle in metallurgisch hochwertige Recyclingpfade führt, sind Öko-Design, Retro-Logistik, Pre-Shredding und globale Recyclingpartnerschaften wichtige Ansätze.

Abstract

This transformation field analysis has been conducted within the „Evolution2Green - Transformation Paths towards the Green Economy: Shaping Path Change“ project. As one out of four studies regarding the field of resources, it investigates the transformation field “Technology Metals”.

The paper describes the transformation field as well as relevant players. Path dependencies that hinder the transformation towards a sustainable economy have been identified, and relevant transformation approaches analysed.

With regards to the recycling of technology metals, especially the following path dependencies complicate the improvement of recovery rates:

- Dissipative use of technology metals, complicating the recycling process.
- The collection of wastes containing technology metals and the practice of directing them into the recycling paths best suited is insufficient. This is true especially for end-of-life consumer electronics.
- Recycling processes for end-of-life products and scraps are mostly targeted towards treating high throughput mass streams. Shredding of products containing technology metals without prior dismantling leads to the dissipation of technology metals into all output streams and high losses.
- Substantial quantities of end-of-life products containing technology metals do not enter the regulated materials cycle, due to legal and illegal exports of end-of-life products into developing and emerging nations.
- On a global scale, technology metals are successfully recycled only sporadically, targeting only a few waste fractions. Volatile prices, as they can be observed for rare earth elements, hinder investments into facilities for recycling of technology metals.

Especially the path dependency regarding the dissipation of technology metals is very dominant. With increasing miniaturisation and performance density, lower concentrations of technology metals are used to provide a given functionality. At the same time, the amount of material combinations in use is rising, which increases the dissipation of technology metals. The development of recycling processes is barely holding up. In order to transform the recycling from a high-throughput targeted recycling to a recycling that sorts technology metals into high-quality metallurgical process paths, new approaches are needed. Those include eco-design, retro-logistics, pre-comminution processes and global recycling alliances.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Transformationsfeld	8
1.1 Technologiemetalle	8
1.2 Akteure	10
1.2.1 Rohstoffmärkte	10
1.2.2 Politische Entscheidungsträger	11
1.2.3 Zivilgesellschaft	12
1.3 Historische Entwicklung	13
1.4 Umweltwirkungen	13
2 Stärken und Transformationshemmnisse des etablierten Pfades	15
2.1 Charakterisierung der Stärken des etablierten Pfades	15
2.2 Transformationshemmnisse und Pfadabhängigkeiten	16
2.2.1 Rechtliche Pfadabhängigkeiten	16
2.2.2 Ökonomische Pfadabhängigkeiten	16
2.2.3 Technologische Pfadabhängigkeiten	17
2.2.4 Organisationale Pfadabhängigkeiten	18
2.2.5 Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten	19
2.3 Angriffspunkte und Schwächen des etablierten Pfades	20
3 Transformationsansätze	21
3.1 Öko-Design	21
3.2 Retro-Logistik	22
3.3 Pre-Shredding	22
3.4 Globale Recyclingpartnerschaften	23
4 Fazit und Möglichkeiten für einen Pfadwechsel	24
4.1 Pfadabhängigkeiten	24
4.2 Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf die Transformationsansätze	25
4.3 Handlungsempfehlungen	26
Anhang	29
Akteure im Bereich der Rohstoffmärkte	29
Akteure im Bereich politischer Entscheidungsträger	30
Akteure im Bereich Zivilgesellschaft	34
Literaturverzeichnis	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rohstoffregime	10
Abbildung 2: Technologisch genutzte Elemente	18
Abbildung 3: Pfadwechsel	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Globaler Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien im Jahr 2013 und 2035 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs.....	9
Tabelle 2: Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf Transformationsansätze.....	26

Abkürzungsverzeichnis

ASW	Aktionsgemeinschaft Solidarische Welt
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
BIR	Bureau of international Recycling
BSVE	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung
CiR	Christlich Initiative Romero
DIHK	Deutsche Industrie- und Handelskammertag
DNR	Deutscher Naturschutzring
EEB	Europäisches Umweltbüro
EERA	European Electronic Recyclers Association
EPMF	European Precious Metals Federation
ERECON	European Rare Earths Competency Network
EUROMINES	European Association of Mining Industries, Metal Ores & Industrial Minerals
EUROMETAUX	European Metals Association
FÖSForum	Ökologisch Soziale-Marktwirtschaft
IC	Integrierter Schaltkreis
IGF	Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development
IPA	International Platinum Group Metals Association
LME	London Metal Exchange
RFID	Radio Frequency Identification
USGS	U.S. Geological Survey
VDM	Verband Deutscher Metallhändler
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VZBV	Verbraucherzentrale Bundesverband
WLED	Weißer Leuchtdioden (White Light Emitting Diode)
WTO	World Trade Organisation
WVM	Wirtschaftsvereinigung Metalle
XtL	Sammelbegriff für Gas to liquid -, Coal to liquid - und Biomass to liquid - Verfahren

1 Transformationsfeld

Technologiemetallen kommt bei der Transformation in Richtung einer Green Economy eine besondere Bedeutung zu. Zusammen mit der anhaltenden Digitalisierung führt die Verbreitung von Umwelttechnologien zu einer zunehmenden Nachfrage nach Technologiemetallen. Sie sind aufgrund ihrer Eigenschaften für die Funktionalität von Umwelttechnologien unerlässlich. Allerdings ist die Rohstoffversorgung mit Technologiemetallen keineswegs sicher und könnte deshalb zu einem Hemmnis für eine „grüne“ Transformation werden. Gleichzeitig ist mit zunehmenden Umweltbelastungen durch die Gewinnung und Verarbeitung von Technologiemetallen zu rechnen, da der Metallgehalt der Erze abnimmt. Dies führt zu der herausfordernden Aufgabe für die Transformation in Richtung einer Green Economy, die Voraussetzungen für einen nachhaltigen Umgang mit Metallen zu schaffen. Die vorliegende Fallstudie fokussiert auf das Recycling von Technologiemetallen, das neben einer nachhaltigen Primärproduktion, der Erschließung von Substitutionspotentialen und der Erhöhung der Materialeffizienz eine zentrale Strategie für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement ist. Das Recycling von Technologiemetallen ist bis dato nur auf wenige Stoffe beschränkt. Trotz zahlreicher Initiativen sind die Recyclingquoten insgesamt immer noch sehr unzureichend. Mit Blick darauf werden Pfadabhängigkeiten untersucht, die einen Pfadwechsel verhindern bzw. erschweren. Anschließend werden Ansätze für eine Transformation im Bereich der Technologiemetalle aufgezeigt. Die Fallstudie schließt mit einem Fazit zu den Voraussetzungen für einen Pfadwechsel.

1.1 Technologiemetalle

Bei Technologiemetallen handelt es sich um Edelmetalle, Halbmetalle und Seltene Erdmetalle. Kupfer, Nickel und Blei zählen im engeren Sinne nicht dazu, aber auch sie sind wichtig als Basismetalle für viele technische Anwendungen. Der Bedarf an diesen Metallen nimmt vor allem für Umwelttechnologien (Hybridantrieb, Fotovoltaik, Windenergie, Brennstoffzellen etc.) weiter zu. Dabei handelt es sich insbesondere um Chrom, Kobalt, Titan, Zinn, Antimon, Niob, Tantal, Platin, Palladium, Ruthenium, Rhodium, Osmium, Iridium, Silber, Neodym, Dysprosium, Scandium, Yttrium, Selen, Indium, Germanium und Gallium. Bei Gallium wird erwartet, dass der Rohstoffbedarf in rund zwanzig Jahren das Sechsfache der heutigen Weltproduktion erreicht, bei Neodym wird mit dem fast fünffachen Bedarf gerechnet. Deutliche Nachfrageimpulse durch Zukunftstechnologien sind auch bei Indium, Scandium, Germanium und Platin zu erwarten (s. Tabelle 1).

Eine von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) in Auftrag gegebene Studie mit dem Titel "Kritische Rohstoffe für Deutschland" untersucht erstmalig umfassend die Risiken der Versorgung Deutschlands mit mineralischen Rohstoffen (Metalle, Industriemineralien, Steine und Erden) unter Berücksichtigung der weltweit steigenden Nachfrage durch Zukunftstechnologien. Die Studie stuft die künftige Versorgung von 13 mineralischen Rohstoffen als "kritisch" bzw. "sehr kritisch" ein (KfW 2011). Die Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission zu kritischen Materialien von 2014 bewertet 20 Stoffe als kritisch. Alle diese Stoffe spielen auch in Umwelttechnologien eine Rolle. Das europäische Joint Research Center schätzt die Rolle der kritischen Materialien für die Umwelttechnologien ebenfalls als bedeutend ein und hat in 2013 eine Studie „Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector“ erstellen lassen (JRC 2013).

Tabelle 1: Globaler Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien im Jahr 2013 und 2035 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs

Rohstoff	2013	2035	Zukunftstechnologien
Lithium	0,0	3,9	Lithium-Ionen-Akku, Airframe-Leichtbau
Schwere Seltene Erden (Dy, Tb)	0,9	3,1	Magnete, E-PKW, Windkraft
Rhenium	1,0	2,5	Superlegierungen
Leichte Seltene Erden (Nd, Pr)	0,8	1,7	Magnete, E-PKW, Windkraft
Tantal	0,4	1,6	Mikrokondensatoren, Medizintechnik
Scandium	0,2	1,4	SOFC-Brennstoffzellen
Kobalt	0,0	0,9	Lithium-Ionen-Akku, XtL
Germanium	0,4	0,8	Glasfaser, IR-Technologie
Platin	0,0	0,6	Brennstoffzellen, Katalyse
Zinn	0,6	0,5	Transparente Elektroden, Lote
Palladium	0,1	0,5	Katalyse, Meerwasserentsalzung
Indium	0,3	0,5	Displays, Dünnschicht-Photovoltaik
Gallium	0,3	0,4	Dünnschicht-Photovoltaik, IC, WLED
Silber	0,2	0,3	RFID
Kupfer	0,0	0,3	Elektromotoren, RFID
Titan	0,0	0,2	Meerwasserentsalzung, Implantate

Quelle: Marscheider-Weidemann et. al. 2016

Für die deutsche Wirtschaft zählen Germanium, Rhenium und Antimon zu den „sehr kritischen“ Rohstoffen und Indium, Wolfram, Seltene Erden, Gallium, Palladium, Silber, Zinn, Niob, Chrom und Bismut zu den "kritischen". Ihre Vorkommen sind auf wenige Länder beschränkt und diese befinden sich zum Teil in politisch instabilen Regionen. Die Verletzbarkeit der Industrie in rohstoffarmen Ländern wie Deutschland wird noch dadurch erhöht, dass bestimmte metallische Rohstoffe häufig nur über vergesellschaftete (also gemeinsam auftretende) Vorkommen in Erzen erschlossen werden können. Steigt der Bedarf nach einem Metall stark an, so ändert sich das gesamte Wertschöpfungs- und Preisgefüge von Haupt-, Kuppel- und Nebenprodukten. Vergesellschaftet kommen beispielsweise die für die Technologieentwicklung wichtigen Metalle der Seltenen Erden vor, darunter Scandium, Dysprosium und Neodym. Indium, ein extrem knapper Rohstoff, wird als Koppelprodukt von Zink gewonnen. Die Rohstoffverfügbarkeit kann dort besonders kritisch werden, wo die Möglichkeit fehlt, knappe und teure Rohstoffe zu substituieren.

1.2 Akteure

Koevolutiv in wechselseitiger Beeinflussung haben sich im Laufe von Jahrzehnten Rohstoffregimes herausgebildet, die durch sozioökonomische, -technische und -politische Strukturen gekennzeichnet sind, und durch mehr oder weniger gefestigte Akteurskonstellationen, Regeln und Konventionen einen gesellschaftlichen Teilbereich und die in ihm ablaufenden Prozesse prägen. Betroffen ist eine große Anzahl von nationalen und internationalen Akteuren, was die politische Formulierung und Umsetzung eines nachhaltigen Ressourcenmanagements zu einer komplizierten Aufgabe macht. Da sind erstens wirtschaftliche Akteure auf Ebene der Rohstoffmärkte im engeren Sinne und der Nutzung von Rohstoffen in Form von Produkten im weiteren Sinne, zweitens sind da die Akteure im Bereich der Politik, die einen rohstoffpolitischen Ordnungsrahmen für die von ihr betroffenen Akteure in Verwaltung, Wirtschaft und Gesellschaft formulieren, und drittens existieren zivilgesellschaftliche Organisationen, die sich mit Fragen der Rohstoffpolitik auseinandersetzen und rohstoffpolitische Anforderungen stellen. Damit wird bereits deutlich, dass sich das Transformationsfeld aufgrund unterschiedlicher Akteure mit verschiedenen Interessen in einem Spannungsfeld bewegt, wobei die Konstellationen aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen und Strukturen rohstoffspezifisch sind. Trotzdem bestehen einige grundsätzliche Charakteristika, die das Rohstoffregime für Technologiemetalle prägen:

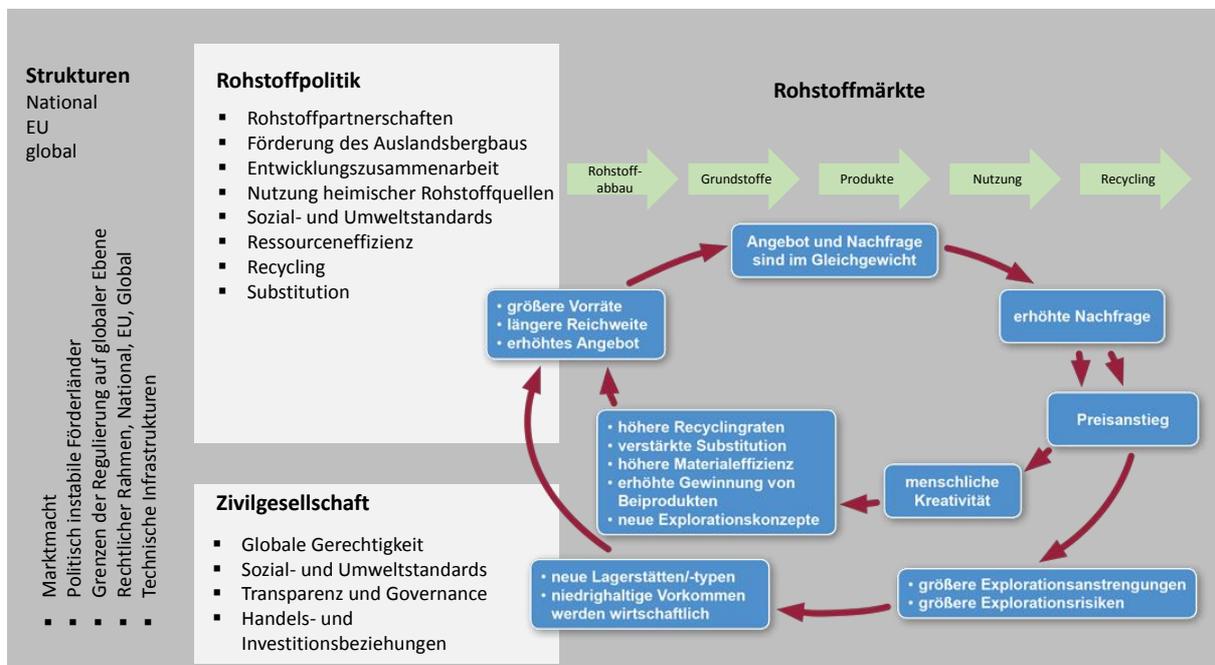


Abbildung 1: Rohstoffregime

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von BGR, TAB

1.2.1 Rohstoffmärkte

Viele Rohstoffmärkte sind durch eine hohe Konzentration des Angebots auf wenige marktmächtige Unternehmen gekennzeichnet. Diese Struktur ist dadurch bedingt, dass Investitionen hier lange Amortisationszeiten haben, sehr kapitalintensiv sind und einen hohen Bedarf an Forschung und Entwicklung aufweisen (Walz et al. 2016). Zunehmend restriktivere Sozial- und Umweltstandards verstärken die

Markteintrittsbarrieren in der Rohstoffbranche. Um zusätzlichen Belastungen und Gefahren bedingt durch Exportzölle, Bürokratie und instabile politische Verhältnisse entgegenzuwirken, konzentrieren sich die Interessen der Akteure im Allgemeinen auf den Abbau von Handelshemmnissen und liberale Rahmenbedingungen auf dem Weltmarkt. Insbesondere die Industrie bekundet mit Blick auf die Materialdiversität der Zukunftstechnologien ein hohes Interesse an Versorgungssicherheit und Marktzugang und sieht politische Entscheidungsträger in der Pflicht entsprechende Voraussetzungen zu schaffen. Es besteht ein ausdrückliches Interesse an einer Erhöhung der Ressourcen- und Materialeffizienz, da auf diese Weise die Importabhängigkeit reduziert und die lokale Wertschöpfung gesteigert werden könnte.

Des Weiteren sind Transparenz und Korruption ein zentrales Thema, mit dem sich betroffene Unternehmen und Branchen auseinandersetzen. Vor allem nach dem politischen und zivilgesellschaftlichen Druck in Bezug auf Konfliktmaterialien in technischen Produkten, haben sich verschiedene Initiativen formiert (z. B. Conflict-Free Tin Initiative, Solutions for Hope, Section 1502 des US-amerikanischen Dodd-Frank Acts). Dieser Richtlinie zur Folge müssen Unternehmen, die bestimmte „Konfliktminerale“ verwenden, Dokumentations- und Publizitätsverpflichtungen erfüllen, die gewährleisten sollen, dass keine Rohstoffe verwendet werden, die dazu dienen, den bewaffneten Konflikt in der Demokratischen Republik Kongo oder einem angrenzenden Land zu finanzieren. Die Industrie unterstützt solche Initiativen (zur Verhinderung und Eindämmung bewaffneter Konflikte und Krisensituationen in Drittländern). Ein produktbezogener Ansatz und eine durchgehende Zertifizierung wird aber als nicht zielführend erachtet (s. z.B. ZVEI 2013).

Auf Entsorgungsebene umfasst die Wertschöpfungskette neben Deponien und Müllverbrennungsanlagen Akteure im Bereich der Logistik zur Sammlung der Altprodukte einschließlich der Erfassung, der Erstbehandlung zur Zerlegung in Fraktionen und Schadstoff- bzw. Störstoffentfrachtung und der Aufarbeitung zur Auftrennung komplexer Fraktionen und ihrer Verwertung. In den letzten Jahrzehnten hat sich ein beachtenswerter Markt für das Recycling von Technologiemetallen als Teil des gesamten Recyclingmarktes entwickelt. Die Anzahl der Unternehmen, die beispielsweise Elektroschrott zerlegen, liegt europaweit bei mehreren Tausend. Die Aufbereitung wird in der Regel von Unternehmen durchgeführt, die der Metallurgie vorgeschaltet sind. In Europa sind dies schätzungsweise mehrere 100 Unternehmen. Das Technologiemetallrecycling erfordert den Einsatz komplexer Verfahren, die weltweit nur von 5 bis 6 Scheidereien durchgeführt werden, darunter Umicore (Antwerpen, Hanau) und DOWA Eco-System Environmental (Japan). Daneben existiert eine Reihe spezialisierter Scheidereien. Einige Primärkupferhütten (u.a. Biliden-Rönnskär, Aurubis Hamburg) verarbeiten zusätzlich auch edelmetallhaltige Sekundärmaterialien. Andere Metallhütten (Stahl, Aluminium), Glas- und Kunststoffverarbeiter ergänzen die Wertschöpfungskette.

1.2.2 Politische Entscheidungsträger

Die sichere Versorgung mit den für Zukunfts- und Umwelttechnologien essentiellen Technologiemetallen wird als zunehmend kritisch für die wirtschaftliche Entwicklung angesehen. Die Politik hat in vielen Ländern (insbesondere Europa, Deutschland, USA, Japan) die strategische Bedeutung für die Wirtschaft erkannt und entwickelt Strategien und Maßnahmen für einen effizienten Umgang mit Technologiemetallen. In Deutschland zielen insbesondere mehrere Programme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung auf die Förderung des Recyclings von Technologiemetallen, darunter die Fördermaßnahmen „r³“ mit dem Schwerpunkt auf Strategische Metalle und Mineralien und „r⁴“ mit

dem Schwerpunkt auf Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe. Im Fokus dieses Programms stehen Rohstoffe, die für Zukunftstechnologien verfügbar sein müssen und eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft haben. Sowohl auf der europäischen als auch auf der nationalen Ebene existieren weitere Strategiedokumente, die den Blick stärker auf die Versorgungssicherheit lenken: Die „Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung“, die gemeinsam mit dem BDI entwickelt und im März 2007 verabschiedet wurden, und die Rohstoffinitiative der Europäischen Kommission (Bundesregierung 2007; Europäische Kommission 2008). Beiden geht es vorrangig darum, den Zugriff auf außereuropäische Rohstoffquellen zu sichern und Handelshemmnisse abzubauen. Die verstärkte Nutzung heimischer Rohstoffpotenziale ist insbesondere Ziel der EU-Rohstoffinitiative. Unterschiedliche Interessen und Schwerpunkte werden durch das Nebeneinander dieser verschiedenen Strategien bereits deutlich. (Faulstich 2009). Insbesondere wirtschaftspolitische Fragen für die Versorgungssicherheit der Industrie und entwicklungspolitische Themen für Entwicklungs- und Schwellenländer sind von einem starken Spannungsfeld geprägt. Auch im Bereich Soziales und Umwelt sind teilweise gegensätzliche Tendenzen zu erkennen. Global gesehen treten Organisationen wie die WTO oder die OECD für eine freie und offene Weltwirtschaft ein und sind in Bezug auf die partizipierenden Nationen teilweise für die Einhaltung der getroffenen Regelungen verantwortlich. Akteure aus Rohstoffmärkten pochen stets auf die entsprechenden Richtlinien und deren Gewährleistung. Auch die rohstoffreichen Entwicklungs- und Schwellenländer haben sich zur Stärkung ihrer Interessen zusammengeschlossen. Dass auch nationale politische Maßnahmen den internationalen Rohstoffmarkt deutlich beeinflussen können zeigt der „Dodd-Frank-Act“. Eine weitere bedeutende Initiative in diesem Bereich ist die EITI (Extraktive Industries Transparency Initiative), deren Hauptziel neben der Vermeidung von Konfliktrohstoffen der Abbau von Intransparenz und Korruption ist. Partizipierende Stakeholder sind sowohl Regierungen als auch Unternehmen der Rohstoffbranche sowie zivilgesellschaftliche Organisationen.

1.2.3 Zivilgesellschaft

Technologiemetalle sind seit mehreren Jahren in den Blickpunkt zivilgesellschaftlicher Gruppen gerückt und haben rohstoffpolitische Diskussionen ausgelöst. In Deutschland und weltweit gibt es zahlreiche Nichtregierungsorganisationen, die sich mit Rohstoffpolitik befassen, darunter Misereor, Brot für die Welt, das Diakonische Werk. Außerdem setzen sich Verbraucherverbände mit der Rohstoffpolitik auseinander. Gewerkschaften nehmen an Rohstoffdialogen teil, fallen aber kaum als Initiator der Debatten auf. Der Fokus der zivilgesellschaftlichen Diskussion zur Rohstoffpolitik liegt vor allem auf der Gestaltung der Handels- und Investitionsbeziehungen, der Einhaltung von Sozial- und Umweltstandards sowie der Förderung von Transparenz und Governance im Rohstoffsektor. Zudem werden Forderungen nach Ressourcengerechtigkeit und alternativen Konzepten zur Rohstoffgewinnung diskutiert. NGOs haben vor allem Konfliktmaterialien thematisiert. Germanwatch macht speziell auf die Rohstoffproblematik von Technologiemetallen der Informationstechnik aufmerksam. Das europäische Projekt makeITfair hat die sozialen und ökologischen Auswirkungen des Rohstoffabbaus für einige der mengenmäßig wichtigsten Metalle für die Elektronikindustrie untersucht. Kritisiert wird, dass nicht nur bei der Rohstoffförderung und der Produktion, sondern auch am Ende der Wertschöpfungskette -bei der Verschrottung- Elektronikgeräte erhebliche Probleme, insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern, verursachen. Gefordert werden u.a. eine bessere Umsetzung des Elektroschrottexportverbots, transparente Entsorgungsstrukturen, alternative Sammelsysteme, die Einbindung des informellen Sektors in eine formale Recyclingwirtschaft, internationale Recycling-Kooperationen, ein Technologietransfer sowie ein gerechter und transparenter Handel mit Altgeräten (Germanwatch 2012). In

diesem Zusammenhang werden verbindliche Umwelt- und Sozialstandards (im Rahmen von internationalen Abkommen) gefordert.

1.3 Historische Entwicklung

Interessierten sich bis vor kurzem nur wenige Experten für Technologiemetalle, rückt die Rohstoffversorgung mit Technologiemetallen zunehmend auf die Agenda der Weltpolitik. Die derzeitigen Probleme werden aber nicht durch eine geologische Knappheit, sondern hauptsächlich durch fehlende Bergbaukapazitäten und eine wachsende Zahl von Handelshemmnissen hervorgerufen. Hinzu kommt, dass wichtige rohstoffverbrauchende Schwellenländer, insbesondere China und Indien, ihre Rohstoffpolitik strategisch ausgerichtet haben, um ihre rohstoffwirtschaftlichen Interessen zu verfolgen. Angesichts dieses geostrategischen Bedeutungszuwachses nehmen die entsprechenden Aktivitäten in den Industriestaaten zu. So hat die EU-Kommission eine Rohstoffinitiative gestartet. Die Bundesregierung hat unter Federführung des Bundesministeriums für Wirtschaft im Dialog mit Vertretern des BDI, der rohstoffverarbeitenden Industrie, der Recyclingwirtschaft und den Gewerkschaften eine Rohstoffstrategie erarbeitet. Neben rohstoffwirtschaftlichen Fragen kommen in der Rohstoffstrategie auch außenpolitische, entwicklungspolitische und umweltpolitische Grundsätze und Ziele zum Tragen. Dies spiegelt sich auch im Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung (ProgRess) wider. ProgRess gibt einen Überblick über zahlreiche vorhandene Aktivitäten und beschreibt Handlungsansätze und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Bereits 2002 hat die Bundesregierung in ihrer nationalen Nachhaltigkeitsstrategie das Ziel verankert, Deutschlands Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 zu verdoppeln. Bisher reicht das durchschnittliche Tempo ihrer Erhöhung aber nicht aus, um das gesetzte Ziel zu realisieren. Würden Materialien im gleichen Maße wie bisher immer effizienter eingesetzt, würde die Rohstoffproduktivität im Jahr 2020 rund 60 % des Zielwertes erreichen. 2015 wurde mit ProgRess II das Ressourceneffizienzprogramm weitergeschrieben (BMUB 2015). Das Programm soll für alle Akteure einen fundierten und langfristigen Orientierungsrahmen bieten und eine umfassende Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise voranbringen. Bezüglich Technologiemetallen sieht ProgRess II die Entwicklung von innovativen Erfassungssystemen auf Basis zu erstellender Kataster von Abfallströmen ähnlicher Metallzusammensetzung („Pooling“) als Maßnahme vor (BMUB 2015).

1.4 Umweltwirkungen

Für eine Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft hin zu einer Green Economy sind Technologiemetalle unerlässlich. Sie ermöglichen beispielsweise die Miniaturisierung von Informations- und Kommunikationstechnik (z.B. Tantal-Kondensatoren), wirksame Abgasreinigung durch Katalysatoren (z.B. Platin), einen deutlich geringeren Energieverbrauch (z.B. Gallium in LED-Leuchtmittel) oder effiziente Energiewandlung in Dünnschichtsolarzellen (z.B. Indium in CIS-Solarzellen). Mit der zunehmenden Marktdurchdringung von Umwelttechnologien steigt gleichzeitig die Nachfrage nach Technologiemetallen deutlich an. Als besonders hoch wird dieser für Gallium, Indium, Germanium und Neodym angesehen (Bleher, Schüler 2016).

Damit wird deutlich, dass eine große Transformation hin zu einer Green Economy auf Technologiemetalle angewiesen ist. Lieferengpässe bei Technologiemetallen können deshalb die Verbreitung von Umwelttechnologien hemmen. Die Rohstoffverfügbarkeit kann dort besonders kritisch werden, wo die

Möglichkeit fehlt, knappe und teure Rohstoffe zu substituieren. Nicht ersetzbar sind beispielsweise Chrom in rostfreien Stählen, Kobalt in verschleißfesten Legierungen, Scandium in schlagfesten Legierungen, Silber in gedruckten Funketiketten (RFID-Labels), Indium in transparenten Indium-Zinn-Oxid Elektroden für Displays oder Fotovoltaikzellen, Neodym in starken Permanentmagneten und Germanium in Linsen der Infraoptik. Oft werden Technologiemetalle in Kuppelproduktion von Massenrohstoffen gewonnen, so dass der überproportionale Nachfrageanstieg nicht durch eine Angebotsausweitung kompensiert werden kann. Aus diesem Grund kam es in den letzten Jahren zu drastischen Preissprüngen bei einzelnen Technologiemetallen für Funktionsmaterialien. Die Rohstoffsicherung hat damit eine hohe strategische Bedeutung für die Verbreitung von Umwelttechnologien.

Die Bedeutung von Technologiemetallen wird in der Zukunft noch weiter anwachsen. Neben dem Aspekt der Rohstoffsicherung für Umwelttechnologien, die zu Umweltentlastung beitragen, gilt es gleichzeitig, die negativen Folgen für die Umwelt durch die Primärproduktion der Rohstoffe zu minimieren. Die Gewinnung von Technologiemetallen aus Primärrohstoffen ist oft mit einem erheblichen ökologischen Rucksack verbunden. Aufgrund der Probleme mit Umweltbelastungen stuft das Umweltbundesamt Gold und Silber (hoher Anteil an Abraum, Freisetzung von Quecksilber und Cyaniden im Kleinbergbau), Zinn (hohes Produktionsvolumen) und Phosphor (Cadmium in Phosphaterzen) als kritisch ein (Walz et al. 2016, 23; UBA 2010). Dies gilt umso mehr, weil mit zunehmender Primärförderung von Technologiemetallen die Konzentration der gewonnenen Erze abnimmt. Der Effekt abnehmender Erzkonzentrationen lässt sich für viele Technologiemetalle beobachten. Der „resultierende Abbau niedergradiger Erze führt zur Zunahme von Umweltbelastungen und einem Anstieg der spezifischen Treibhausgasemissionen“ (Bleher, Schüler 2016).

Um diesen negativen Umwelteffekten entgegen zu treten, bedarf es eines Zusammenspiels verschiedener Strategien von der umweltschonenden Primärproduktion, der Erhöhung der Materialeffizienz über die Substitution kritischer Rohstoffe bis hin zum Recycling von Technologiemetallen. Das Recycling von Technologiemetallen ist, wie verschiedene Studien belegen, in jedem Fall ein wichtiger Beitrag zur Schonung von Ressourcen und häufig auch ein Beitrag zur Treibhausgasminderung (Bleher, Schüler 2016).

2 Stärken und Transformationshemmnisse des etablierten Pfades

2.1 Charakterisierung der Stärken des etablierten Pfades

Die Rohstoffversorgung wird durch das Zusammenspiel von Markt, Technik und Rahmenbedingungen über einen Regelkreis gesteuert, wobei das Rohstoffangebot mit einem gewissen Zeitverzug der Nachfrage folgt. Aus rein geologischer Sicht sieht die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe die Versorgung mit mineralischen Rohstoffen auch zukünftig weitgehend gesichert. Kurz- bis mittelfristig können bei der technischen Bereitstellung von Technologiemetallen jedoch Preisrisiken und Lieferengpässe auftreten. Zur Vermeidung von Versorgungsengpässen wurden seitens der Politik und Wirtschaft flankierende Maßnahmen ergriffen, dazu gehört insbesondere auch das Recycling. Für einige wirtschaftlich bedeutende Technologiemetalle gilt das Recycling bereits als gut etabliert und die Versorgungssituation als weitgehend unkritisch (z. B. Platin-Gruppen-Metalle, Magnesium), während sie für Germanium, Gallium und Indium kritischer ist. Für das Recycling stehen fortgeschrittene Recyclingtechniken und -systeme zur Verfügung. Das betrifft alle gängigen Industriemetalle wie Kupfer, Aluminium, Blei, Zinn oder Nickel. Für Edelmetalle wie Gold oder Silber lassen sich heute mit modernen metallurgischen Verfahren in der Regel hohe Rückgewinnungsraten erzielen.

Kennzeichnend für den etablierten Recyclingpfad sind folgende Aspekte:

Stand der Technik sind etablierte Sammelsysteme (Bring-, Holsysteme). Je nach Produkt und Land haben sich eigene Sammelsysteme etabliert. So gibt es Rücknahmesysteme für Elektronikschrott, für Altbatterien und Altautos. Für die Sammlung von Elektro-Altgeräten stellen die Entsorgungsträger beim Endverbraucher kostenlose Behältnisse bereit. Altbatterien können bei Entsorgungsträgern oder dem Handel abgegeben werden. Fahrzeuge werden auf Schrottplätzen angenommen. Für Solaranlagen, deren Rücklauf derzeit noch gering ist, wird europaweit von der Industrie ein flächendeckendes Rücknahme- und Recycling-System für Altmodule aufgebaut, um die zukünftig erwarteten großen Mengen aus Altanlagen erfassen und recyceln zu können. Die Demontage ermöglicht eine Schadstoffentfrachtung. So werden beispielsweise PCs in Gehäuse, Netzteile, Leitplatten, Laufwerke und andere Komponenten zerlegt. Schadstofffraktionen werden entfernt. Die einzelnen Komponenten werden in verschiedenen recyclingverträglichen Verwertungsgruppen gesammelt und vorsortiert. Die Trennung der Werkstoffverbunde geschieht meist durch eine kostengünstige mechanische Aufbereitung (z.B. Brechen oder Shreddern). Daneben sind „thermische Verfahren wie Pyrolyse oder Schmelzprozesse und spezifische Löseprozesse von Bedeutung. Bei der Klassifizierung, der Identifizierung und der Sortierung werden die zerkleinerten Feststoffgemische in Fraktionen getrennt. Es existieren bedarfsgerechte Ansätze, zum einen spezialisierte Verfahren für spezifische Materialien und zum anderen eher universell ausgelegte Scheideprozesse für sehr unterschiedliche Materialien. Viele Edelmetallscheidereien für Sekundärmaterialien haben sich mittlerweile auf bestimmte Segmente spezialisiert und dafür jeweils eigene Verfahrensstränge installiert, ohne aber die ganze Material-Bandbreite abzudecken. Einige Primär-Kupferhütten verarbeiten zusätzlich auch edelmetallhaltige Sekundärmaterialien. Sie haben keine Raffinationsstufe für Platin und Palladium und verlieren in der Regel die ‚exotischeren‘ Edelmetalle

Rhodium, Ruthen und Iridium. Moderne integrierte Metallhütten und Scheidereien kombinieren Vorteile spezialisierter Scheidereien mit denen universeller Ansätze (Hagelüken o.J.). Mit modernen Verfahren lassen sich Rückgewinnungsraten zwischen 70 und 95 Prozent erzielen.

2.2 Transformationshemmnisse und Pfadabhängigkeiten

Die Erhöhung der Recyclingraten für Technologiemetalle ist durch folgende Pfadabhängigkeiten eingeschränkt.

2.2.1 Rechtliche Pfadabhängigkeiten

Der Schwerpunkt der staatlichen Ressourcen- und Umweltpolitik lag in den letzten beiden Jahrzehnten vorwiegend auf der Vermeidung bzw. Minimierung des Einsatzes umweltgefährdender Stoffe und der Erhöhung der Ressourcenproduktivität von Massenwerkstoffen wie z.B. Kupfer oder Kunststoffen. Auch die untergesetzlichen Regelwerke zum Kreislaufwirtschaftsgesetz, wie z.B. das Altautogesetz und das Elektroaltgerätegesetz, begünstigen mit ihren Mengenquoten für die Sammlung und Verwertung indirekt die Kreislaufführung von Massenwerkstoffen. Die in geringen Mengen und in großer stofflicher Vielfalt anzutreffenden Funktionsmaterialien sind schwer zu recyceln und deshalb auch nur wenig adressiert. Der rechtliche Rahmen wird auf EU-Ebene unter anderem von der WEEE-Direktive (Waste of Electrical and Electronic Equipment) bzw. in Deutschland von dem Elektro-Gesetz geprägt, die die Wiederverwendung, das Recycling und andere Formen der Verwertung solcher Abfälle regeln. Diese sehen verpflichtende Verwertungsquoten für bestimmte Gerätekategorien vor. In Zukunft sollen Elektro- und Elektronikaltgeräte einen höheren Beitrag zur Rohstoffversorgung leisten. Trotz der Novellierung bleibt es bei massebasierten Quoten. Bei der Interpretation von Recyclingraten fehlen bis dato Qualitätskriterien, die die Kritikalität und Umweltrelevanz von Technologiemetallen berücksichtigen. Auch Implementierungsdefizite und Unsicherheiten über die weitere Entwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen (wie die Einführung eines Wertstoffgesetzes) führen dazu, dass die Potenziale zur Verwertung von Technologiemetallen nicht ausgeschöpft werden. Eine weitere Schwachstelle ist der illegale Export von Elektronik- und Elektronikgeräten sowie Fahrzeugen, die aufgrund ihrer Elektronik ebenfalls große Mengen an Technologiemetallen enthalten. Zwar müssen Elektro- und Elektronikaltgeräte laut ElektroG bei den Sammelstellen der Kommunen abgegeben und vom Hersteller entsorgt werden. Sie dürfen nicht exportiert werden. Dennoch finden solche Exporte von Elektroschrott aus Europa in Entwicklungs- und Schwellenländer in großem Umfang statt, häufig indem Schrott falsch deklariert als Gebrauchtware noch funktionsfähiger Geräte gekennzeichnet wird (Sander et al. 2010). Hier sind rechtliche Lücken und Vollzugsdefizite zu konstatieren.

2.2.2 Ökonomische Pfadabhängigkeiten

Das Recycling von Technologiemetallen ist vor allem dort betriebswirtschaftlich sinnvoll, wo es in Kombination mit anderen Stoffströmen betrieben werden kann. Das Fehlen ökonomischer Anreize für zu meist kostenintensive Investitionen und die Entwicklung von Verfahren zum Recycling von Technologiemetallen ist auch mit limitierten Absatzmärkten für Sekundärrohstoffe zu begründen. Zudem können volatile Preise an den Primärrohstoffmärkten Recyclinganstrengungen unwirtschaftlich machen. Kurz-, mittel- und langfristig kann es durchaus sehr unterschiedliche Preisentwicklungen geben. Eine

große Unbekannte bei Projektionen des zukünftigen Preisniveaus sind Marktinterventionen durch Regierungen und die oligopolartigen Angebotssituationen. Beide Faktoren sprechen für volatile Preise, was Investitionen in Techniken und Anlagen zur Verwertung von Technologiemetallen erschwert. Langfristige Investitionen in Recyclinganlagen sowie die Unsicherheit der künftigen Preisentwicklung bei Technologiemetallen bedeuten ein hohes Risiko für Investoren. So unterlag beispielsweise der kleine Markt für Seltene Erden (113.000 t im Jahr 2011) „in der Vergangenheit großen Preisschwankungen. Eine Recyclinganlage kann aber auf Dauer nur dann wirtschaftlich betrieben werden, wenn die Rohstoffpreise langfristig eine Mindesthöhe aufweisen. Die derzeitigen Preise für Seltene Erden sind nach dem letzten Preisrückgang noch nicht wieder ausreichend hoch, um ausreichende Investitionsanreize zu geben“ (Bleher, Schüler 2016).

2.2.3 Technologische Pfadabhängigkeiten.

Allgemein kennzeichnend ist die Tendenz zu Produkten mit größerer Stoffvielfalt und Stoffgemischen (Reller et al. 2011). Ein weiteres Charakteristikum der Materialdiversifizierung ist die Funktionalisierung einzelner Materialien. In Produkten des Hochtechnologiesektors erfüllen Materialien ganz spezifische Funktionen und können daher nur schwer substituiert werden. Obwohl sie aufgrund ihrer funktionellen Eigenschaften eine sehr hohe Relevanz für das Produkt besitzen, werden sie oftmals nur in extrem geringen Mengen benötigt. In diesem Zusammenhang ist von sogenannten „Gewürzmetallen“ die Rede. Bei der Aufarbeitung von technologiemetallhaltigen Abfällen muss der Tatsache Rechnung getragen werden, dass Technologieprodukte immer komplexer werden und sich ihre Zusammensetzung aufgrund kurzer Innovationszyklen ständig verändert. Um neue und immer bessere Funktionen zu ermöglichen, werden heute allein in Mikrochips über 60 verschiedene Elemente eingesetzt. Schätzungen gehen davon aus, dass mittlerweile fast alle stabilen Elemente des Periodensystems in Technologieprodukten verwendet werden. In komplexen Materialverbänden sind neben Kunststoffen, Glas/Keramik, Eisenmetallen und Kupfer weitere Basismetalle sowie Edelmetalle enthalten. Letztere kommen zwar nur in Spuren vor, haben aber oft einen dominierenden Anteil am Materialwert der Geräte. Ein durchschnittliches Mobiltelefon besteht aus über 60 verschiedenen Materialien. Neben Kunststoffen und Kupfer als Hauptbestandteile finden sich Silber-, Zink- und Nickelverbindungen, auch Zinn, Blei, Kobalt, Aluminium, Wolfram, Gold, Palladium, Mangan, Lithium-Verbindungen, Chromoxid, Flüssigkristalle, Beryllium, Phosphor und Molybdän sind darunter. Die Produkte insbesondere der Mikroelektronik, aber auch generell der Zukunftstechnologien sind viel komplexer zusammengesetzt als Primärrohstoffe bzw. Primärkonzentrate und erfordern daher die Entwicklung spezieller mechanischer und metallurgischer Aufbereitungsverfahren. Beispiele hierfür sind homogene Platin-katalysatoren für die Silikonherstellung, bei der die Katalysatoren letztlich extrem gering konzentrierte Bestandteile des Produkts werden. Beispiele sind auch „hauchdünne Platin- oder Ruthenbeschichtungen in Festplattenlaufwerken, Platin- oder Iridiumhaltige Zündkerzen und Lambda-Sensoren, die kaum wirtschaftlich aus Altfahrzeugen demontiert werden können“ (Hagelücken o.J.). Auch in RFID-Chips verwendetes Silber lässt sich aufgrund der stark dissipativen Nutzung der Chips und der geringen Konzentration bisher kaum wirtschaftlich verwerten. Ein weiteres Beispiel ist das Recycling von Kraftfahrzeugen. Die Rückgewinnung und Verwertung der metallischen Anteile von Altfahrzeugen gelingt durch die effektive Auftrennung im Shredder und bei den nachfolgenden Sortierschritten (Magnetscheider, Wirbelstromscheider, Schwimm-Sink-Anlagen) zu ca. 97 Prozent. Edelmetalle, die in modernen Kraftfahrzeugen in einer Vielzahl mikroelektronischer Komponenten verbaut sind, gehen verloren. Die Shredder-Technologie, wie sie gängigerweise angewendet wird, ist deshalb

für ein Recycling der Technologiemetalle nicht geeignet. Auch durch Post-Shredder-Technologien können sie nur unzureichend zurückgewonnen werden. Ähnliches gilt für Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik. Eine Studie der TU Berlin zeigt, dass ein Goldverlust von 75 Prozent eintritt, wenn PC-Leiterplatten nicht vor dem Shredderprozess entnommen werden (Chancerel, Rotter 2009). Erforderlich sind deshalb geeignete Verfahren zur Vorbehandlung und Prä-Shredder-Technologien. Schwierigkeiten ergeben sich aus Metallkombinationen, „die nicht zu etablierten Scheideverfahren passen. Es entstehen technische Konflikte, wenn die Rückgewinnung eines wichtigen Metalls zu Verlusten anderer Metalle führt. Hiervon sind normalerweise nicht Kombinationen von Edelmetallen betroffen, sondern Edelmetalle in Kombination mit wertvollen Sonder- oder Basismetallen“ (Hagelücken o.J.). Die dissipative Verwendung von Technologiemetallen und massebasierte Shredderprozesse begrenzen ein ökonomisch sinnvolles Recycling auf Element- oder Werkstoffebene.

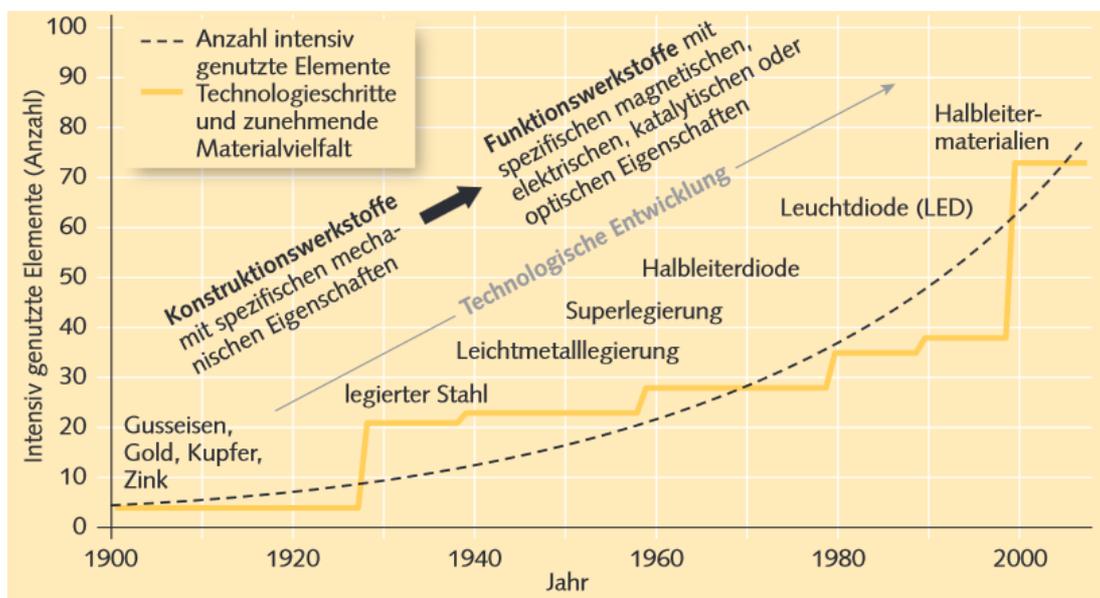


Abbildung 2: Technologisch genutzte Elemente

Quelle: Reller et al. 2011

2.2.4 Organisationale Pfadabhängigkeiten

Die Erfassung und Sammlung von technologiemetallhaltigen Abfällen sowie die Einsteuerung dieser Abfälle in die dafür am besten geeigneten Recyclingketten ist unzureichend und stellt eine organisationale Pfadabhängigkeit dar. Dies gilt vor allem für Altprodukte aus dem Konsumbereich. Das Beispiel Zink macht deutlich, dass laut USGS aus Produktionsabfällen über 50 Prozent des Zinks verwertet werden, aber nur 8 Prozent des Zinks nach der Produktnutzung durch den Konsumenten in den Recyclingkreislauf zurückgeführt werden (USGS 2016). Kennzeichnend für die geringe Erfassung technologiemetallhaltiger Abfälle ist die Situation im Bereich der Elektronik- und Elektrogeräte. In Deutschland werden von 1,88 Mio. Tonnen in Verkehr gebrachter Elektronik- und Elektrogeräte 0,62 Mio. Tonnen, also bisher rund ein Drittel, erfasst und damit einer Verwertung zugeführt. Dänemark, Irland, Österreich, Schweden und Großbritannien weisen höhere Erfassungsquoten auf. Der europäische Mittelwert liegt bei 31 Prozent.

Elektrische und elektronische Geräte, Fahrzeuge und Investitionsgüter gehen der (deutschen) Sekundärrohstoffwirtschaft in hohem Maße durch Exporte verloren. Von den Mobiltelefonen, die gesammelt werden, werden die meisten als Reuse-Geräte in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert. Teilweise gelangen erhebliche Mengen an Elektroschrotten auf illegalem Wege in Entwicklungsländer. Jährlich werden etwa 155.000 Tonnen elektrische und elektronische Geräte aus Deutschland nach Afrika und Asien exportiert. Sie werden als Gebrauchtgeräte deklariert, sind aber oftmals nicht mehr funktionstüchtig. Zum Vergleich: Im Jahr 2006 wurden in Deutschland circa 1,8 Millionen Tonnen Neugeräte auf den Markt gebracht und rund 754.000 Tonnen gesammelt. Einige Entwicklungsländer werden mit immer mehr Elektronikschrott konfrontiert. China und Südafrika müssen bis zum Jahr 2020 gegenüber 2007 mit einer Vervierfachung rechnen. Bislang werden diese Schrottmengen nur selten fachgerecht behandelt. Angesichts der ineffizienten Recyclingpraxis in diesen Ländern kommt es zu einem stetigen Verlust von Wertstoffen. Zum Beispiel liegt die Goldausbeute in Entwicklungsländern nur bei rund 25 Prozent, für Palladium noch deutlich darunter („Low-Tech-Hinterhofrecycling“). Technologiemetalle gehen komplett verloren.

2.2.5 Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten

Bei Konsumprodukten findet bis dato kaum ein Recycling von Technologiemetallen statt. Dies liegt insbesondere daran, dass die Rückführung der Altgeräte aufwendig und kostenintensiv ist und deshalb nur unzureichend erfolgt. Außerdem sind die Rückführströme unregelmäßig und heterogen. Besonders bei Haushaltskleingeräten, IT-Geräten und Unterhaltungselektronik sind die Sammelquoten im Vergleich zu den in Verkehr gebrachten Mengen niedrig (Wilts 2014). Beispielhaft ist diese nutzerbezogene Pfadabhängigkeit bei Mobiltelefonen. Das Recyclingpotenzial liegt weltweit bei über 1 Mrd. Stück (2010) bzw. rund 100.000 Tonnen Metallen. Seltene Technologiemetalle liegen in Mobiltelefonen deutlich höher konzentriert vor als in geogenen Lagerstätten. Damit sind Altgeräte wesentlich reicher an Wertmetallen bzw. Mineralien und stellen theoretisch eine sinnvolle Rohstoffquelle für Technologiemetalle dar. Dies verdeutlicht eine Rechnung von Hagelüken: Während sich aus einer Tonne Erz nur ca. 5 g Gold gewinnen lassen, kann aus der gleichen Menge Leiterplatten ca. 200 g Gold extrahiert werden. Hagelüken schätzt, dass von dem Recyclingpotenzial für Mobiltelefone weniger als 5.000 Tonnen genutzt werden (Spiegel online 2010). Der größte Teil wird nicht gesammelt. Insgesamt liegt die weltweite Rücklaufquote von Elektronikgeräten schätzungsweise bei 15-20 Prozent. „Grund für den geringen Rücklauf und dem damit verbundenen Materialverlust sind zum einen das Abzweigen von Sammelgut vor der Endverarbeitung, um es zu exportieren, und zum anderen eine unzureichende Sammlung. Letzteres liegt an den vielen ausrangierten Elektronikgeräten, die entweder über den Hausmüll entsorgt werden oder die in den privaten Haushalten ungenutzt herumliegen“ (Germanwatch 2012). Außerdem ist festzustellen, dass die Nutzungsdauer elektronischer Konsumprodukte tendenziell kürzer wird. Ein Faktor ist der permanente Leistungszuwachs und der gleichzeitige Preisverfall bei den Endprodukten. Anspruchsvolle Medientechnik wird dadurch auch für den Privathaushalt immer erschwinglicher. Die Miniaturisierung und Verbilligung der informations- und kommunikationstechnischen Komponenten führt dazu, dass Mikroprozessoren zunehmend unsichtbar in andere Produkte integriert werden. Auch einfache Haushaltgegenstände werden so „smart“. Als Folge dieser Entwicklungen lassen sich kürzere Nutzungszeiten feststellen. Produkte werden so schneller zu Altgeräten.

2.3 Angriffspunkte und Schwächen des etablierten Pfades

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Technologiemetallen bestehen hohe Preisvolatilitäten und zahlreiche Lieferrisiken. Durch Recycling von Technologiemetallen könnten diese Risiken deutlich reduziert werden. Bis dato blieb aber die Perspektive, Recycling zu einem Baustein für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement zu entwickeln, weitgehend eingeschränkt auf einen massebasierten Recyclingpfad. Bei Technologiemetallen bestehen in der Regel die größten Schwachpunkte in der Sammlung und in der Vorbehandlung der Altgeräte und -produkte. Selbst effizienteste Raffinierungsprozesse können die Recyclingquote für die Technologiemetalle nicht wesentlich verbessern, wenn die vorgelagerten Schritte starke Schwächen aufweisen (Bleher, Schüler 2016). Konsequenz dieser massebasierten Strukturen in Kombination mit der Dissipation von Technologiemetallen ist, dass das Recycling von Technologiemetallen nur auf wenige Stoffe beschränkt ist und vielfach nur geringe Recyclingraten erzielt werden. Wertvolle Metalle gehen verloren.

3 Transformationsansätze

Zur Verbesserung des Recyclings von Technologiemetallen werden zahlreiche Ansätze verfolgt. Mit Blick auf eine Transformation weg von einem massebasierten Recycling hin zu einem Recycling, das Technologiemetalle in metallurgisch hochwertige Recyclingpfade führt, sind vor allem folgende Ansätze bedeutsam:

3.1 Öko-Design

Ein Schlüssel für höhere Recyclingquoten für Technologiemetalle ist das Zusammenspiel von demontagegerechter Konstruktion und Aufbereitungsverfahren. Die Zerkleinerungsverfahren sind heute noch weitestgehend aus ökonomischen Gründen auf Massenströme ausgelegt (z.B. Shredder für Autos mit hohem Stahlanteil). Stark erleichtert werden könnte das Recycling, wenn schon bei der Konstruktion auf systemische Lösungen für demontagegerechte Konstruktion und Aufbereitungsverfahren zur Rückgewinnung weiterer Rohstoffe (Indium, Seltene Erdmetalle etc.) geachtet würde. Hier wären - über die bestehenden hinaus- neue Richtlinien notwendig. Zwar existieren eine Vielzahl von Normen und Checklisten zum umwelt- und recyclinggerechten Design, trotzdem ist es bis dato kaum zu einer Standardisierung der Produktkonstruktionen gekommen. Vielmehr ist festzustellen, dass die Komplexität der Produkte mit Blick auf Zusammensetzung und Aufbau in Folge neuer Materialien und Leistungsverdichtung zunimmt, was tendenziell das Recycling elektronischer Produkte erschwert. Ein Ansatzpunkt ist die Öko-Design-Richtlinie. Sie schafft einen Rahmen für die Festlegung von allgemeinen und spezifischen Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Ihr Ziel ist es, ineffiziente Produkte vom Markt zu nehmen und ökoeffiziente Produkte zu fördern. Die Hauptaufgabenfelder liegen mit Blick auf Technologiemetalle insbesondere in der zerlegungs- und recyclinggerechten Konstruktion, der Vermeidung von Schadstoffen und der Verlängerung der Gerätenutzungsdauer.

Die niederländische Waag Society, ein „Institute for art, science and technology“, das Technologien für soziale Innovationen entwickeln will, hat 2014 mit „Fairphone“ ein Mobiltelefon auf dem Markt gebracht, das möglichst ohne Ausbeutung von Menschen und mit möglichst geringem Schaden für die Umwelt produziert werden soll. Neben der Verwendung konfliktfreier Rohstoffe durch den Kauf von Tantal und Zinn aus geprüften Minen in armen Gebieten und fairen Produktionsbedingungen ist ein weiterer Schwerpunkt die Müllvermeidung. Bei letzterem wird vor allem auf Haltbarkeit, günstige Reparaturmöglichkeit, Dual-SIM-Fähigkeit und Recycling geachtet. Im Januar 2014 wurden 25.000 Modelle des ersten Fairphones an die Kunden ausgeliefert. Im Frühjahr 2014 folgte die zweite Generation mit 35.000 Stück. Mit dem Fairphone 2 gibt es erstmals ein Smartphone, das man als "modular" bezeichnen kann (c't 2015). Akku und Display lassen sich ohne Werkzeug tauschen, andere Module ganz einfach mit einem Schraubendreher. Das soll die Nutzungsdauer des Smartphones verlängern und so die Umweltbilanz verbessern. Fairphone versteht sich als Sozialunternehmen, das „nicht alle Probleme auf einmal lösen“, aber doch einen Wandel (Bernau 2013) anstoßen möchte. Das Fairphone wird von der Telekom in Österreich vertrieben. Damit ist es dem Hersteller gelungen, sein Smartphone bei einem namhaften europäischen Provider unterzubringen. Auch Unternehmen wie Swisscom und KPN bieten das Fairphone an.

3.2 Retro-Logistik

Die Sammlung von Altgeräten ist eine zentrale Voraussetzung für das Recycling. Sie ist (in Deutschland wie auch in anderen Staaten der EU) durch ein gewachsenes und verbrauchernah eingerichtetes Netz kommunaler Sammelstellen geprägt. Integriert in die Sammlung sind vor allem mittelständische Unternehmen. Trotz einer ausgedehnten Infrastruktur wird nur rund ein Drittel des Elektronikschrotts (Deutschland: 36 Prozent) erfasst. Ambitionierte Sammelquoten, Einbeziehung der Sammel- und Logistikette in das Monitoring, Verhinderung illegaler Exporte und Ausweitung der Sammelstruktur für Kleingeräte sind aktuelle Ansätze, die Erfassung elektronischer und elektrotechnischer Altprodukte zu verbessern. Einen zentralen Stellenwert haben die politischen Aktivitäten zur Weiterentwicklung einer Kreislaufwirtschaft. In der EU wurden in den letzten Jahren umfangreiche Maßnahmen zur Verbesserung der Sekundärrohstoffwirtschaft getroffen. Hervorzuheben ist hierbei u.a. die neue WEEE-Richtlinie. Wesentliche Neuerungen sind u. a. die schrittweise Erhöhung der Sammel- und Verwertungsquoten, eine teilweise Rücknahmepflicht für den Handel sowie eine Beweislastumkehr beim Export zum Schutz gegen illegale Verbringung. In Zukunft sollen Elektro- und Elektronikaltgeräte einen höheren Beitrag zur Rohstoffversorgung leisten. Bislang liegt in der EU das EU Rücknahmeziel für Elektrogeräte bei 4 Kilogramm je Verbraucher oder insgesamt etwa 2 Millionen Tonnen pro Jahr. Durch die neue Richtlinie sollen im Jahr 2020 je Verbraucher rund 20 Kilogramm und insgesamt 10 Millionen Tonnen gesammelt werden. Nicht durchsetzen konnten sich Wertstofftonnen für mülltonnengängige elektronische Konsumprodukte. Der Sachverständigenrat für Umwelt SRU und der Rat für Nachhaltige Entwicklung (RNE) befürworten eine Pfandpflicht für kleine Elektro- und Elektronikgeräte, wie zum Beispiel Handys. Erwartet wird, dass die derzeitige Rücklaufquote von 25 Prozent durch ein Pfandsystem deutlich erhöht werden könnte. Der Branchenverband Bitkom hat sich gegen ein Pfand auf Mobiltelefone ausgesprochen. Ein Pfand würde die bestehenden Rücknahmesysteme beeinträchtigen, befürchtet wird außerdem ein bürokratischer Aufwand, der in keinem Verhältnis zum angestrebten Nutzen läge (ZDNet 2012).

3.3 Pre-Shreddering

Voraussetzung für das Erzielen höherer Wertstoffkonzentrationen ist die selektive Demontage technologiemetallhaltiger Komponenten aus komplexen Produkten. Bis dato erfolgt in der Regel zuerst eine grobe manuelle Zerlegung und Vorsortierung bzw. Konditionierung. Schadstoffhaltige Komponenten (PCB-Kondensatoren, Quecksilber-Schalter etc.) werden dabei manuell entfernt („Schadstoffentfrachtung“). Leiterplatten, Kabel, Bauteile und Gehäuse werden separiert. Neben den manuellen Demontageverfahren kommen teilzerstörende, mechanische Anlagen zum Einsatz (z.B. Smasher). Weitergehende Trennungs- und Sortierungsschritte erfolgen durch eine mechanische Aufarbeitung, bei der meist Shredder eingesetzt werden. Eine automatisierte Demontage von Elektro(nik)altgeräten kann die Rückgewinnung von Technologiemetallen verbessern, wie Versuchsreihen, Tests und Pilotanlagen zeigen („Pre-Shreddering“). So sind beispielweise Demontagekonzepte erfolgreich für Haushaltsgeräte, Leiterplatten oder Telefone erprobt worden. Allerdings hat sich die Automatisierung der Demontageprozesse bislang noch nicht durchgesetzt. Gründe hierfür sind insbesondere hohe Kosten und die damit verbundene lange Amortisierungszeit, niedrige Stückzahlen, schnelle Produktwechsel und Weiterentwicklungen sowie Volumenschwankungen. Als Grundvoraussetzung für den wirtschaftlichen

Erfolg wird die hohe Flexibilität des Demontagesystems bei niedrigen Investitions- und Instandhaltungskosten angesehen. Hohe Priorität haben sowohl die Steigerung der Geschwindigkeit der Anlagen als auch die Erweiterung der Möglichkeiten der Sortierung.

3.4 Globale Recyclingpartnerschaften

Neben dem Metallrecycling in industrialisierten Ländern rückt der Fokus zunehmend auch auf Schwellen- und Entwicklungsländer. Erhebliche Mengen an Schrott werden dorthin verfrachtet. Ein vielversprechender Ansatz („Best-of-two-Worlds“) ist es, „Sammlung und Zerlegung von metallhaltigen Abfällen in den Ursprungsländern zu organisieren und ein technisches Recycling in dafür optimierten Anlagen in Industrieländern durchzuführen. Aufgrund der hohen Dynamik in der Entwicklung von elektrischen und elektronischen Produkten können Schwellen- gegenüber Industrieländern profitieren. Die Vielfalt an Produkten und der darin eingesetzten Metalle erfordert für ein effizientes Recycling eine schnell anpassbare Zerletechnik. Ein spezialisiertes händisches Zerlegen zu günstigeren Personalkosten in Schwellenländern kann einen Vorteil gegenüber automatisierten Prozessen und teuren Personalkosten in Industrieländern darstellen. Wichtig ist dabei, dass die Sammlung und Zerlegung in formalen Strukturen organisiert wird. Nur so können Umwelt- und Sozialstandards eingeführt werden und möglichst viel Wertschöpfung vor Ort generiert werden. Die nachfolgende grenzüberschreitende Rückführung von Metallen ist notwendig, um möglichst viele Metalle effizient wiederzugewinnen. Denn ein technisches Recycling vor Ort ist aufgrund fehlender oder ineffizienter Anlagen meist nicht möglich“ (Bleher, Schüler 2016). Damit kein „cherry-picking“ – also die Fokussierung auf ökonomisch interessante Abfallfraktionen – entsteht, sind Lösungen für Abfälle zu finden, deren Recycling keinen Gewinn abwirft, sondern vielmehr Kosten verursacht. Erste Projekte konnten zeigen, dass sich dieser „Best-of-two-Worlds“- Ansatz für alle Beteiligten ökonomisch wie ökologisch lohnen kann (Bleher, Schüler 2016).

4 Fazit und Möglichkeiten für einen Pfadwechsel

Im Folgenden werden die wichtigsten Pfadabhängigkeiten zusammengefasst, die das Recycling von Technologiemetallen be- bzw. verhindern. Außerdem werden ihre Auswirkungen auf mögliche Transformationsansätze betrachtet und erste Handlungsempfehlungen gegeben, wie Pfadabhängigkeiten aufgebrochen werden könnten.

4.1 Pfadabhängigkeiten

Der Lock-in, also die Tatsache, dass vorherrschende Standards und bestimmte Nutzungsweisen kaum eine Entwicklung des Recyclings von Technologiemetallen zu lassen, ist auf ein Zusammenspiel von unterschiedlichen Faktoren zurückzuführen. Lange stand die sichere und umweltfreundliche Entsorgung im Fokus der Abfallwirtschaft. Stoffliche und thermische Verwertung dienten zu Beginn vor allem der Reduktion der Restabfallmengen angesichts befürchteter Entsorgungsnotstände. Die Regulierung durch die Abfallgesetzgebung orientiert sich bis dato an den Hauptmassenströmen, sie vernachlässigt insgesamt die Problematik der dissipativen Verluste im Bereich der Technologiemetalle. Eine Erhöhung des Rückgewinnungsgrades stößt vor allem auf folgende Pfadabhängigkeiten:

- Die dissipative Verwendung von Technologiemetallen in Endprodukten erschwert das Recycling. Hierunter ist die hohe räumliche Verteilung der Rohstoffe durch die Verwendung jeweils geringer Mengen in einer Vielzahl (verschiedener) Produkte zu verstehen. Hochkomplexe, global vernetzte und sich dauernd ändernde Ströme zehntausender verschiedener Materialien sind weitere Kennzeichen dieser Form der Pfadabhängigkeit. Hinzu kommt der Trend zur Verkleinerung von Strukturen durch Miniaturisierung und Leistungsverdichtung. Zur Realisierung von Mikrosystemen ist die Verarbeitung einer weitaus größeren Palette von Technologiemetallen bzw. Materialkombinationen notwendig. Aus der komplexen und dissipativen Bauweise und Materialzusammensetzung resultiert eine ökonomisch und technologisch erschwerte Rezyklierbarkeit der Technologiemetalle.
- Pfadabhängigkeiten bestehen in den vorhandenen Sammel- und Logistik(infra)strukturen, die sich in Jahrzehnten entwickelt und etabliert haben. Die Erfassung und Sammlung von technologiemetallhaltigen Abfällen sowie die Einsteuerung dieser Abfälle in die dafür am besten geeigneten Recyclingketten ist unzureichend. Dies gilt vor allem für Altprodukte aus dem Konsumbereich. Der Rückgewinnungsgrad für die Technologiemetalle lässt sich nicht grundlegend verbessern, wenn die Sammlung und Rückführung der Produkte starke Schwächen aufweist.
- Die Aufbereitungsverfahren für Altprodukte und Schrotte sind heute noch weitestgehend auf Massenströme ausgelegt. Shredderprozesse dominieren, z.B. Shredder für Elektroschrotte oder Altautos mit hohem Stahlanteil). Shreddern von technologiemetallhaltigen Produkten ohne Vorzerlegung führt zur Verteilung der Technologiemetalle in alle Outputströme und damit zu großen Verlusten. Die Demontage dient in erster Linie der Schadstoffentfrachtung, nur in geringem Maße werden verwertbare Komponenten freigelegt. Begünstigt wird die Ausrichtung auf eine Verwertung der Massenströme durch die WEEE-Direktive bzw. nationale Gesetze zur Rücknahme von Altgeräten und Produkten, wie das Elektro-Gesetz, die massebasierte Verwertungsquoten vorgeben.
- Erhebliche Mengen der technologiemetallhaltigen Altgeräte und –produkte fließen nicht in den geregelten Stoffkreislauf zurück. Grund sind legale und illegale Exporte von Altprodukten

in Entwicklungs- und Schwellenländer. Über 150.000 Tonnen deutscher Elektronikschrott gelangen jedes Jahr nach Afrika und Asien. In Entwicklungs- und Schwellenländern (Ghana, Nigeria, Indien, China etc.) erfolgt das Metallrecycling in informellen Sektoren, meist händisch und mit unsachgemäßen Methoden, so dass die in den Schrotten enthaltenen Schwermetalle und giftigen organischen Substanzen freigesetzt werden und sowohl die Gesundheit der dort tätigen Menschen als auch die Umwelt belasten.

- Das Recycling von Technologiemetallen ist eingebettet in internationale Rohstoffmärkte. Monetäre Anreize bestehen für die Wiedergewinnung der Edelmetalle (Kupfer, Silber, Gold, Platingruppenmetalle), wobei auch noch weitere Inhaltsstoffe wie Gallium, Indium, Antimon oder Tellur wiedergewonnen werden können. Solche Wertschöpfungskonstellationen gelingen jedoch nur vereinzelt und für wenige Abfallfraktionen. Volatile Preise, wie sie zum Beispiel bei Seltenen Erdelementen festzustellen sind, verhindern Investitionen in Anlagen zum Recycling von Technologiemetallen.

Die genannten Pfadabhängigkeiten bedingen sich in hohem Maße gegenseitig. Der rechtliche Rahmen der Abfall- und Kreislaufwirtschaft fördert massebasierte Verwertungspfade. Dadurch, dass Produkte komplexer werden, wird es tendenziell schwieriger Technologiemetalle, die nur in geringen Konzentrationen eingesetzt werden, zu recyceln, was den massebasierten Verwertungspfad zementiert. Diese Abhängigkeit steht einem Richtungswechsel entgegen, der es ermöglicht, den Rückgewinnungsgrad von Technologiemetallen deutlich zu steigern.

4.2 Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf die Transformationsansätze

Die zentrale Herausforderung der Transformation ist es, die bisher massebasierten Verwertungsströme um qualitative Kriterien zu erweitern, so dass Technologiemetalle, die nur in relativ geringen Mengen eingesetzt werden, in hochwertige metallurgische Recyclingpfade geführt werden. Das massenfokussierte Standardrecycling ist dazu ungeeignet.

Der bisher dominierende Fokus auf Durchsatz und Kosten ist auf Spurenelemente, Wert und Prozessqualität hin auszurichten. Verbesserungspotenziale liegen in der Erfassung und Demontage von Altprodukten sowie Aufbereitung von Konzentraten für die metallurgische Rückgewinnung von Stoffen. Hinzu kommt, dass bisher nur für einen Teil der Technologiemetalle Verfahren zur Rückgewinnung etabliert sind. Für viele Stoffe, wie Seltene Erden, müssen erst noch geeignete Verfahren entwickelt werden.

Auf die in Kapitel 3 vorgestellten Transformationsansätze wirken sich die Pfadabhängigkeiten mit unterschiedlicher Intensität aus. Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert dabei das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für eine umfassende Ausweitung des Recyclings von Technologiemetallen dar (siehe Tabelle 2).

Besonders stark ausgeprägt ist die Pfadabhängigkeit bei der Dissipation der Technologiemetalle. Durch die zunehmende Miniaturisierung und Leistungsverdichtung werden immer geringere Konzentrationen von Technologiemetallen für vergleichbare Funktionen verwendet. Gleichzeitig nimmt die Vielfalt der Stoff- und Materialkombinationen zu. Dadurch beschleunigt sich die Dissipation der Technologiemetalle. Die Entwicklung der Recyclingverfahren kann dem gegenüber kaum Schritt halten.

Zwar steigert der Trend zur Miniaturisierung die Ressourceneffizienz, tatsächlich ist sie aber in ihrer heutigen Form, wie Martin Held und Jörg Schindler feststellen, ein „grundlegender Teil des Problems“ (Held, Schindler 2016). Es ist aber nicht davon ausgehen, dass sich an diesem Trend absehbar etwas ändert oder gar die beschleunigte Dissipation rasch und konsequent umzukehren ist.

Ähnlich groß sind die Pfadabhängigkeiten, wenn es um die ökologische Produktgestaltung geht, die auf demontage- und verwertungsfreundliche Konstruktion abzielt, insbesondere bei Innovationen, wie das Fairphone, die eine grundlegende Neukonfiguration herkömmlicher Wertschöpfungsketten erfordert. Dies leisten eher Firmen, die in der Nische operieren. Am ehesten anschlussfähig ist die Effizienzstrategie zur Optimierung der Sammel- und Aufarbeitungslogistik –bzw. –verfahren im vorherrschenden Verwertungssystem.

Tabelle 2: Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf Transformationsansätze

Transformationsansatz Leitstrategie Pfadabhängigkeit	Öko-Design Konsistenz/ Effizienz	Retro-Logistik Effizienz	Pre-Shreddering Effizienz	Glob. Recycling-partnerschaften Effizienz
Dissipative Verwendung	stark	stark	stark	stark
Sammel- und Logistik (infra)-strukturen	stark	stark	stark	stark
Shredder-basierte Aufarbeitung	stark	gering	stark	mittel
Legale und illegale Exporte von Altprodukten	gering	gering	gering	stark
Internationale Rohstoffmärkte	mittel	gering	mittel	mittel

Quelle: Eigene Darstellung.

4.3 Handlungsempfehlungen

Ein Pfadwechsel erfordert Innovationen bei Logistik-, Trennungs-, Aufbereitungs- und Recyclingverfahren. Die damit verbundenen Prozessdynamiken illustriert die folgende Abbildung.



Abbildung 3: Pfadwechsel

Quelle: IZT, eigene Darstellung

Um das Recycling von Technologiemetallen zu verbessern, bedürfen unternehmerische Innovationen flankierender Maßnahmen auf politischen Entscheidungsebenen. Folgende Maßnahmenbereiche sind zentral und greifen ineinander, um von massebasierten Recyclingstrukturen zu einem nachhaltigen Ressourcenmanagement zu kommen, dass eine hohe Recyclingquote von Technologiemetallen ermöglicht.

WEEE - Ergänzung massebasierter Verwertungsquoten um qualitative Kriterien mit Blick auf Technologiemetalle: Die WEEE-Richtlinie setzt bisher Recycling- und Verwertungsquoten fest. So müssen ab dem Jahr 2016 45 Prozent (%) und ab dem Jahr 2019 sogar 65 % des Durchschnittsgewichts der in den drei Vorjahren in Verkehr gebrachten Elektrogeräte gesammelt werden. Über massebasierte Quoten hinaus sollten zusätzlich für Technologiemetalle spezifische Verwertungsraten bzw. Anforderungen definiert werden.

Standardisierung von technologiemetallhaltigen Produkten bezüglich einer recyclinggerechten Konstruktion: Die Ökodesign-Richtlinie sollte neben dem Energieverbrauch um Umwelt- und Ressourcenaspekte bezüglich der Technologiemetalle erweitert werden. Bis dato gibt es außer vereinzelt Informationspflichten keine Maßnahmen zur Steigerung der Wiederverwertung oder Recyclingfähigkeit.

Alternative Sammelsysteme und effiziente Umsetzung des Elektroschrottexportverbots - Den rechtlichen Rahmen schaffen: Das schwächste Glied in der Recyclingkette ist die unzureichende Sammlung und der (legale und illegale) Export von Altprodukten. Neben den etablierten Sammelsystemen sind speziell für Kleingeräte alternative Sammelsysteme erforderlich (z.B. Pfandsysteme). Außerdem ist

eine effiziente Umsetzung des Verbots des Elektroschrottexports notwendig. Die im Rahmen der Novellierung der WEEE-Richtlinie eingeführte Beweislastumkehr ist hierzu ein wichtiger Schritt, weitere, wie z.B. zertifizierte Prüfungen der Altgeräte auf ihre Funktionsfähigkeit müssten folgen.

Verbesserung der Investitionssicherheit von Recyclingbetrieben: Langfristige Investitionen in die Entwicklung von Recyclingverfahren und den Aufbau von Verwertungsanlagen sowie die Unsicherheit der künftigen Preisentwicklung bei Technologiemetallen bedeuten ein hohes Risiko für Investoren (Bleher, Schüler 2011). Hinzu kommen die im Bereich der Abfallverbrennung niedrigen Entsorgungspreise, so dass der Kostendruck für die Recyclingbetriebe deutlich zunimmt. Die Investitionsbanken (KfW, EIB) könnten dazu beitragen, die Risiken für die Investoren zu reduzieren.

Internationale Recyclingkooperationen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern: Eine Recyclingpartnerschaft zwischen Industrie- und Entwicklungsländern könnte dazu beitragen, dass der Elektroschrott gesammelt wird und in Recyclinganlagen statt informellen Verwertungswegen („Hinterhof-Recycling“) verwertet wird. Zum einen böte dies eine sichere Zugangsquelle zu Rohstoffen für beteiligte Staaten, zum anderen verbesserte gesundheitliche und umweltfreundliche Bedingungen sowie einen fairen Gewinnanteil für die teilnehmenden Entwicklungsländer (z.B. Ghana, Nigeria). Solche Recyclingpartnerschaften sind weiterzuentwickeln und auszubauen. Wichtige Akteure sind die großen Metall-Endrecycler, u. a. Umicore (Belgien), Aurubis (Deutschland) und Boliden-Rönnskär (Schweden), Investitionsbanken, EU-Kommission sowie Netzwerke wie das German RETech Partnership, ein Netzwerk deutscher Unternehmen und Institutionen der Entsorgungs- und Recyclingbranche für den Export von innovativen Technologien und für den Know-how-Transfer.

Anhang

Akteure im Bereich der Rohstoffmärkte

Akteure	Interessen, Ziele und Herausforderungen
<p>Exploration/Extraktion</p> <p>EU: EUROMINES, EPMF</p> <p>International: IPA</p>	<p>Steuerliche Erleichterung für Explorationsvorhaben</p> <p>Abbau diskriminierender Lizenzverfahren</p> <p>Konkretere und intensivere politische Maßnahmen bei Kreislaufwirtschaft, Ressourcen- und Materialeffizienz</p> <p>Immer intensivere finanzielle und technologische Bemühungen für Förderung notwendig</p> <p>Immer höhere Umwelt- und Sozialstandards erschweren Wirtschaftlichkeit</p> <p>Reaktion auf Nachfrage nur langsam möglich</p> <p>Quelle: Ecologic Institut (2014), EUROMINES (o. J.), Schüler (2016), USGS (2016)</p>
<p>Raffinade/Aufbereitung</p> <p>EU: EUROMINES, EPMF</p> <p>International: IPA</p>	<p>Ausbau der Transportinfrastruktur</p> <p>Konkretere und intensivere politische Maßnahmen bei Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz</p> <p>Mangelndes Know-How bzgl. Seltene Erden (EU)</p> <p>Immer höhere Umwelt- und Sozialstandards erschweren Wirtschaftlichkeit</p> <p>Quelle: Ecologic Institut (2014), EUROMINES (o. J.), Schüler (2016), USGS (2016)</p>
<p>Handel</p> <p>National: VDM</p> <p>EU: LME</p>	<p>Einhaltung und Abbau von Handelshemmnissen (Exportzölle und -beschränkungen)</p> <p>Abbau von Korruption und Intransparenz</p> <p>Konkretere und intensivere politische Maßnahmen bei Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz</p> <p>Zunahme an Spekulationen, Preisschwankungen</p> <p>Angebot und Nachfrage zeitlich verzögert und sehr schwer vorhersehbar</p> <p>Quelle: EVD (2013), LME (2011), TAB (2012),</p>
<p>Wirtschaft und Industrie (Produktion)</p> <p>National: BDI, WVM, VDMA, DIHK</p>	<p>Abbau von Handels- und Wettbewerbsverzerrungen (Exportzölle, Diskriminierende Lizenzverfahren)</p> <p>Bilaterale Rohstoffpartnerschaften</p> <p>Diversifizierung der Rohstoffbezugsquellen</p>

<p>EU: IMA, EUROMEATUX, Fairphone, OXFORD PV</p>	<p>Konsistente politische Maßnahmen bei Kreislaufwirtschaft, Ressourcen- und Materialeffizienz</p> <p>TTIP (<u>kontroverse Positionen</u>)</p> <p>Höhere Umwelt- und Sozialstandards (z.B. REACH)</p> <p>Nachhaltigkeit (CSR, EE usw.)</p> <p>Subventionen für Umwelttechnologien</p> <p>Alternative Geschäftsmodelle: Genossenschaftliche Strukturen, Crowdfunding, nicht gewinnorientierte Unternehmen</p> <p>Alternative Produkte: Ökodesign (z.B. Perowskit-Solarzelle), konfliktfreie Geräte (z.B. Fairphone)</p> <p>Quelle: BDI (2015), Ecologic Institut (2014), EUROMETAUX (2014), IMA (2015), Reller (2016) TAB (2012), Tantiwechwuttikul (2015), VDMA (2015a, 2015b), WVM (2015)</p>
<p>Recycling/ Entsorgung</p> <p>National: BVSE</p> <p>EU: EERA, EREAN</p> <p>Global: BIR</p>	<p>Verbesserung der Rahmenbedingungen für Recycling und Kreislaufwirtschaft im Bereich Infrastruktur/Logistik, Produktdesign, Subventionen sowie Technologien</p> <p>Politischer Paradigmenwechsel weg vom massebasierten Recycling (Seltene Erden)</p> <p>Eindämmung der illegaler Abfallexporte</p> <p>Schließung der Deponien</p> <p>Intensivere Förderung des Öko-Designs</p> <p>Produktdesign erschwert Recyclingmaßnahmen</p> <p>Wirtschaft: unrentables Recycling von Gewürzmetallen (→Shredderverfahren, Dissipation)</p> <p>Defizite hinsichtlich Know-How und Technologie</p> <p>Schwierige Strukturen bzgl. Sammlung/Zerlegung</p> <p>Bedeutungsgewinn von Urban Mining</p> <p>EERA (o. J.), ERECON (2016), Huismann et al. (2015), Schüler (2016),</p>

Akteure im Bereich politischer Entscheidungsträger

Akteure	Interessen, Ziele und Herausforderungen
National - Exekutive	
Wirtschaft/Industrie BMW, DERA, BGR	Versorgungssicherheit Bekämpfung von Handelshemmnissen und Wettbewerbsverzerrungen Diversifizierung von Rohstoffquellen

	<p>Recycling, Rohstoff- und Materialeffizienz</p> <p>bilaterale Rohstoffpartnerschaften</p> <p>Förderung der Wertschöpfungsketten in Deutschland</p> <p>Monitoring, Informationszugang</p> <p>Zertifizierungssysteme für Rohstoffe</p> <p>Quelle: BMWi (2010), Reller (2016)</p>
<p>Umwelt</p> <p>BMUB, UBA</p>	<p>Nachhaltige Rohstoffversorgung, Ressourcen- und Materialeffizienz</p> <p>Recyclingmaßnahmen</p> <p>Ressourcen- und umweltschonende Produktion und Konsum</p> <p>Umwelt-, Sozial- und Transparenzstandards</p> <p>Forschungsförderung, Reduktion der Zielkonflikte zu anderen Politikfeldern</p> <p>Quelle: (BMUB 2016)</p>
<p>Entwicklung</p> <p>BMZ</p>	<p>Nachhaltige und entwicklungsorientierte Rohstoffpolitik</p> <p>Abbau von Korruption, Verbesserung der Transparenz</p> <p>Technologie- und Wissenstransfer, Bildungsförderung</p> <p>Wertschöpfungskette in Entwicklungsländern fördern</p> <p>Exportbeschränkungen als entwicklungspolitisches Instrument dulden</p> <p>Quelle: BMZ (2010)</p>
<p>Verteidigung</p> <p>BMVG</p>	<p>Sicherung der Rohstoffversorgung für den Hochtechnologiesektor und die Rüstungsindustrie, Sicherheitspolitische Rohstoffpolitik</p> <p>Sicherung der Transportwege des Welthandel</p> <p>Zugangsbeschränkung zu Rohstoffen reduzieren</p> <p>Eindämmung von Piraterie und Sabotage</p> <p>Quelle: BMVG (2011)</p>
<p>Forschung</p> <p>BMBF, BMUB, BMWi</p>	<p>Nachhaltige Rohstoffpolitik, Forschungsprogramme, Rohstoffversorgung, Zukunftsfähigkeit</p> <p>Förderung technischer Innovationen</p> <p>Umweltschonende und soziale Rohstoffgewinnung</p> <p>Substitutions- und Recyclingschwerpunkte</p> <p>F&E für Entwicklungsländer</p> <p>Quelle: BMBF(2012), (BMUB 2016), Schüler (2016)</p>

National - Legislative	
<p>Regierungskoalition CDU, CSU, SPD</p>	<p>Rohstoffsicherung, fairer Wettbewerb auf dem Weltmarkt, Recycling, Rohstoff- und Materialeffizienz, Substitution</p> <p>Abbau der Handelshemmnisse</p> <p>Kooperationen und Partnerschaften (auch bilateral)</p> <p>Förderung der Wertschöpfungsketten in Deutschland</p> <p>Zertifizierungssysteme</p> <p>Dialog zwischen Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft</p> <p>Ausbau des Monitoring</p> <p>Quelle: CDU, CSU, SPD (2013)</p>
<p>Opposition Bündnis90/Die Grünen, Die Linke</p>	<p>Rohstoffsicherung, Umwelt-, Sozial- und Transparenzstandards, Zugeständnisse für Entwicklungsländer, nachhaltige Rohstoffpolitik (partei-spezifisch)</p> <p>Intensivere Nachhaltigkeitsmaßnahmen (Öko-Design, Recycling, Substitution, Effizienz)</p> <p>Ausnahmeregelung bei Exporteinschränkungen für Entwicklungsländer</p> <p>gesamtheitliche EU-Rohstoffpolitik statt bilaterale nationale Kooperationen</p> <p>Verbindliche unternehmerische Pflicht auf Verzicht von Konfliktmineralien</p> <p>Quelle: Bündnis90/Die Grünen (2013); Die Linke (2016)</p>
EU: Europäische Kommission (Programme, Initiativen und Netzwerke)	
<p>EREP = European Resource Efficiency Platform</p>	<p>Förderung von Marktwachstum und Jobsicherheit, Ressourcen- und Materialeffizienz, freier Informationszugang</p> <p>Förderung des Mittelstandes</p> <p>Vermeidung und Kontrolle umweltrelevanter Stoffe (REACH)</p> <p>Ökodesign und Ökozertifizierung</p> <p>Kreislaufwirtschaft und Recycling</p> <p>Quelle: EREP (2012)</p>
<p>RMI = Raw Material Initiative</p>	<p>Faire und dauerhafte Versorgung mit Rohstoffen von den Weltmärkten, Förderung von Marktwachstum und Jobsicherheit, nachhaltige europäische Binnenversorgung, Ressourcen-effizienz, Recycling, Europäische Wertschöpfung</p> <p>Bekämpfung von Handelshemmnissen und Wettbewerbsverzerrungen + Partnerschaften (z.B. Joint Africa-EU Strategy)</p>

	<p>Multi-Stakeholder Expertengruppen und Netzwerke (z.B. Raw Materials Supply Group)</p> <p>Forschung zu kritischen Rohstoffen</p> <p>Transparenzmaßnahmen</p> <p>Eindämmung illegaler Abfallexporte</p> <p>Quelle: Europäische Kommission (2016), Mez & Abdolvand (2016)</p>
<p>ERECON = European Rare Earths Competency Network</p>	<p>Versorgungssicherheit der europäischen Wirtschaft mit Seltenen Erden, Ressourcen- und Materialeffizienz, Aufbau einer europäischen Wertschöpfungskette</p> <p>Potentialabschätzung für Europäische Förderung</p> <p>Know-How für Recycling und Aufbereitung</p> <p>Spezielle politische Rahmenbedingungen</p> <p>Politischer Paradigmenwechsel weg vom massebasierten Recycling</p> <p>Quelle: ERECON (2016), ERECON (o. J.)</p>
<p>EIP = European Innovation Partnership on Raw Materials</p>	<p>Versorgungs- und Beschäftigungssicherheit, Ressourcen Effizienz, Green-Economy-Technologien, Stakeholder-Dialog, Umwelt- und Sozialstandards</p> <p>Multi-Stakeholder Expertengruppen und Netzwerke (z.B. COBALT)</p> <p>Finanzielle Innovationsförderung</p> <p>Verbesserung der Forschungs- und Bildungsinfrastruktur</p> <p>Quelle: Ecologic Institut (2014), Europäische Kommission (2016)</p>
<p>CES = Circular Economy Strategy</p>	<p>Schutz natürlicher Ressourcen, Nachhaltige Entwicklung, Green Economy, Entwicklung neuer Geschäftsmöglichkeiten, Versorgungssicherheit</p> <p>Überarbeitung der Ökodesign Richtlinie (Statt Hauptziel: Effizienz → auch: Langlebigkeit, Nachrüstbarkeit, Recyclingfähigkeit usw.)</p> <p>Nachhaltige Handels- und Entwicklungspolitik</p> <p>Erweiterte Herstellerverantwortung bzgl. Recycling</p> <p>Quelle: Europäische Kommission (2015)</p>
<p>International</p>	
<p>Entwicklung IGF</p>	<p>Stärkung der rohstoffreichen Entwicklungs- und Schwellenländer auf internationaler Ebene, Wettbewerbsfähigkeit</p> <p>Stärkung der lokalen Wertschöpfung gegenüber multinationaler Konzernen</p> <p>Sicherheits- und Sozialstandards gemäß OECD,</p>

	<p>Bildungsmaßnahmen für den Rohstoffsektor</p> <p>Umweltmanagement, Renaturierungsmaßnahmen</p> <p>Quellen: IGF (2013)</p>
<p>Handel</p> <p>WTO, OECD</p>	<p>Liberalisierung/Abbau von Handelshemmnissen, Grundsatz der Nicht-diskriminierung, Transparenz und Berechenbarkeit des Marktzugangs, Gewährleistung eines liberalen Weltmarktes</p> <p>Schiedsgerichtsaufgaben</p> <p>Beitrittsverhandlung weiterer Nationen</p> <p>Forum für Verhandlungen</p> <p>Leitsätze für Multinationale Unternehmen</p> <p>Quelle: EDV (2013)</p>
<p>Umwelt</p> <p>UNEP</p>	<p>Schutz natürlicher Ressourcen, Nachhaltige Entwicklung, Green Economy, Kreislaufwirtschaft</p> <p>Substitution</p> <p>Urban Mining</p> <p>Rückgewinnung der Technologiemetalle im Vordergrund</p> <p>Ressourcen- und Materialeffizienz</p> <p>Quelle: UNEP (2012)</p>
<p>Transparenz und Governance</p> <p>Dodd-Frank-Act, EITI</p>	<p>Konfliktfreie Rohstoffe, Transparenz im Rohstoffsektor, Zertifizierungssysteme, Multi-Stakeholder-Zusammenschluss</p> <p>Nachweise über Handelsketten</p> <p>Sorgfaltspflicht der Unternehmen</p> <p>Gold, Tantal, Wolfram und Zinn gelten als potentielle Konfliktstoffe</p> <p>Quellen: EITI (2016), Reller (2016)</p>

Akteure im Bereich Zivilgesellschaft

Akteure	Interessen, Ziele und Herausforderungen
<p>CSOs — Umwelt</p> <p>National: PowerShift, Heinrich Böll Stiftung, DNR</p> <p>EU: EEB</p> <p>Global: Greenpeace</p>	<p>Schutz natürlicher Ressourcen und Lebensräume, Recycling, Rohstoff- und Materialeffizienz, , Ökologisch nachhaltige Produktionsketten</p> <p>Verzicht auf umweltgiftige Stoffe</p> <p>Gesellschaftliches Umweltbewusstsein stärken</p> <p>Reduktion des Verbrauches von Primärrohstoffen</p>

	<p>Umweltrelevante Produktinformationen für Verbraucher</p> <p>Lobbyismus in der Rohstoffpolitik bekämpfen</p> <p>Quelle: AK Rohstoffe (2013), COBALT (2014)</p>
<p>CSOs — Menschen-rechte, Soziales</p> <p>Kirchlich: CiR</p> <p>National: Germanwatch, ASW, FÖS, Misereor</p> <p>Global: Global Witness, The Enough Projekt</p>	<p>Konfliktfreie Rohstoffe, Sozialstandards, globale Ressourcengerechtigkeit, Menschenrechte, Arbeitsbedingungen, Umweltstandards</p> <p>Ausnahmeregelung bei Exporteinschränkungen für Entwicklungsländer</p> <p>Gesetzlich verbindliche Sorgfaltspflichten für Unternehmen (Konfliktrohstoffe, Menschenrechte)</p> <p>Zurückgewinnung demokratischer Spielräume in der Rohstoffpolitik</p> <p>Transparenzmaßnahmen hinsichtlich Konfliktmetall</p> <p>Indigene Völker stärken; Land-grabbing Eindämmen</p> <p>Lobbyismus in der Rohstoffpolitik bekämpfen</p> <p>Quelle: AK Rohstoffe (2013), Walz et al. (2016)</p>
<p>CSOs — Entwicklung</p> <p>National: Kampagne Bergwerk Peru, KK Mosambik, Africavenir</p>	<p>Entwicklungspolitische Rohstoffpolitik, Eindämmung der Marktmacht multinationaler Konzerne, lokale Wertschöpfung</p> <p>Indigene Völker stärken; Land-grabbing eindämmen</p> <p>Ausnahmeregelung bei Exporteinschränkungen für Entwicklungsländer</p> <p>Bildungsmaßnahmen</p> <p>Lokale Wertschöpfung fördern</p> <p>Lobbyismus in der Rohstoffpolitik bekämpfen</p> <p>Governance- und Transparenzbemühungen</p> <p>Quelle: AK Rohstoffe (2013), Oxfam (2010), Walz et al. (2016)</p>
<p>Verbraucherverbände</p> <p>National: AK Rohstoffe, vzbv</p>	<p>Verbraucherinformationen, Transparenz der Stoffströme, Zertifizierungssysteme, erweiterte Herstellerverantwortung</p> <p>Verbraucherfreundliche Informationen bzgl. Materialien für Hochtechnologien</p> <p>Informationspflicht für Unternehmen</p> <p>Gesetzlich verbindliche Verantwortung für Unternehmen hinsichtlich Umweltzerstörung, Konfliktrohstoffe</p> <p>Quelle: AK Rohstoffe (2014), Reller (2016)</p>
<p>Gewerkschaften</p> <p>EU: ETUC</p>	<p>Beschäftigungssicherheit, Sozialstandards, Lohnstandards, Gesundheitliche Aspekte, Stärkung der Arbeiterrechte</p> <p>Quelle: Eco Institute (2014), ETUC (2015)</p>

- C2C-Network (2012): Policy Recommendations.
http://www.c2cn.eu/sites/default/files/C2C_policy_recom72-def-jan2012.pdf.
- Chancerel, P.; Rotter, V.S. Recycling-oriented characterization of small waste electric and electronic equipment, in: Waste Management 29 (8), 2009: 2336-2352.
- Chen, W., Wu, Y., Yue, Y., Liu, J, Zhang, W., Yang, X., Chen, H., Bi, E.Ashraful, I., Grätzel, M. Han, L. (2015): Efficient and stable large-area perovskite solar cells with inorganic charge extraction layers. Science Vol. 350, Issue 6263, pp. 944-948.
- C't (201: Fairphone 2 im Test: Das erste "modulare" Smartphone, <http://www.heise.de/news-ticker/meldung/Fairphone-2-im-Test-Das-erste-modulare-Smartphone-3043417.html>.
- Die Linke (2016): Positionspapier: Internationale Rohstoffpolitik.
<http://www.linksfraktion.de/themen/rohstoffpolitik-internationale/>.
- Ecologic Institut (2014): 1st Working paper on COBALT Opening Conference Report.
http://www.cobalt-fp7.eu/pdf/working_papers/COBALT%201st%20working%20paper.pdf.
- EITI (2016). THE EITI STANDARD 2016.
https://eiti.org/files/english_eiti_standard_0.pdf.
- EVD (Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement) (2013): WTO-Grundprinzipien.
http://www.seco.admin.ch/themen/00513/01122/index.html?lang=de&download=NHzLp-Zeg7t,lnp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCGdYN2f2ym162epYbg2c_JJkbNoKSn6A-
-
- EERA (o. J.): Aims and objectives.
http://www.eera-recyclers.com/sites/default/files/Aims%20and%20objectives_0.pdf.
- ERECON (2016): Policy Brief No. 2.
<http://erean.eu/wordpress/wp-content/uploads/2016/02/EREAN-Policy-Brief-NR2.pdf>.
- ERECON (o. J.): Strengthening of the European Rare Earths Supply Chain - Challenges and policy options.
http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon/index_en.htm.
- EREP (2012): Manifesto & Policy Recommendations.
http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/documents/erep_manifesto_and_policy_recommendations_31-03-2014.pdf.
- ETUC (2015): Paris Manifesto - Stand up in solidarity for quality jobs, workers' rights and a fair society in Europe.
<https://www.etuc.org/documents/paris-manifesto-stand-solidarity-quality-jobs-workers%E2%80%99-rights-and-fair-society-europe#.VufTrEa8qh6>.
- EUROMETAUX (2013): Joint Statement on E.U – U.S. Transatlantic Trade and Investment Partnership.
http://www.eurometaux.org/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=6082&PortalId=0&TabId=57.

Euromines (o. J.): Position on Resource Efficiency.

<http://www.euromines.org/files/publications/position-resource-efficiency.pdf>.

Europäische Kommission (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, https://www.google.de/search?q=KfW+%282010%29:+Kreditanstalt+f%C3%BCr+Wiederaufbau:+Kritische+Rohstoffe+f%C3%BCr+Deutschland&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ei=0C36VseVLYOwsQG4koXwBg#q=Europ%C3%A4ischen+Kommission+kritischen+Materialien+2014+.

Europäische Kommission (2015): Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft.

http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PD.

Europäische Kommission (2016): Policy and strategy for raw materials.

http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/policy-strategy/index_en.htm.

Germanwatch (2012): Alte Handys & PCs, <https://germanwatch.org/fr/download/3858.pdf>.

Hagelücken, Ch. (o.J): Edelmetallrecycling – Status und Entwicklungen, 44. Metallurgisches Seminar, Heft 121 der Schriftenreihe der GDMB.

Hagelücken, Ch. (2012): Recycling von Handys und Computern - Kreislaufwirtschaft der Edel- und Sondermetalle. 12. Münchner Wissenschaftstage, 2012.

Held, M., Schindler, J. (2016): Kritische Metalle in der Großen Transformation, Gesprächskreis Die Transformateure, <https://transformateure.files.wordpress.com/2016/05/paper-kritische-metalle-in-der-groc39fen-transformation.pdf>.

Huisman, J., Botezatu, I., Herreras, L., Liddane, M., Hintsa, J., Luda di Cortemiglia, V., Leroy, P., Vermeersch, E., Mohanty, S., van den Brink, S., Ghenciu, B., Dimitrova, D., Nash, E., Shryane, T., Wieting, M., Kehoe, J., Baldé, C.P., Magalini, F., Zanasi, A., Ruini, F., and Bonzio, A., (2015): Countering WEEE Illegal Trade (CWIT) Summary Report, Market Assessment, Legal Analysis, Crime Analysis and Recommendations Roadmap.

<http://www.bir.org/assets/Documents/escrap/CWIT-Final-SummaryLow.pdf>.

IMA — Industrial Minerals Association (2015): Position Paper on Circular Economy from 12 EU resource manufacturing industries.

http://www.ima-europe.eu/sites/ima-europe.eu/files/publications/2015%2004%2002%20Circular%20Economy%20from%2012%20EU%20resource%20manufacturing%20industries..._0.pdf.

Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development (2013): A MINING POLICY FRAMEWORK — Mining and Sustainable Development.

<http://globaldialogue.info/MPFOct2013.pdf>.

ISI/IZT (2009): Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien, http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Schlussbericht_lang_20090515_final.pdf.

- JRC (2013): Joint Research Center „Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector“.
- Kümmerer, K. (2016). Konzentration, Funktionalität und Dissipation – Grundkategorien zum Verständnis der Verfügbarkeit metallischer Rohstoffe. In: Kümmerer [Hrsg.] (2016): Kritische Metalle in der Großen Transformation. Heidelberg.
- KfW (2011): Kreditanstalt für Wiederaufbau: Kritische Rohstoffe für Deutschland, <https://www.kfw.de/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Kritische-Rohstoffe-KF.pdf>.
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L., Angerer, G., Marwede, M., Benecke, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. DERA Rohstoffinformationen 28:353 S., Berlin
- Mez, L., Abdolvand, B. (2016): Neue Ressourcenpolitik — nachhaltige Geopolitik? Staatliche Initiativen des globalen Nordens zu Sicherung von kritischen Rohstoffen am Beispiel der Seltenen Erden. In: Kümmerer [Hrsg.] (2016): Kritische Metalle in der Großen Transformation. Heidelberg.
- LME (London Metal Exchange) (2011): Anti-Corruption Policy. https://www.lme.com/~media/Files/Corporate%20Structure/LME_-_Anti_Corruption_Policy_doc_June_2011.pdf.
- Oxfam (2010): Die neue Jagd nach Ressourcen: Wie die EU-Handels- und Rohstoffpolitik Entwicklung bedroht https://www.oxfam.de/system/files/20101217_rohstoffbericht.pdf.
- Rat für Nachhaltige Entwicklung (2013): Crowdfunding sammelt Geld für nachhaltige Unternehmen. <https://www.werkstatt-n.de/aktuelles/uebersicht/detailansicht/artikel/crowdfunding-sammelt-geld-fuer-nachhaltige-unternehmungen/>.
- Reller, A., Achzet, B., Zepf, V. (2011): Unternehmensstrategien zur Sicherung von Rohstoffen In: PUTSCH Thema Umwelt 2/2001. https://www.wu.ac.at/fileadmin/wu/d/i/wgi/reller/reller6_unternehmensstrategien_zur_sicherung_von_rohstoffen.pdf.
- Reller, A., Dießenbacher J. (2016): Das „Fairphone“ — ein Impuls in Richtung nachhaltige Elektronik. In: Kümmerer [Hrsg.] (2016): Kritische Metalle in der Großen Transformation. Heidelberg.
- Rotter, V.; Flamme, S.; Ueberschaar, M.; Götze, R. (2012): Thermodynamische Herausforderung bei Recycling von Nebenmetallen, in: Thomé-Kozmiensky, K.J., Goldmann, D.: (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 6, Neuruppin 2012, S. 561-575.
- Schmidt, M. (2008): Die Bedeutung der Effizienz für Nachhaltigkeit – Chancen und Grenzen. In: Hartard, S.; Schaffer, A.; Giegrich, J. (Hg.): Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte. http://umwelt.hs-pforzheim.de/fileadmin/dokumente/2008/Effizienz_Suffizienz.pdf.

- Spiegel online (2010): Uno-Berechnung zu Elektroschrott: Gold-Berge auf Müllhalden, von Axel Bojanowski, <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/uno-berechnung-zu-elektroschrott-gold-berge-auf-muellhalden-a-679381.html>.
- TAB (2012): Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien – Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie. <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab150.pdf>.
- Tantiwechwuttikul (2015): Conference Report of EcoDesign 2015: Sustainability through innovation in product life cycle design. Osaka, Japan.
- UBA 2010: Export von Elektroaltgeräten, Dessau, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4000.pdf>.
- UNEP (2012): The need for reclamation of critical materials, such as rare earth metals. At: Biennium Conference of the Global Partnership on Waste Management GPWM, Osaka, Japan. <http://www.unep.org/gpwm/Portals/24123/images/Meetings/GPWM%20biennium%20conference/Vasili%20Nicoletopoulos-%20The%20need%20for%20reclamation%20of%20critical%20materials.pdf>.
- USGS (2016): MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2016. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>.
- VDM (2011): Eckpunkte einer Rohstoffstrategie für Europa. http://www.metallhandel-online.com/editool/archiv_presse/1323087143_05-12-2011_Rohstoffstrategie.pdf.
- VDMA (2015a): Kurzposition: Politik und Wirtschaft: Kurze Stellungnahmen zu aktuellen Streitfragen <http://www.vdma.org/documents/105628/6872272/WirtschaftspolitischePositionen2015.pdf/af740a1c-0632-4c50-98ed-4993adfd549a>.
- VDMA (2015b): KurzPosition: Politik und Wirtschaft: Freier Handel stärkt Wachstum und Beschäftigung. <http://www.vdma.org/documents/105628/2941310/Freier%20Handel/26b4d47a-207c-4f45-b0c0-b5ecb1232989?t=1457431022652>.
- Walz, R., Bodenheimer, M., Gandenberger, C. (2016): Kritikalität und Positionalität: Was ist kritisch für wen – und warum? In: Technologiemetalle und die Große Transformation. Heidelberg.
- Wilts, H., Lucas, R., Gries, N., Zirngiebl, M.: Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze, Wuppertal 2014.
- WVM (2015): ROHSTOFFPOLITIK: Position zum Thema Konflikthstoffe. [http://www.wvmetalle.de/presse/artikeldetail/?tx_artikel_feartikel\[artikel\]=877&tx_artikel_feartikel\[back\]=presse/&tx_artikel_feartikel\[action\]=show&cHash=8e6aa089db2bbbf5d64f5e0037123aa](http://www.wvmetalle.de/presse/artikeldetail/?tx_artikel_feartikel[artikel]=877&tx_artikel_feartikel[back]=presse/&tx_artikel_feartikel[action]=show&cHash=8e6aa089db2bbbf5d64f5e0037123aa).
- ZDNet 2012: Bitkom gegen Pfandsystem: „Handys sind keine Dosen“, <http://www.zdnet.de/41560721/bitkom-gegen-pfandsystem-handys-sind-keine-dosen/>.

ZVEI 2013: Positionspapier der Elektroindustrie zu Konfliktrohstoffen, <http://www.zvei.org/Publikationen/ZVEI-Konfliktrohstoffe.pdf>.

Impressum

IZT - Institut für Zukunftsstudien
und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH

Tel.: +49 (0) 30 803088-0

Fax: +49 (0) 30 803088-88

Schopenhauerstr. 26
14129 Berlin

Berlin, AG Charlottenburg, HRB 18 636

Wissenschaftlicher Direktor
Prof. Dr. Stephan Rammler

Geschäftsführer
Dr. Roland Nolte

Aufsichtsratsvorsitzende
Doris Sibum

ISBN 978-3-941374-41-6

www.izt.de
