

## Studie

# Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg

Stephanie Kroop, Theresa Kaufhold, Rosina Lohmeyer,  
Mario Mocker, Matthias Franke  
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

Martin Faulstich  
Beratender Ingenieur

Martin Kranert, Lea Böhme  
Marco Genslein, Detlef Clauß  
Universität Stuttgart Institut für Siedlungswasserbau,  
Wassergüte und Abfallwirtschaft

Förderkennzeichen: Z03R 12003-5

Laufzeit: 01.01.2013 - 30.09.2014

Die Arbeiten der Projekte der Zukunftsoffensive III werden mit Mitteln des Landes  
Baden-Württemberg gefördert.

Dezember 2014



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Impressum:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg  
An der Maxhütte 1  
92237 Sulzbach-Rosenberg  
Tel.: +49 (0)9661 908-400  
Fax: +49 (0)9661 908-469

Universität Stuttgart Institut für Siedlungswasserbau,  
Wassergüte und Abfallwirtschaft  
Lehrstuhl für Abfallwirtschaft und Abluft  
Bandtäle 1  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0) 711 685 65500  
Fax: +49 (0) 711 685 65460

Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich  
Beratender Ingenieur  
Oberer Triftweg 18  
38640 Goslar

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg  
Kernerplatz 9  
70182 Stuttgart  
Telefon 0711 126-0  
Telefax 0711 126-2881

## Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Hintergrund und Veranlassung</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Zielstellung und Herangehensweise</b> .....	<b>11</b>
<b>3 Wirtschaftsstruktur Baden-Württemberg</b> .....	<b>15</b>
3.1 Auswahl der Leitbranchen.....	15
3.2 Automobilindustrie .....	17
3.3 Maschinenbau .....	19
3.4 Elektrotechnik- und Elektronikindustrie .....	20
3.5 Metallindustrie.....	21
3.6 Chemische Industrie.....	23
3.7 Papier- und Druck .....	24
<b>4 Auswahl wirtschaftsrelevanter Rohstoffe</b> .....	<b>26</b>
4.1 Potenziell versorgungskritische Rohstoffe / Rohstoff-Pool .....	26
4.2 Rohstoffbewertung .....	27
4.2.1 Bewertungskriterium 1: Wirtschaftlicher Gewichtungindex ....	28
4.2.2 Bewertungskriterium 2: Mengenindex .....	32
4.2.3 Bewertungskriterium 3: Rohstoff-Risiko-Index .....	34
4.3 Rohstoff-Ranking .....	38
4.3.1 Vorgehensweise .....	38
4.3.2 Ergebnisse .....	40
4.3.3 Mögliche Verschiebungen aufgrund der Wirtschaftsentwicklung .....	43
<b>5 Statusanalyse der Primärrohstoffgewinnung</b> .....	<b>47</b>
5.1 Mengenanalyse.....	48
5.2 Regionale Rohstoffkonzentration .....	51
5.3 Länderrisiko der Produktion .....	54
5.4 Koppelproduktion.....	57
5.5 Umweltwirkungen .....	59
5.6 Ökotoxizität und Humantoxizität.....	64
5.7 Konfliktmineralien.....	67
<b>6 Statusanalyse der Sekundärrohstoffgewinnung</b> .....	<b>69</b>
6.1 Sekundärrohstoffpotenziale .....	69
6.1.1 Potenziale in kommunalen Abfallströmen .....	69
6.1.2 Potenziale in gewerblichen Abfallströmen .....	80
6.1.3 Bewertung der ermittelten Sekundärpotenziale.....	91
6.2 Betrachtung von Rückgewinnungsverfahren .....	94

<b>7</b>	<b>Identifikation und Auswahl möglicher Effizienzmaßnahmen .....</b>	<b>103</b>
7.1	Allgemeine Aspekte und Steuerungsansätze für Ressourceneffizienz.....	103
7.2	Akteursplattform Ressourceneffizienz .....	107
7.3	Leuchtturmprojekte für BW.....	108
7.3.1	Gründung eines Think Tanks für Industrie- und Ressourcenpolitik.....	109
7.3.2	Forschungs- und Entwicklungsverbund Ressourceneffizienz ..	111
7.3.3	Zentrale Phosphor-Recyclinganlage .....	113
7.3.4	Demontagefabrik im urbanen Raum .....	115
7.3.5	Effizienteste Rohstoff-Mine der Welt.....	117
7.4	Weitere Maßnahmen und Roadmap .....	119
7.4.1	Lenkungswirkung rohstoffpolitischer Steuerungsinstrumente	119
7.4.2	Ausweitung der Datenerhebung zu gewerblichen Abfällen unter Berücksichtigung / Anpassung des Abfallrechts.....	119
7.4.3	Erkennung und Vermeidung dissipativer Verluste.....	120
7.4.4	Einschleusung von Sekundärrohstoffen in Primärprozesse .....	121
7.4.5	Konzentration auf wertstoffhaltige Abfallfraktionen .....	121
7.4.6	Weitere Priorisierung der Rohstoffe.....	121
7.4.7	Verbesserung der Datenlage .....	122
7.4.8	Erweiterung der Fact-Sheets auf weitere Rohstoffe oder Stoffströme .....	122
7.4.9	Zusammenfassende Übersicht.....	123
	<b>Quellen .....</b>	<b>124</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>157</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>164</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>167</b>
	<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>170</b>

## Zusammenfassung

Eine sichere und nachhaltige Rohstoffversorgung ist essenziell, um den Wohlstand der Bevölkerung und die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaftsregion Baden-Württemberg auch für spätere Generationen zu gewährleisten. Vor diesem Hintergrund verfolgt die baden-württembergische Landesregierung die Entwicklung einer Strategie zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Ziel dieses Vorhabens ist es, einerseits die Rohstoffversorgung der baden-württembergischen Wirtschaft sicherzustellen und andererseits ökonomische, soziale und ökologische Belange angemessen zu berücksichtigen. Zugleich zielt die Strategie darauf ab, durch Innovation und Know-how-Vorsprünge neue Geschäftsfelder für die vor Ort ansässigen Unternehmen zu erschließen. Hierdurch würde schließlich die Zukunftsfähigkeit der Region weiter gestärkt werden.

Die vorliegende Studie zur »Analyse kritischer Rohstoffe« bildet zusammen mit anderen bereits abgeschlossenen und noch laufenden Projekten und Initiativen die wissenschaftliche Grundlage für die Ausarbeitung der »Landesstrategie Ressourceneffizienz«. Die Studie erfolgte in Zusammenarbeit verschiedener Projektpartner: dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) in Sulzbach-Rosenberg, Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, dem Inhaber des Lehrstuhls für Umwelt- und Energietechnik der TU Clausthal, und dem Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) in Stuttgart.

Zu Beginn erfolgte zunächst eine detaillierte Analyse der baden-württembergischen Wirtschaftsstruktur. Anhand von Bruttowertschöpfungs- und Umsatzzahlen wurden folgende Branchen des Verarbeitenden Gewerbes als Leitindustrien des Landes identifiziert: Automobilindustrie, Maschinenbau, Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, Metallindustrie, Chemische Industrie und die Papier- und Druckindustrie.

Anschließend wurde die Bedeutung wirtschaftsrelevanter und in der Fachliteratur als kritisch beurteilter Rohstoffe für Baden-Württemberg anhand dreier Kriterien bewertet: dem »Wirtschaftlichen Gewichtungswert«, dem »Mengenindex« und dem »Rohstoff-Risiko-Index«. Hieraus wurde eine Rangfolge in Form eines Rohstoff-Rankings abgeleitet. Die zehn Rohstoffe mit der höchsten Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg sind demnach

- Antimon
- Beryllium
- Germanium

- Kobalt
- Molybdän
- Platinmetalle
- Seltenerdmetalle
- Tantal
- Titan
- Wolfram

Diese zehn Industrierohstoffe wurden anschließend im Hinblick auf ihre Primär-gewinnungsverfahren untersucht. Hierfür wurden neben den Produktionsmengen und Rohstoffvorkommen auch die Angebotskonzentrationen der Förderländer sowie ihre politische und ökologische Leistung bewertet. Vor allem Beryllium, Germanium, die Platinmetalle und Tantal werden nur in sehr geringem Umfang gefördert. Daneben weisen die drei Rohstoffe Antimon, Molybdän und Wolfram sehr geringe statische Reichweiten auf. Nahezu jeder der untersuchten Rohstoffmärkte ist durch eine hohe Länderkonzentration geprägt. Die Hauptförderländer der vier Rohstoffe Antimon, Kobalt, Seltenerdmetalle und Tantal sind durch schwache Regierungsführung gekennzeichnet und die ökologischen Leistungen der Germanium, Platin und Tantal produzierenden Länder sind als schwach einzustufen. Daneben wurde auch untersucht, inwieweit ein Rohstoff als Nebenprodukt in Koppelproduktion anderer Hauptmetalle gewonnen wird. Hierdurch ist die Förderung stets abhängig von der Gewinnung anderer Rohstoffe. Bei Nachfragesprüngen droht hierdurch die Gefahr von Angebotsverknappung oder starken Preisanstiegen. Dieser technologische Aspekt der Rohstoffgewinnung spielt bei Germanium, Kobalt, Molybdän, den Platinmetallen und den Seltenen Erden eine Rolle. Ferner wurden auch die Umweltwirkungen des Bergbaus der einzelnen Rohstoffe untersucht. Hierbei wurde deutlich, dass insbesondere die Platinmetalle je Rohstoffeinheit enorme Wasser-, Energie- und Materialverbräuche aufweisen, die jedoch durch die geringen Produktionsmengen kompensiert werden. Beim Vergleich der Weltjahresproduktion weisen insbesondere Titan-dioxid, Molybdän und Antimon die größten Umweltwirkungen der Primär-gewinnung auf. Abschließend wurde geprüft, ob der Rohstoff als Konfliktmineral gilt, was für die Erze der beiden Metalle Tantal und Wolfram zutrifft.

Ferner wurden die bedeutendsten Sekundärrohstoffpotenziale in kommunalen und gewerblichen Abfällen ermittelt. Die Betrachtung verschiedener Stoffströme verdeutlichte, dass Schlämme, Schlacken, Aschen und Stäube aussichtsreiche Wertstoffpotenziale der Top-10-Rohstoffe enthalten.

Die Untersuchung des Status der bestehenden Recyclingverfahren zeigte, dass Rückgewinnungsverfahren nur bei wenigen der untersuchten Rohstoffe gut etabliert sind. Für alle Rohstoffe herrschen Erkenntnislücken über die genauen Recyclingquoten vor. Eine globale Patentrecherche stellte sich z.T. als problematisch dar, da die Schriften oftmals nur in der Amtssprache des Landes verfügbar sind, in dem die Anmeldung erfolgte. Daher sind einige Patente nur in russischer oder chinesischer Sprache als Volltext verfügbar. Generelle Hürden des Recyclings sind zusätzliche Reinigungsschritte aufgrund von Verunreinigungen, hohe Qualitätsanforderungen an Sekundärrohstoffe oder der Export von Gütern in Schwellenländer ohne geeignete Infrastruktur zur Rohstoffrückgewinnung. Als günstig für das Recycling wirken sich ökonomische Anreize, die Nutzung bereits vorhandener Infrastrukturen oder Technologien wie bei der Primärgewinnung sowie vorhandene Märkte aus. Diese positiven Effekte können zudem durch elementspezifische Recyclingziele bei gleichzeitiger Schaffung von Märkten ergänzt werden.

Bestehende Datenlücken erschwerten zum Teil die Forschungsarbeit der vorliegenden Studie. Diese umfassen sowohl globale Produktionsdaten und Zahlen zu Rohstoffvorkommen. Andererseits gestaltete es sich schwierig, Rohstoffgehalte von Gütern oder Anwendungen zu ermitteln. Hierdurch wurde die Identifizierung geeigneter Stoffströme und signifikanter Rohstoffgehalte in einzelnen Anwendungen stark erschwert. Hier sollte künftig ein vermehrter Erkenntnisgewinn angestrebt werden, um vorhandene Potenziale effektiv und sinnvoll identifizieren und nutzen zu können.

Um die theoretischen Erkenntnissen der Studie in die Praxis umzusetzen, wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber fünf ambitionierte Leuchtturmprojekte für Baden-Württemberg formuliert. Diese zielen darauf ab, Innovation und Wirtschaftlichkeit gleichermaßen zu berücksichtigen. Die Ausarbeitung der Projekte sowie Identifizierung von Ansatzpunkten und möglichem Handlungsbedarf geschah zum einen auf Grundlage der im Rahmen der Studie gewonnenen Erkenntnisse. Zum anderen lieferten die Arbeitskreise der »Akteursplattform Ressourceneffizienz« einen wertvollen Beitrag und wesentliche Ausgangspunkte hierfür, indem sie auf übergeordnete Themen und weitere Prioritäten hinwiesen. Um den als prioritär eingestuften Aspekten angemessen Rechnung zu tragen, wurden folgende Leuchtturmprojekte konzeptionell ausgearbeitet.

Die Gründung eines Think Tanks für Industrie- und Ressourcenpolitik, der von mehreren Partnern getragen und in Form eines übergeordneten und interdisziplinären Netzwerks dazu beitragen soll, gesellschaftspolitische und volkswirtschaftliche Interessen sowie industrie- und ressourcenpolitische Ziele zusammenzuführen. Unter Einbindung bereits bestehender Institutionen und Forschungseinrichtungen sollen hier zukünftige, konzertierte Maßnahmen, Aktivitäten und Initiativen im Bereich der volkswirtschaftlich wirksamen Industrie-

und Ressourcenpolitik koordiniert und Industrie und Politik in diesen Belangen beraten werden.

Darüber hinaus soll zur Verfolgung und Umsetzung der in den Arbeitskreisen identifizierten Handlungsansätze ein »Forschungs- und Entwicklungsverbund für Ressourceneffizienz« initiiert werden, der sich mit Aspekten der Rohstoff- und Ressourceneffizienz befasst. Ein solcher Forschungsverbund ermöglicht die Betrachtung unterschiedlicher Themengebiete und kann sowohl fach- und branchenspezifische Fragestellungen berücksichtigen, als auch auf übergeordneter Ebene interdisziplinäre Aspekte würdigen und Synergieeffekte generieren.

Des Weiteren soll an den Leitgedanken von grünen Städten der Zukunft angeknüpft werden, indem man dem Abfallmanagement – auch räumlich – eine zentrale Schlüsselrolle zuweist. Durch eine Demontagefabrik für Elektroaltgeräte im urbanen Raum soll bewiesen werden, dass Umweltverträglichkeit und Synergieeffekte von Gesellschaft und nachhaltigem Abfallmanagement nicht nur möglich, sondern dank neuer und innovativer Technologien auch sinnvoll und wünschenswert sind.

Als Referenzobjekt mit globaler Reichweite für Innovation und umweltverträglichen Bergbau soll im Rahmen einer Gemeinschaftsinitiative von VDMA, VCI, Umwelttechnik BW und verschiedenen Forschungs- und Hochschuleinrichtungen ein Konzept für die »effizienteste Mine der Welt« mit Wissen und Technologie aus Baden-Württemberg erarbeitet werden.

Überdies wird die Errichtung einer zentralen Phosphor-Rückgewinnungsanlage vorgeschlagen, in der vorwiegend Klärschlamm und Klärschlammaschen behandelt werden sollen, die aber gleichermaßen die Möglichkeit bietet, alternative Stoffströme als Inputmaterial nutzen möchte. Hierdurch soll der essenzielle, nicht erneuerbare Nährstoff Phosphor rückgewonnen und zu marktfähigen Preisen angeboten werden.

Mit Blick auf die Zukunft könnte Baden-Württemberg durch die Umsetzung der Strategie und der vorgestellten Leuchtturmprojekte nicht nur deutschlandweit, sondern auch international eine Vorreiterrolle in Sachen Ressourceneffizienz einnehmen und hiermit einen wesentlichen Beitrag zu nachhaltigerem Wirtschaften leisten.



## 1 Hintergrund und Veranlassung

Infolge der wachsenden Weltbevölkerung sowie der voranschreitenden Industrialisierung in wirtschaftlich aufstrebenden Schwellenländern stieg der globale Ressourcenverbrauch in den vergangenen Jahren deutlich an. Innerhalb der letzten drei Jahrzehnte hat sich die jährliche globale Ressourcenentnahme auf rund 60 Mrd Tonnen ungefähr verdoppelt [SERI 2009]. Neben den vornehmlich im Fokus der öffentlichen Wahrnehmung stehenden Energierohstoffen gewannen v. a. metallische und mineralische Rohstoffe zunehmend an Bedeutung [Krausmann et al. 2009]. Zudem wird für die Herstellung vieler Hightech-Produkte eine zunehmende Vielfalt an Elementen benötigt [UNEP 2013b]. Insbesondere diese Technologierohstoffe sind von erheblichen Marktveränderungen und der Gefahr von Preisvolatilität gekennzeichnet. Zugleich ist die Importabhängigkeit Deutschlands und seiner Industriestandorte in diesem Bereich zumeist noch ausgeprägter als im Energiesektor.

Als Wirtschaftsstandort mit sowohl traditionellen Industrien als auch einem hohen Anteil an Hightech-Unternehmen ist Baden-Württemberg in besonderem Maße auf eine sichere Versorgung von Rohstoffen zu ökonomisch angemessenen Preisen angewiesen. Die baden-württembergische Rohstoffwirtschaft befindet sich daher in einem diffizilen Spannungsfeld. Zum einen ist das Bundesland naturgemäß abhängig vom Import vieler Rohstoffe. Andererseits konzentriert sich ein Großteil der weltweiten Rohstoffentnahme auf Länder, die von politischer Instabilität geprägt sind [BMWfJ 2013].

Um die Attraktivität und internationale Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes und der dort ansässigen Unternehmen sowie den Wohlstand der Bevölkerung zu bewahren, ist eine nachhaltige Strategie zur Sicherung der Rohstoffversorgung erforderlich. Ein solches Konzept sollte jedoch nicht nur darauf ausgerichtet sein, Rohstoff- und Warenimporte durch langfristige Lieferverträge zu gewährleisten. Vor dem Hintergrund möglicher Versorgungsrisiken oder Lieferengpässen stellen die Erhöhung der Ressourceneffizienz, eine optimierte Ausschöpfung von Sekundärrohstoffpotenzialen und die Entwicklung der dafür notwendigen Technologien wichtige Kernthemen dar.

Zur Vermeidung möglicher Versorgungsengpässe wurde daher durch das Projektkonsortium die vorliegende Studie ausgearbeitet, die unter Berücksichtigung landesspezifischer Besonderheiten Innovationspotenziale für versorgungskritische Rohstoffe aufzeigt. Zugleich weist sie auf wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungsbedarf hin, der zur Erschließung der Potenziale erforderlich ist.

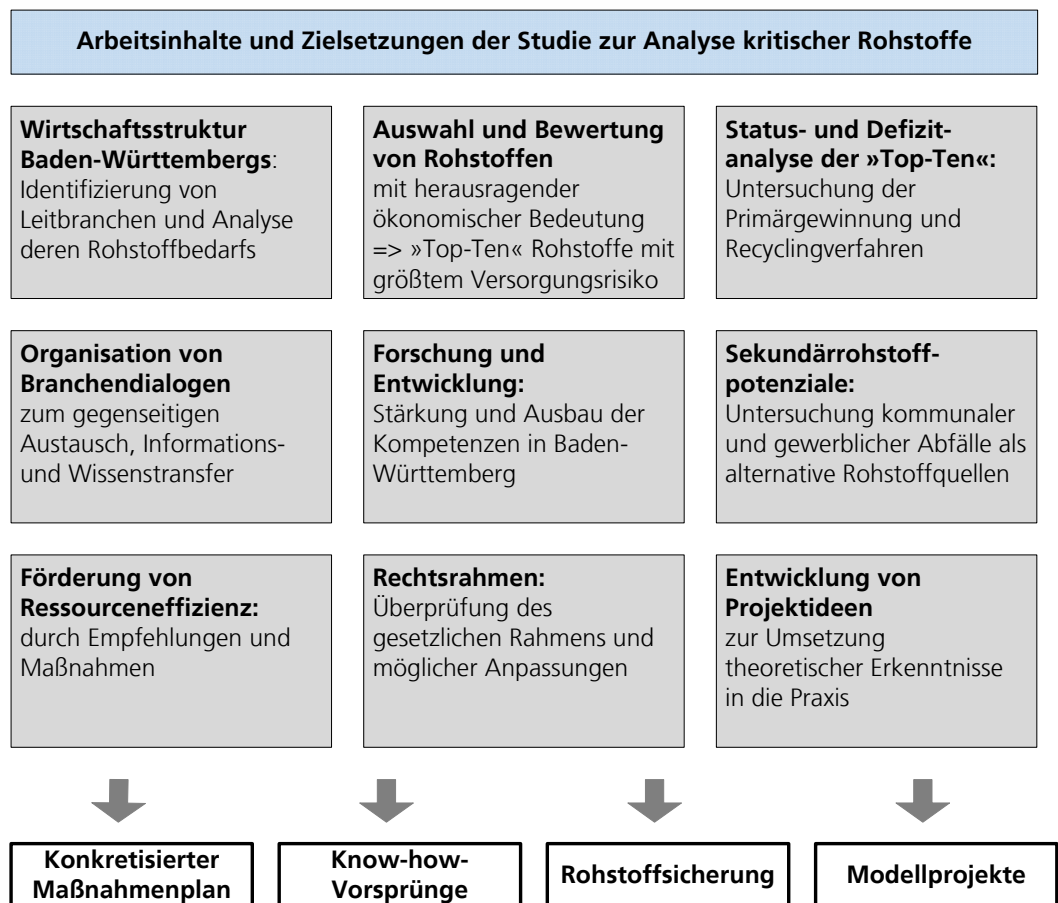
Auf diese Weise wird zum einen die Rohstoffversorgung der heimischen Industrie sichergestellt. Zum anderen können die Unternehmen im Land unmittelbar die im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens identifizierten Innovationsfelder besetzen und ihren Know-how-Vorsprung bei der Entwicklung entsprechender Technologien ausbauen.

## 2 Zielstellung und Herangehensweise

Essenziell für die Entwicklung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie ist die Kenntnis über den Bedarf der einzelnen Industriezweige an diesen Rohstoffen, der bislang kaum hinreichend genau eingeschätzt werden konnte. Ursächlich hierfür ist einerseits die Wettbewerbsrelevanz dieser unternehmensinternen Daten sowie die in großen Teilen bestehende Unkenntnis der Unternehmen über die Zusammensetzung der überwiegend bereits vormontierten Bauteile, die in den Werken des Landes weiterverarbeitet oder lediglich endmontiert werden.

Genau hier möchte die vorliegende Studie ansetzen und neben theoretischen Erkenntnissen auch Modellprojekte in die Praxis umsetzen. Hierdurch soll technologischer Entwicklungs- und Innovationsbedarf identifiziert werden, den die Unternehmen des Landes zur Stärkung der eigenen Wettbewerbsfähigkeit selbst umsetzen können. Ausgehend von diesem Hintergrund wurden die in Abbildung 1 dargestellten Arbeitsinhalte und Zielsetzungen formuliert.

**Abbildung 1:**  
Arbeitsinhalte und Zielsetzungen der Landesstrategie.



Zunächst sollte eine detaillierte Analyse der Wirtschaftsstruktur Baden-Württembergs erfolgen. Das Ziel war es, Leitbranchen des Wirtschaftsstandortes zu identifizieren, um anschließend deren Rohstoffbedarf sowie Materialflüsse innerhalb des Bundeslandes ermitteln zu können. Des Weiteren sollte die vorgefundene Datensituation hinsichtlich Validität und bestehender Datenlücken bewertet werden. Ausgehend davon können Vorschläge gemacht werden, um bestehenden Defiziten entgegen zu wirken. Für diese Aufgabe beauftragte das baden-württembergische Umweltministerium das Institut für angewandte Wirtschaftsforschung e.V. (IAW) in Tübingen, das Zugang zu vielfältigen wirtschaftsstatistischen Daten hat und mit den Branchenverbänden und Industrien vor Ort vernetzt ist.

Aufbauend auf dieses wirtschaftliche Datenfundament sollten bereits bestehende Kenntnisse zur Kritikalität wirtschaftsrelevanter Rohstoffe mit Blick auf Baden-Württemberg präzisiert werden. Neben diesen landesspezifischen Kriterien sollten weitere internationale Aspekte der Rohstoffverfügbarkeit berücksichtigt werden. Als Beispiel hierfür sind die regionale Verteilung von Rohstoffvorräten, die Konzentration auf den globalen Rohstoffmärkten oder mögliche ökologische Restriktionen bei der Rohstoffgewinnung genannt. Zusammenfassend sollte das Versorgungsrisiko der Rohstoffe gewichtet werden, um hieraus eine Rangfolge ausgewählter wirtschaftsrelevanter Rohstoffe ableiten zu können. Die Kritikalität der einzelnen Rohstoffe kann so in einem Schema nach Ampelprinzip (rot – gelb – grün) auf einfach verständliche Weise dargestellt werden.

Nach Identifizierung der für das Land Baden-Württemberg strategisch besonders relevanten Industrierohstoffe sollten die typischen primären Bereitstellungsketten für die zehn versorgungskritischsten Rohstoffe aufgezeigt werden. Ziel war es, eine Status- und Defizitanalyse der Primärgewinnung durchzuführen, um somit mögliche Verfügbarkeitsrisiken im Zusammenhang mit diesen Rohstoffen zu analysieren.

Ergänzend zur Untersuchung des Bergbaus sollten auch sekundäre Rohstoffquellen geprüft werden. Zum einen sollten die in den entsprechenden Industriezweigen und -branchen anfallenden produktionspezifischen Gewerbeabfälle hinsichtlich der Gehalte an den als versorgungskritisch eingeschätzten Rohstoffen beurteilt und damit heimische gewerbliche Sekundärrohstoffpotenziale aufgezeigt werden. Zum anderen sollten Sekundärrohstoffpotenziale ausgewählter kommunaler Abfallströme im Hinblick auf darin enthaltene Wertstoffe untersucht werden. Dies wurde durch das Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart realisiert.

Analog zur Statusanalyse zu Rohstoffbedarf und Rohstoffbereitstellung sollte überdies eine Analyse zum Entwicklungsstand von Recyclingtechnologien erfolgen und die Technologien im Rahmen einer Defizitanalyse bewertet werden. Hierfür

sollte eine globale Literatur- und Patentrecherche der am Weltmarkt bereits verfügbaren Technologien zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Sekundärrohstoffen durchgeführt werden. Besonders im Fokus sollten dabei Recycling- und Aufbereitungstechnologien von Primär- und Sekundärrohstoffen stehen, die für Baden-Württemberg als relevant eingestuft wurden.

Neben der Formulierung allgemeiner Handlungsansätze sollten zudem fünf Leuchtturmprojekte erarbeitet werden. Der Grund hierfür ist, dass die Landesregierung das Ziel verfolgt, technologische Defizite durch Modell- und Demonstrationsprojekte offensiv zu beheben und damit die Grundlagen für die Technologieführerschaft und somit Arbeitsplatzsicherung zu bilden. Da hiermit neben neuen Marktmöglichkeiten auch eine nachhaltige Quelle für die identifizierten wirtschaftsrelevanten Rohstoffe des produzierenden Gewerbes eröffnet wird, würde die einheimische Wirtschaft hiervon in zweifacher Hinsicht profitieren.

Im Rahmen weiterer vorbereitender Arbeiten zur Entwicklung einer »Landesstrategie Ressourceneffizienz« sollten die Projektergebnisse in Rohstoff- und Technologiesteckbriefen (»Fact-Sheets«) zusammengefasst werden. Die Fact-Sheets sollten jeden der für das Land Baden-Württemberg als besonders bedeutsam eingestuften Rohstoffe umfassen und alle entscheidungsrelevanten Informationen zusammenführen. Hierzu zählen neben Aspekten wie Mengenpotenziale, Kritikalität und Verfügbarkeit auch ökonomische und rechtliche Rahmenbedingungen und Restriktionen sowie die Definition erster rohstoffspezifischer Handlungsansätze. Einen wesentlichen Arbeitspunkt stellte hier auch die Entwicklung geeigneter Bewertungskriterien dar, die eine objektive Entscheidungsfindung bei der prioritären Rohstoff- bzw. Technologieauswahl erlauben. Auf diese Weise sollen Maßnahmen der Ressourcenstrategie vor allem dort ansetzen, wo mit gegebenem Aufwand der höchste ökologische, ökonomische und soziale Nutzen zu erzielen ist.

Im Vorhaben war von Beginn an eine enge Kooperation der Auftragnehmer mit dem Umweltministerium sowie Branchenverbänden vorgesehen. Hierfür sollten zunächst eigenständige Branchendialoge initiiert werden. In Abstimmung mit dem Ministerium wurde jedoch entschieden, hierfür die von Seiten des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft initiierte »Akteursplattform Ressourceneffizienz« zu nutzen. Damit sollte vermieden werden, dass inhaltlich verwandte Themen parallel auf mehreren Ebenen unabhängig voneinander diskutiert werden. Aus diesem Grund wurden die durch die Studie erlangten Erkenntnisse im Rahmen des ersten Stakeholder-Workshops der »Akteursplattform Ressourceneffizienz« am 27. Mai 2014 in Stuttgart vorgestellt und entsprechende Unterlagen (Fact-Sheets, Kurzzusammenfassung der Projektergebnisse) für die Arbeit in den verschiedenen Arbeitskreisen vorbereitet. Darüber hinaus waren und sind in den

jeweiligen Arbeitskreistreffen Vertreter des Projektkonsortiums vor Ort, um die relevanten Aspekte der Studie in die Arbeitskreisarbeit einzubringen.

Die Gesamtheit aller benötigten Daten lag während des Projektzeitraums ausschließlich für das Jahr 2010 vor. Aus diesem Grund wurde dieses Jahr als Bezugszeitraum für alle Statistiken wie etwa Wirtschaftsdaten, Außenhandel, erzeugte Abfallmenge, Bergbauaktivitäten oder für branchenspezifische Wirtschaftsdaten herangezogen.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Studie genauer beschrieben. Detaillierte Informationen zu primären Gewinnungsprozessen und auch die bereits beschriebenen Fact-Sheets können den Anlagen des Dokuments entnommen werden (siehe Anlage 1 und Anlage 2).

### 3 Wirtschaftsstruktur Baden-Württemberg

Zur Klärung der Begrifflichkeiten werden die verwendeten wirtschaftlichen Bezeichnungen kurz erläutert. Als Grundlage dient die Klassifikation der Wirtschaftszweige [WZ 2008]:

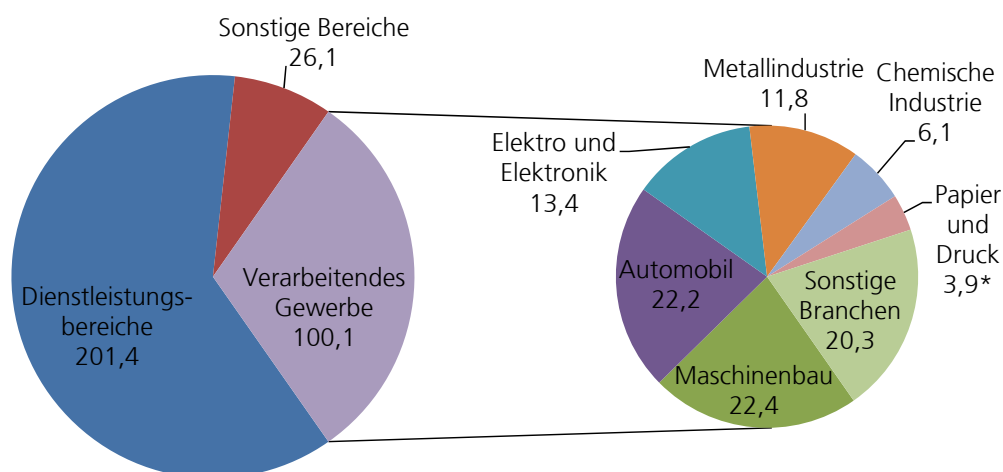
- Bei der Zuordnung von wirtschaftlichen Einheiten zu den verschiedenen Wirtschaftszweigen wird die erste Ebene als »Abschnitt« bezeichnet, die Zusammenfassung mehrerer Abschnitte als »Bereiche« (z. B. Dienstleistungsbereiche).
- Die zweite Ebene wird als »Abteilung« bezeichnet und ist zweistellig numerisch kodiert. Bei den sechs identifizierten Leitbranchen bilden je zwei Abteilungen eine »Branche« (z. B. werden die Abteilungen 24 und 25 als Branche der Metallindustrie zusammengefasst). Eine Ausnahme bildet der Maschinenbau, diese Branche besteht aus nur einer Abteilung, der Nr. 28.
- Die dritte Ebene wird als »Gruppe« oder auch »Sparte« bezeichnet und ist ebenfalls numerisch kodiert (z. B. 25.1 Stahl- und Leichtmetallbau).

#### 3.1 Auswahl der Leitbranchen

Grundlage für die Auswahl und Beschreibung der Leitbranchen sind die vom Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung (IAW) analysierten Wirtschaftsdaten [IAW 2013]. Die Auswahl der Branchen erfolgte anhand statistischer Kennwerte und fachlicher Kriterien. Der Dienstleistungssektor wurde von der Betrachtung ausgenommen, da der Bedarf an Rohstoffen in diesem Wirtschaftsbereich nur indirekt besteht.

Die Untersuchung des IAW identifizierte sechs maßgebende Leitindustrien, wobei es sich bei allen sechs Branchen um bedeutende Wirtschaftszweige des Verarbeitenden Gewerbes handelt. Die Bruttowertschöpfung (in jeweiligen Preisen) des badenwürttembergischen Verarbeitenden Gewerbes betrug im Jahr 2010 gut 100 Mrd €, was einem Anteil an der gesamten Bruttowertschöpfung des Landes von 30,5 Prozent entspricht [AK VGRdL 2014]. In Abbildung 2 ist die Bruttowertschöpfung (in jeweiligen Preisen) Baden-Württembergs, unterteilt in Dienstleistungsbereiche, Verarbeitendes Gewerbe und Sonstige Bereiche, dargestellt. Unter Sonstige Bereiche sind Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden, Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung u.Ä. sowie das Baugewerbe zusammengefasst (linke Hälfte der Abbildung 2).

**Abbildung 2:**  
Bruttowertschöpfung  
(in jeweiligen Preisen)  
der Bereiche und  
Branchen in Baden-  
Württemberg in Mrd €  
im Jahr 2010  
[AK VGRdL 2014].



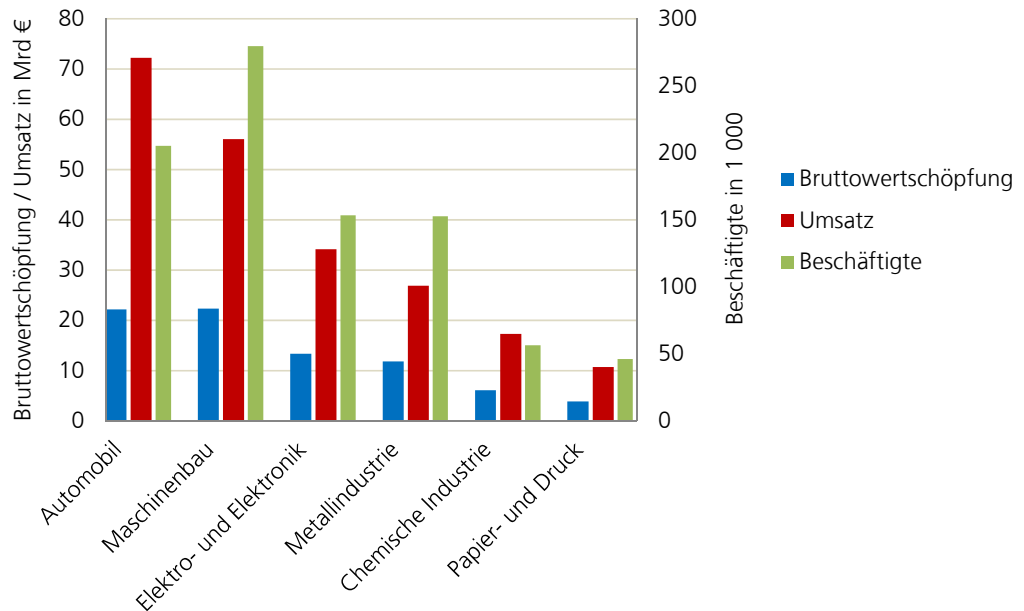
\*Wert geschätzt

Zudem zeigt Abbildung 2 auf der rechten Seite wie sich die Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes zusammensetzt, wobei die sechs Leitindustrien jeweils separat und alle anderen Branchen zusammengefasst dargestellt sind. Für die Bruttowertschöpfung der Papier- und Druckindustrie lag kein Wert vor, da nach IAW [2013] die amtliche Statistik aus Datenschutzgründen keine Wertschöpfungsdaten zur Verfügung stellt. Der Wert von 3,9 Mrd € wurde anhand von Umsatzdaten geschätzt (vgl. hierzu Kapitel 3.7). Der Maschinenbau und die Automobilindustrie tragen mit jeweils gut 22 Prozent zur Bruttowertschöpfung des baden-württembergischen Verarbeitenden Gewerbes bei, die Elektro- und Elektronikindustrie mit gut 13 Prozent und die Metallindustrie mit knapp 12 Prozent. Weitere 6 Prozent macht die Chemische Industrie aus und die Papier- und Druckindustrie schließlich trägt (nach oben genannter Schätzung) knapp 4 Prozent zur Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes bei.

Die Zahl der Erwerbstätigen in Baden-Württemberg betrug im Jahr 2010 gut 5,6 Mio, wobei knapp 16 Prozent, etwa 890 000 Beschäftigte, in den sechs Leitindustrien des Verarbeitenden Gewerbes tätig waren [AK VGRdL 2014; IAW 2013]. Aus Abbildung 3 wird die Bedeutung der Branchen hinsichtlich Bruttowertschöpfung, Umsatz und Beschäftigtenzahl ersichtlich.



**Abbildung 3:**  
Bruttowertschöpfung,  
Umsatz und  
Beschäftigte in den  
sechs Leitindustrien  
Baden Württembergs  
im Jahr 2010  
[AK VGRdL 2014,  
IAW 2013].



Beim Umsatz steht die Automobilindustrie an erster Stelle, die Bruttowertschöpfung ist in den Branchen Maschinenbau und Automobil nahezu identisch. Betrachtet man hingegen die Zahl der Beschäftigten, steht der Maschinenbau an erster Stelle. An dritter Stelle steht bei Betrachtung aller drei Kriterien die Elektro- und Elektronikindustrie, gefolgt von der Metallindustrie, der Chemischen Industrie und der Papier- und Druckindustrie.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Analyse der einzelnen Leitindustrien im Detail dargestellt. Dabei erfolgt auch ein Vergleich mit deutschlandweiten Zahlen.

### 3.2 Automobilindustrie

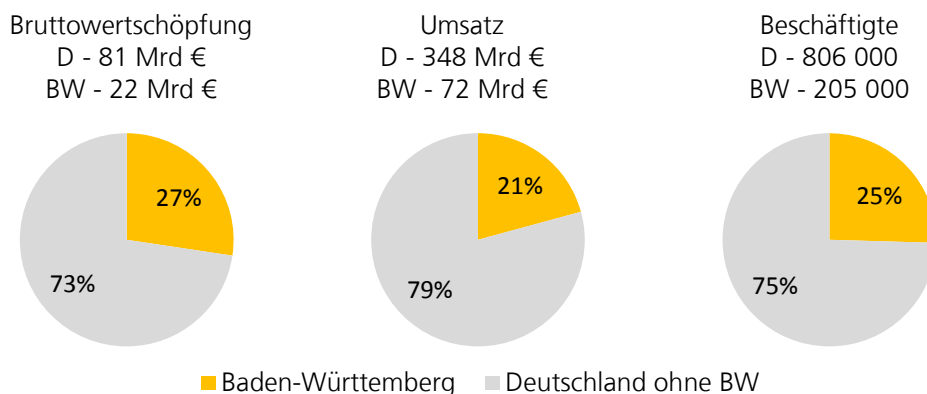
Der Fahrzeugbau umfasst die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren zur Personen- oder Güterbeförderung, die Herstellung von (Sattel-)Anhängern sowie verschiedener Teile und Zubehör (Abteilung 29), sowie den sonstigen Fahrzeugbau, wie den Schiffbau und die Herstellung von Booten, die Herstellung von Schienenfahrzeugen, Luft- und Raumfahrzeugen und die Herstellung von Teilen dafür (Abteilung 30) [WZ 2008]. Da jedoch der sonstige Fahrzeugbau bezüglich Bruttowertschöpfung und Umsatz eine sehr untergeordnete Rolle spielt, wird die Leitindustrie in dieser Studie in weiterer Folge als Automobilindustrie bezeichnet.

Die Automobilindustrie ist eng mit weiteren Branchen verknüpft, da sie Vorleistungen von Zulieferunternehmen (teils ebenfalls aus der Automobilindustrie,

teils aus anderen Branchen) bezieht. Zu den Zulieferprodukten, die nach der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 anderen Wirtschaftsbereichen zugeordnet werden, gehören beispielsweise Beleuchtungseinrichtungen, Kolben, Fahrzeugbatterien, Bereifungen, Gummierzeugnisse oder Windschutzscheiben [StaLa BW 2011].

Die folgende Abbildung 4 stellt Bruttowertschöpfung, Umsatz und Beschäftigtenzahl der Automobilbranche Baden-Württembergs im Vergleich zu Gesamtdeutschland dar.

**Abbildung 4:**  
Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Automobilbranche Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].



Die Automobilbranche ist sowohl Deutschlands als auch Baden-Württembergs umsatzstärkste Branche. Der Umsatz in Baden-Württemberg betrug 2010 etwa 72 Mrd €, wobei in Abteilung 29 knapp 98 Prozent des Umsatzes generiert wurde. Der Vergleich zu Deutschland macht deutlich, dass Baden-Württemberg einen entscheidenden Beitrag zur Wirtschaftsleistung der deutschen Automobilindustrie leistet: Baden-Württembergs Anteil am deutschlandweiten Umsatz betrug 2010 etwa 21 Prozent, bei der Bruttowertschöpfung waren es sogar 27 Prozent (Abbildung 4) [IAW 2013].

Mit gut 200 000 Beschäftigten lag jeder vierte Arbeitsplatz der deutschen Automobilindustrie in Baden-Württemberg (Abbildung 4) [IAW 2013]. Zu den namhaften Herstellern zählen die Daimler AG, die Porsche AG oder die Audi AG, im Bereich der Nutzfahrzeuge Mercedes-Benz LKW (Daimler AG), Volvo Busse Deutschland GmbH sowie die Kässbohrer Geländefahrzeug AG. Als bedeutende Zulieferunternehmen lassen sich neben zahlreichen kleinen und mittelständischen Unternehmen die Robert Bosch GmbH, die ZF Friedrichshafen AG oder die MANN+HUMMEL GmbH anführen [BW-I 2013a].

Die hohe Bedeutung Baden-Württembergs in der Automobilbranche zeigt sich auch im Bereich der Forschung und Entwicklung (FuE): Deutschlandweit lag das FuE-Investitionsvolumen in der Automobilindustrie im Jahr 2011 insgesamt bei rund 22 Mrd € [VDA 2013], wobei laut Verband der Automobilindustrie in Baden-Württemberg jährlich über 6 Mrd € investiert werden [VDA 2011] – was gut einem Viertel der deutschlandweiten Investition für FuE entspricht.

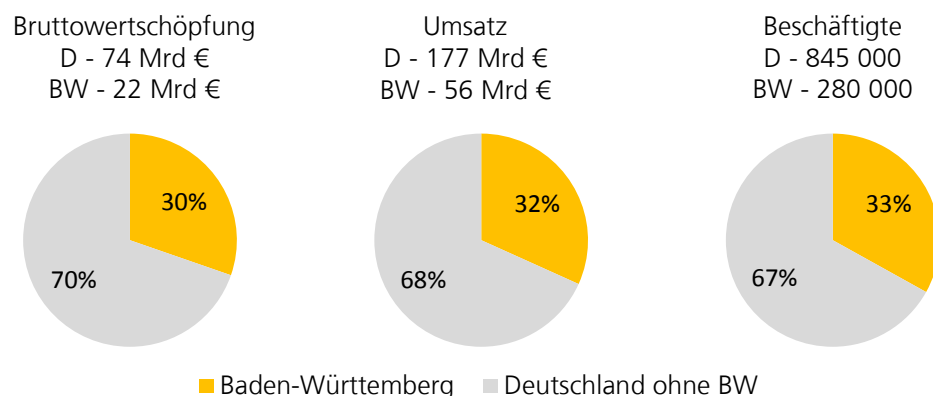
### 3.3 Maschinenbau

Gemäß der Klassifikation der Wirtschaftszweige umfasst der Maschinenbau (Abteilung 28) den Bau von Maschinen, die mechanisch oder durch Wärme auf Materialien einwirken oder an diesen Vorgänge durchführen sowie deren mechanische Bestandteile, die Kraft erzeugen und anwenden, und spezielle Teile dafür. Diese Vorrichtungen können fest, beweglich oder handgeführt sein. Diese Abteilung umfasst ferner die Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln [WZ 2008].

Wichtige Verbindungen entlang der Wertschöpfungskette bestehen zur Automobil-, Elektro-, sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie [BW-I 2013b].

Die folgende Abbildung 5 stellt Bruttowertschöpfung, Umsatz und Beschäftigtenzahl der Maschinenbaubranche Baden-Württembergs im Vergleich zu Gesamtdeutschland dar.

**Abbildung 5:**  
Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Maschinenbaubranche Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].



Nach der Automobilindustrie ist der Maschinenbau in Baden-Württemberg die Branche mit den höchsten Umsatzzahlen. Mit 56 Mrd € leistete Baden-Württemberg 2010 fast ein Drittel (32 Prozent) des deutschlandweiten Umsatzes (Abbildung 5). Dabei zeigt im Vergleich zu Deutschland insbesondere die Sparte

28.4 (Herstellung von Werkzeugmaschinen) hohe Umsatzzahlen: mit 6,9 Mrd € wurde in Baden-Württemberg gut die Hälfte des deutschlandweiten Umsatzes dieser Sparte erzielt [IAW 2013]. Gemessen an der Bruttowertschöpfung steht der Maschinenbau in Baden-Württemberg sogar an erster Stelle, knapp vor der Automobilindustrie. Sie betrug 22,4 Mrd € (Vergleich Automobilindustrie: 22,2 Mrd €).

Zieht man die Anzahl der Beschäftigten heran, so ist der Maschinenbau deutschlandweit die größte Branche. Mit knapp 280 000 Beschäftigten arbeitet dabei jeder dritte Beschäftigte der Branche in Baden-Württemberg (Abbildung 5), wobei auch ein Drittel der 30 größten Maschinenbauer Deutschlands in Baden-Württemberg angesiedelt ist. Bekannte Unternehmen sind die Robert Bosch GmbH, die Heidelberger Druckmaschinen AG, die Voith AG, die Tognum AG, die TRUMPF GmbH + Co. KG oder auch die Schuler AG [BW-I 2013b].

Mit FuE-Aufwendungen in Höhe von rund 1,5 Mrd € lag der Maschinenbau in Baden-Württemberg 2009 nach der Automobil- und der Elektrotechnik- und Elektronikbranche auf Platz 3 [StaLa BW 2012a]. Wichtige Forschungsthemen sind beispielsweise die Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Produktion, die Entwicklung von Technologien für energiesparende Antriebe mobiler Maschinen oder Erzeugungsanlagen für ein »Energiesystem im Wandel« [VDMA 2013].

### 3.4 Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

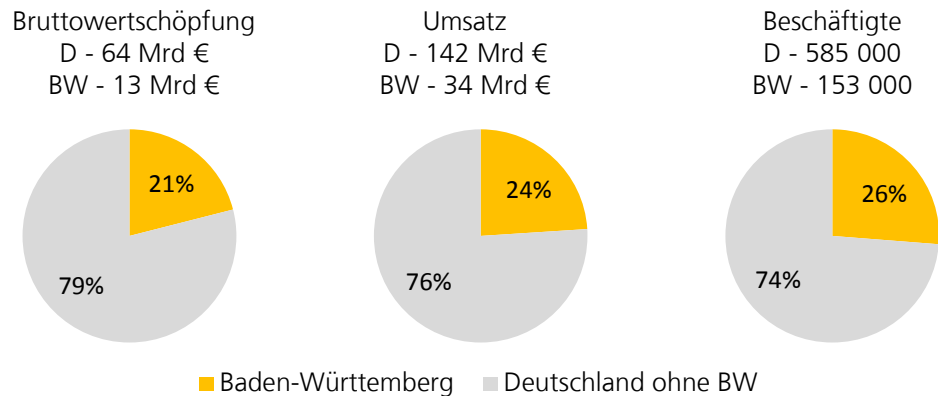
Der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie werden die Abteilungen 26 (Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen) und 27 (Herstellung von elektrischen Ausrüstungen) zugeordnet. Abteilung 26 umfasst unter anderem die Herstellung von Computern, peripheren Geräten, Telekommunikationsgeräten und ähnlichen elektronischen Erzeugnissen sowie von entsprechenden Produktkomponenten. Charakteristisches Merkmal der in diese Abteilung eingeordneten Herstellungsprozesse ist der Entwurf und die Anwendung von integrierten Schaltungen sowie die Anwendung hoch spezialisierter Miniaturisierungstechnologien. Abteilung 27 umfasst die Herstellung von Produkten, die Elektrizität erzeugen, verteilen und verwenden, die Herstellung elektrischer Beleuchtungs- und Signalgeräte sowie elektrischer Haushaltsgeräte [WZ 2008].

Wichtige Abnehmerbranchen sind die Automobilindustrie, der Maschinenbau die Medizintechnik sowie Umwelttechnologien [BW-I 2013c].

Die folgende Abbildung 6 stellt Bruttowertschöpfung, Umsatz und Beschäftigtenzahl der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie Baden-Württembergs im Vergleich zu Gesamtdeutschland dar.

**Abbildung 6:**

Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].



Sowohl bei der Bruttowertschöpfung als auch beim Umsatz lag die deutsche Elektrotechnik- und Elektronikbranche 2010 im Branchenvergleich auf Platz 3. Mit 13 Mrd € wurden in Baden-Württemberg 21 Prozent der bundesweiten Bruttowertschöpfung erzielt. Von den rund 142 Mrd € Umsatz im Bundesgebiet wurden im Land Baden-Württemberg gut 34 Mrd € (24 Prozent) erwirtschaftet (Abbildung 6) [IAW 2013].

Mit gut 153 000 Beschäftigten arbeitete 2010 mehr als ein Viertel aller in der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie in Deutschland Tätigen in Baden-Württemberg (Abbildung 6). Neben vielen mittelständischen Unternehmen haben Branchengrößen wie Robert Bosch GmbH, VARTA Consumer Batteries GmbH & Co. KGaA, Freudenberg & Co. KG oder auch Würth Elektronik GmbH & Co. KG ihren Hauptsitz in Baden-Württemberg [BW-I 2013c].

Interne FuE-Aufwendungen innerhalb der Branche lagen 2009 bei rund 1,8 Mrd € [StaLa BW 2012a].

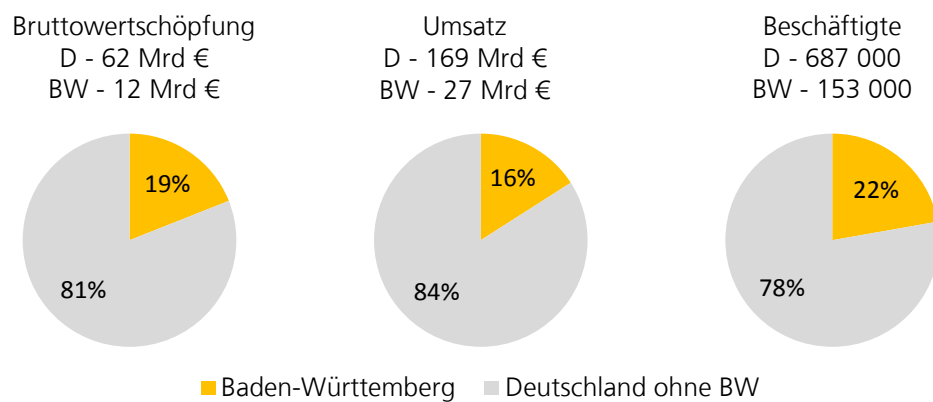
### 3.5 Metallindustrie

Der Metallindustrie werden die Abteilungen 24 (Metallerzeugung und -bearbeitung) und 25 (Herstellung von Metallerzeugnissen) zugeordnet. Abteilung 24 umfasst die Tätigkeiten des Schmelzens und Legierens von Eisen- und NE-Metallen aus Erz, Roheisen oder Schrott mittels verschiedener metallurgischer Verfahren, sowie die Herstellung von Legierungen und die Weiterverarbeitung durch Walz-, Zieh- und Extrusionsverfahren. Abteilung 25 umfasst die Herstellung von Metallerzeugnissen (wie Bauelemente, Behälter und Konstruktionen), die in der Regel statisch und unbeweglich sind [WZ 2008].

Die Metall be- und verarbeitende Industrie ist als Zulieferer eng mit den Abnehmern Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie, Medizintechnik sowie dem Maschinenbau verbunden [BW-I 2013d].

Die folgende Abbildung 7 stellt Bruttowertschöpfung, Umsatz und Beschäftigtenzahl der Metallindustrie Baden-Württembergs im Vergleich zu Gesamtdeutschland dar.

**Abbildung 7:**  
Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Metallindustrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].



Deutschlandweit wurden im Jahr 2010 in der Metallindustrie rund 62 Mrd € Bruttowertschöpfung generiert, wobei Baden-Württemberg davon 19 Prozent (knapp 12 Mrd €) erwirtschaftete. Zum deutschlandweiten Umsatz von 169 Mrd € trug Baden-Württemberg 27 Mrd € (16 Prozent) bei (Abbildung 7). Ein Vergleich zu Deutschland innerhalb der Branche macht deutlich, dass in Baden-Württemberg der Schwerpunkt bei der Herstellung von Metallerzeugnissen (Abteilung 25) liegt: hier wurden in Baden-Württemberg 74 Prozent des Umsatzes der Branche generiert, in Deutschland hingegen nur 46 Prozent [IAW 2013].

Von den 687 000 in der deutschen Metallindustrie Beschäftigten war mehr als ein Fünftel in Baden-Württemberg tätig (153 000) (Abbildung 7). Bekannte Unternehmen sind die Adolf Würth GmbH & Co. KG, MAHLE GmbH, LÄPPLE AG, Schuler AG, Unternehmensgruppe fischer sowie die Württembergische Metallwarenfabrik Aktiengesellschaft (WMF). Daneben ist die Branche durch eine Vielzahl hoch spezialisierter, klein- und mittelständisch strukturierter Unternehmen geprägt. Zudem befinden sich namhafte Forschungsinstitute, wie das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg, das Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart sowie das Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie (FEM) in Schwäbisch Gmünd in Baden-Württemberg, die die Unternehmen der Metallindustrie bei ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit unterstützen [BW-I 2013d].

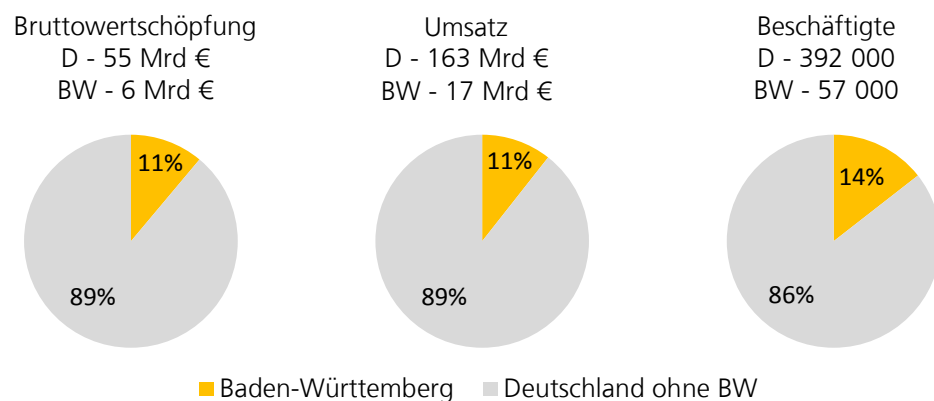
### 3.6 Chemische Industrie

Der Chemischen Industrie werden Abteilung 20 (Herstellung von chemischen Erzeugnissen) sowie Abteilung 21 (Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen) zugeordnet. Abteilung 20 umfasst die Verarbeitung organischer und anorganischer Rohstoffe zu chemischen Erzeugnissen. Abteilung 21 beinhaltet die Herstellung von pharmazeutischen Grundstoffen und Spezialitäten sowie die Herstellung von Arzneimitteln sowohl chemischen als auch botanischen Ursprungs [WZ 2008].

Die folgende Abbildung 8 stellt Bruttowertschöpfung, Umsatz und Beschäftigtenzahl der Chemischen Industrie Baden-Württembergs im Vergleich zu Gesamtdeutschland dar.

**Abbildung 8:**

Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der chemischen Industrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].



Der Anteil Baden-Württembergs an Bruttowertschöpfung und Umsatz betrug im Jahr 2010 jeweils 11 Prozent. Sie ist damit im Vergleich der sechs Leitindustrien die Branche mit dem niedrigsten Bruttowertschöpfungs- und Umsatzanteil (Abbildung 8). Deutschlandweit war die chemische Industrie mit einem Umsatz von 163 Mrd € viertstärkste Branche in Deutschland, in Baden-Württemberg landete die Branche auf Platz fünf. Während in Deutschland die Herstellung chemischer Erzeugnisse (Abteilung 20) mehr als drei Viertel (77 Prozent) des Branchenumsatzes ausmachte, waren es in Baden-Württemberg nur 57 Prozent. Somit ist der Umsatzanteil bei der Herstellung pharmazeutischer Erzeugnisse (Abteilung 21) in Baden-Württemberg (43 Prozent) im Vergleich zu Deutschland (23 Prozent) stark überdurchschnittlich [IAW 2013].

Mit knapp 57 000 Beschäftigten hat etwa ein Siebtel aller in der chemischen Industrie in Deutschland Tätigen einen Arbeitsplatz in Baden-Württemberg (Abbildung 8). Die Chemiebranche in Baden-Württemberg wird hauptsächlich durch klein- und mittelständische Unternehmen geprägt, rund 90 Prozent haben

weniger als 500 Beschäftigte. Aber auch große Unternehmen – insbesondere im Pharmabereich – sind in Baden-Württemberg angesiedelt. Als Beispiel lassen sich die ratiopharm GmbH (Teva Pharmaceuticals Industries Ltd.), die Roche Deutschland Holding GmbH, die Weleda AG oder die Boehringer Ingelheim Pharma GmbH anführen. Letztgenannte spielt auch für Forschung und Entwicklung eine wichtige Rolle: ihr größtes internationales Forschungs- und Entwicklungszentrum ist im baden-württembergischen Biberach angesiedelt [BWI 2013e].

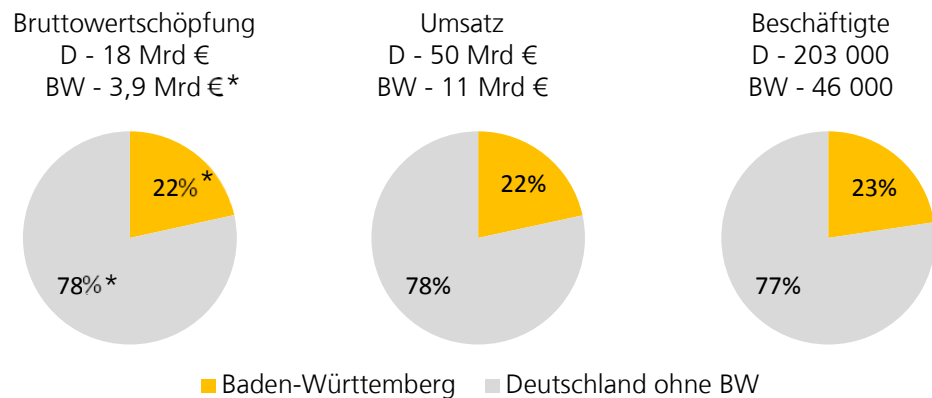
### 3.7 Papier- und Druck

Die Papier- und Druckbranche besteht aus den Abteilungen 17 und 18. Abteilung 17 (Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus) umfasst die Herstellung von Holz- und Zellstoff sowie veredelten Papiererzeugnissen, Abteilung 18 (Herstellung von Druckerzeugnissen; Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild und Datenträgern) das Drucken von Erzeugnissen wie Zeitungen, Zeitschriften, Bücher, Geschäftsvordrucke oder Grußkarten. Darüber hinaus beinhaltet die Abteilung auch Unterstützungstätigkeiten wie Buchbinderei und Data Imaging, sowie die Vervielfältigung bespielter Datenträger, beispielsweise CDs, Videoaufzeichnungen oder Software auf Bändern und Platten [WZ 2008].

Unter den Leitindustrien war die Papier- und Druckindustrie die einzige Branche, für die keine Daten zur im Jahr 2010 in Baden-Württemberg erzielten Bruttowertschöpfung vorlagen. Nach IAW [2013] stellt die amtliche Statistik für die Branche aus Datenschutzgründen keine Wertschöpfungsdaten zur Verfügung. Auch eine gezielte Anfrage beim Verband »Druck und Medien in Baden-Württemberg e. V.« ergab keinen konkreten Zahlenwert. Da jedoch für Berechnungen in Kapitel 4.2.1 ein Wert für die Bruttowertschöpfung benötigt wird, wurde ein Hilfwert hergeleitet. Hierzu wurde angenommen, dass der Anteil Baden-Württembergs an der deutschlandweiten Bruttowertschöpfung, in Analogie zum Umsatzanteil, 22 Prozent beträgt. Ein Vergleich von Umsatz- und Bruttowertschöpfungsanteil in den fünf anderen Leitindustrien zeigte, dass die Anteile ähnlich sind und sich maximal um wenige Prozentpunkte unterscheiden. Somit läge der für die Bruttowertschöpfung angenommene Wert für Baden-Württemberg bei 3,9 Mrd €. Die folgende Abbildung 9 stellt Bruttowertschöpfung (geschätzt), Umsatz und Beschäftigtenzahl der Papier- und Druckindustrie Baden-Württembergs im Vergleich zu Gesamtdeutschland dar.



**Abbildung 9:**  
Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Papier- und Druckindustrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].



\*Werte geschätzt

Im Vergleich der sechs Leitindustrien untereinander, wurde in der Papier- und Druckindustrie in Deutschland mit knapp 50 Mrd € der geringste Umsatz erzielt. Auf Baden-Württemberg entfallen jedoch mehr als 20 Prozent (knapp 11 Mrd €) des in Deutschland erwirtschafteten Umsatzes, was die Bedeutung Baden-Württembergs auch in dieser Branche sichtbar macht (Abbildung 9). Innerhalb der Branche dominierte sowohl in Baden-Württemberg als auch in Deutschland mit einem Umsatzanteil von mehr als 70 Prozent die Abteilung 17 (Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus) [IAW 2013].

Insgesamt waren in der Branche in Deutschland 2010 mehr als 200 000 Menschen beschäftigt, rund 46 000 davon in Baden-Württemberg (Abbildung 9).

## 4 Auswahl wirtschaftsrelevanter Rohstoffe

### 4.1 Potenziell versorgungskritische Rohstoffe / Rohstoff-Pool

Um für die Rohstoffbewertung eine größtmögliche Auswahl an kritischen Elementen zu erhalten, wurden mehrere nationale sowie internationale Kritikalitätsstudien der letzten Jahre betrachtet, wobei der Fokus sowohl geographisch als auch inhaltlich zwischen den Studien variiert. Es wurden acht Arbeiten ausgewählt, deren als kritisch eingestufte Rohstoffe eine spezifische Relevanz für Baden-Württemberg aufweisen könnten. Bei den Studien handelt es sich um: Rohstoffe für Zukunftstechnologien [Fraunhofer ISI 2009], Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential [UNEP 2009a], Critical raw materials for the EU [EC 2010], Rohstoffsituation Bayern – keine Zukunft ohne Rohstoffe [IW 2011], Kritische Rohstoffe für Deutschland [IZT 2011], Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy [NRC 2008], Material Security – Ensuring resource availability for the UK economy [Oakdene Hollins 2008] und Critical Materials Strategy [U.S. DOE 2011].

In diesen acht Veröffentlichungen wurden insgesamt 65 Rohstoffe (bzw. Rohstoffgruppen im Fall der Seltenerdmetalle und der Platinmetalle) auf ihre Bedeutung und Kritikalität untersucht. Alle Elemente, die in mindestens einer der Studien als kritisch oder relevant für Zukunftstechnologien eingestuft wurden, wurden in den Rohstoffpool aufgenommen und im weiteren Verlauf der vorliegenden Studie im Detail untersucht. Zusätzlich wurde Baryt in die Betrachtung aufgenommen, obwohl dieser mineralische Rohstoff in keiner der acht genannten Literaturquellen als kritisch eingestuft wurde. In der Studie der Europäischen Union wird diese Einschätzung aufgrund der geringen EU-weiten wirtschaftlichen Bedeutung abgegeben, das Versorgungsrisiko jedoch liegt bei Baryt im kritischen Bereich [EC 2010]. Da Baryt sowohl in der Automobil- als auch der Elektro- und Elektronikindustrie eingesetzt wird, wird die wirtschaftliche Bedeutung für Baden-Württemberg als hoch eingeschätzt und Baryt somit zusätzlich in die Betrachtung mit aufgenommen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die betrachteten Rohstoffe, wobei die für den Rohstoffpool ausgewählten Rohstoffe blau markiert sind.

**Tabelle 1:**  
 Gesamtheit aller 65 betrachteten Rohstoffe mit Kennzeichnung der für den Rohstoffpool ausgewählten Rohstoffe (blau markiert).

Aluminium	Borat	Graphit	Mangan	Silicium
Ammoniak	Brom	Hafnium	Molybdän	Soda
Andalusit	Chrom	Ilmenit & Rutil	Nickel	Strontium
Antimon	Cyanit	Indium	Niob	Talk (& Speckstein)
Arsen	Diamant	Iod	Perlit (& Vermiculit)	Tantal
Asbest	Eisen	Kalkstein (Kalk)	Phosphat	Tellur
Barium	Feldspat	Kaolin	Platinmetalle	Titan
Baryt	Fluorit	Kieselgur	Quarzsand	Ton
Bauxit	Gallium	Kobalt	Quecksilber	Vanadium
Bentonit	Germanium	Kupfer	Rhenium	Wolfram
Beryllium	Gips	Lithium	Selen	Zink
Bismut	Glimmer	Magnesit	Seltenerdmetalle	Zinn
Blei	Gold	Magnesium	Silber	Zirkon

Insgesamt wurden 29 Rohstoffe in den Rohstoffpool aufgenommen, wobei die beiden Gruppen Platinmetalle und Seltenerdmetalle jeweils zusammengefasst betrachtet wurden, da sie auch innerhalb der Literaturquellen z. T. nur als Gesamtgruppe dargestellt wurden. Aufgrund unterschiedlicher Bewertungskriterien und Zielstellungen kommen die Autoren der ausgewählten Studien zu verschiedensten Einschätzungen hinsichtlich der Kritikalität. So wurden beispielsweise Platinmetalle und Seltenerdmetalle in sieben der acht Studien als kritisch eingestuft, Fluorit hingegen nur in der Studie der Europäischen Kommission. Es wird davon ausgegangen, dass die 36 Rohstoffe, die in keiner der acht Studien als kritisch bewertet wurden, bei der Prüfung von Versorgungsrisiken derzeit eine weniger bedeutende Rolle spielen. Bedingt durch technologischen Wandel sowie der starken Dynamik bei der Entwicklung von Hightech-Produkten kann sich dies jedoch rasch ändern. Deshalb sollten relevante Daten bereits bei der Vorauswahl von Rohstoffen einer regelmäßigen Überprüfung unterzogen werden, um dynamische Parameter für zukünftige Aussagen ausreichend zu berücksichtigen.

## 4.2 Rohstoffbewertung

Für die Bewertung der Bedeutung der ausgewählten Rohstoffe für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg wurden drei Indizes herangezogen, die für das Endergebnis gewichtet und summiert wurden: der Wirtschaftliche Gewichtungswert, der Mengenindex sowie der Rohstoff-Risiko-Index. Alle drei Indizes werden durch dimensionslose Zahlen ausgedrückt. Dabei gilt, je höher der Zahlenwert, umso höher ist die Bedeutung des Rohstoffs.

#### 4.2.1 Bewertungskriterium 1: Wirtschaftlicher Gewichtungindex

##### **Methodik**

Der Wirtschaftliche Gewichtungindex fließt mit der höchsten Gewichtung in die Rohstoffbewertung ein. Entscheidend für die Berechnung sind die Bandbreite der Anwendungsgebiete sowie die Bedeutung der (Teil-)Branchen, in die ein Rohstoff fließt. Dabei spielt es hierbei zunächst keine Rolle, welche Menge des Rohstoffs in der Branche eingesetzt wird, da gerade bei Spezialmetallen bereits die Verwendung geringer Massenanteile essenziell für die Funktionalität der Produkte sein kann. Mittels Literaturrecherche wurde zunächst ermittelt, welcher Rohstoff in welchen der sechs Leitindustrien Verwendung findet. Als Datengrundlage hierfür dienten [Fraunhofer ISI 2009, BGR 2007a, Öko-Institut 2011, DERA 2012a, EC 2010, Wuppertal Institut 2011b sowie USGS 2013]. Anschließend wurden die ermittelten Verwendungsgebiete der einzelnen Rohstoffe jeweils den (Teil-)Branchen gemäß WZ 2008 zugeordnet. So wird beispielsweise Lithium unter anderem für die Herstellung von Batterien benötigt (Tabelle 2). Nach WZ 2008 ist die Herstellung von Batterien der Elektrotechnik- und Elektroindustrie – Abteilung 27, der Anwendungsbereich »Aluminiumschmelzen« Abteilung 24 (Metallindustrie) zugeordnet.

**Tabelle 2:**  
 Zuordnung der Verwendungsgebiete eines Rohstoffes zu den Abteilungen nach WZ 2008 am Beispiel Lithium.

Lithium	Verwendung [EC 2010]	Zuordnung nach [WZ 2008] auf 2-Steller Ebene
	Batterien (20%)	27
	Aluminiumschmelzen (7%)	24
	...	...

Die Zuordnung erfolgte zu derjenigen Branche bzw. Abteilung, in der ein Rohstoff zum ersten Mal verarbeitet wird. Beispielsweise sind Metalllegierungen der Metallbranche (Abteilung 24) zugeordnet. Die mögliche spätere Verwendung einer solchen Legierung, zum Beispiel im Flugzeugbau, wird nicht berücksichtigt. Dies ist damit zu begründen, dass die Datenlage die durchgängige Zuordnung eines Rohstoffes über die erste verarbeitende Industrie hinaus nicht möglich macht. Zwar sind für einen Teil der Erzeugnisse die Abnehmerindustrien klar definiert und überschaubar, für andere Erzeugnisse hingegen ist die Komplexität der Einsatzgebiete enorm und eine Detailanalyse des gesamten Wegs eines Rohstoffes innerhalb verschiedener Leitindustrien nicht möglich.

Nach Zuordnung zu den relevanten Abteilungen wurde jeweils der Umsatzanteil der Abteilung an der gesamten Branche bestimmt und dieser Wert mit dem Bruttowertschöpfungsanteil der Branche Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland multipliziert. Durch die Multiplikation mit dem Bruttowertschöpfungsanteil wird die Bedeutung der Branche in Baden-Württemberg im Vergleich zur

Bedeutung in Gesamtdeutschland in der Berechnung berücksichtigt. Nachdem das Produkt aus Umsatzanteil und Bruttowertschöpfungsanteil für jedes Anwendungsgebiet bestimmt war, wurde für jeden Rohstoff die Summe der Multiplikationsprodukte gebildet:

Somit nimmt der Wirtschaftliche Gewichtungswert eines Rohstoffes zum einen mit der Bedeutung einzelner Branchen in Baden-Württemberg im Vergleich zu Deutschland, zum anderen mit der Bandbreite der Anwendungsgebiete bzw. der daraus resultierenden Anzahl der in der Berechnung berücksichtigten ersten verarbeitenden Branchen zu.

$$WGI_i = \sum_b \left[ \left( \frac{\text{Umsatz Abteilung}_{BW}}{\text{Umsatz Branche}_{BW}} \times 100 \right) \times \left( \frac{\text{Bruttowertschöpfung Branche}_{BW}}{\text{Bruttowertschöpfung Branche}_D} \right) \right]$$

Eine detailliertere Zuordnung der Verwendungsgebiete eines Rohstoffes über Abteilungs- und somit 2-Steller Ebene hinaus ist aufgrund der Datenlage nicht möglich. Bei dem angeführten Beispiel Lithium wäre die genauere Zuordnung für Batterien die Industriesparte 27.2 »Herstellung von Batterien und Akkumulatoren«. Mit einer Betrachtung auf 3-Steller Ebene (27.2) ließe sich ein spezifischeres Bild der Relevanz eines Rohstoffes innerhalb einer Branche abbilden. Da aber für die chemische Industrie und die Metallindustrie für 2010 für jeweils vier Industriesparten sowie für drei Industriesparten der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie und zwei Industriesparten der Automobilindustrie keine Umsatzzahlen vorliegen, ist eine Betrachtung auf 3-Steller Ebene nicht realisierbar.

### **Ergebnisse**

Die Berechnung des Wirtschaftlichen Gewichtungswertes ergab für die Gruppe der Seltenerdmetalle den höchsten Wert innerhalb der 29 Elemente des Rohstoffpools. Aus diesem Grund wird das Ergebnis für diese Gruppe zunächst exemplarisch dargestellt, bevor eine Gesamtübersicht über den jeweils ermittelten Wirtschaftlichen Gewichtungswert für alle Rohstoffe gegeben wird. Die Recherche der Einsatzgebiete ergab, dass 20 Prozent der Seltenerdmetalle für Katalysatoren sowie 19 Prozent für Magnete verwendet werden [EC 2010; Öko-Institut 2011]. Neben diesen beiden Hauptanwendungsgebieten werden Seltenerdelemente auch im Bereich der Metallurgie benötigt (Batterien 8 Prozent, Eisen und Stahl 6 Prozent sowie Al-/Mg-Legierungen 1 Prozent). Weitere Anwendungen finden sich in Leuchtstoffen (7 Prozent) sowie Pigmenten (1 Prozent). Für die Berechnung des Wirtschaftlichen Gewichtungswertes nicht berücksichtigt wurden die Einsatzbereiche polierte Gläser/Spiegel (24 Prozent) sowie Keramik (5 Prozent), da diese der Abteilung 23 »Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden« zugeordnet werden

und somit zu keiner der sechs betrachteten Leitindustrien gehören. Sonstige Anwendungen, die in den Datenquellen mit insgesamt 9 Prozent angegeben wurden, wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

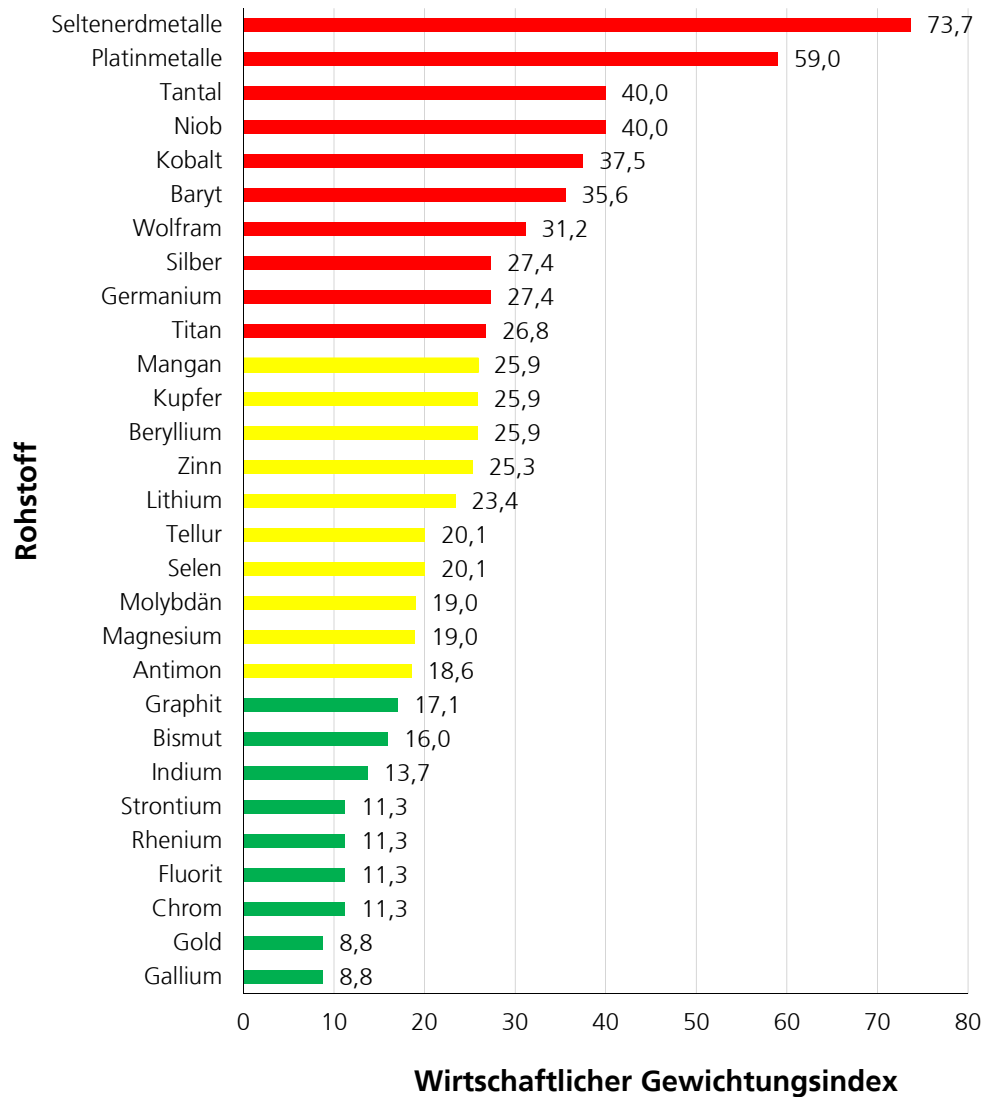
Die Zuordnung der Einsatzgebiete zu Branchen bzw. Abteilungen ergab, dass Seltenerdmetalle in der chemischen Industrie (nur Abteilung 20, nicht 21), der Metallindustrie (Abteilung 24 und 25), der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (Abteilungen 26 und 27) sowie der Automobilindustrie (Abteilungen 29 und 30) Anwendung finden. Tabelle 3 zeigt die Berechnung des Wirtschaftlichen Gewichtungindex unter Einbezug der Kennzahlen Umsatz und Bruttowertschöpfung im Überblick (vgl. Kapitel 3):

**Tabelle 3:**  
 Berechnung des  
 Wirtschaftlichen  
 Gewichtungindex für  
 Seltenerdmetalle.

<b>Branche/ Abteilungen</b>	$\frac{\text{Umsatz } TB_{BW}}{\text{Umsatz } B_{BW}} \times 100$	$\frac{BWS B_{BW}}{BWS B_{DE}}$	<b>Teilergebnis</b>
20 (Abteilung der Branche Chemie)	57,4	0,1108	6,4
24 und 25 (Metall- branche)	100,0	0,1898	19,0
26 und 27 (Elektro- und Elektronikbranche)	100,0	0,2101	21,0
29 und 30 (Auto- mobilbranche)	100,0	0,2738	27,4
<b>Ergebnis</b>			<b>73,7</b>

Seltenerdmetalle werden in vier der sechs Leitindustrien in Baden-Württemberg direkt verarbeitet, daher ergibt sich unabhängig von der eingesetzten Menge ein hoher Wirtschaftlicher Gewichtungindex. Abbildung 10 zeigt die Berechnungsergebnisse für alle 29 Rohstoffe, der dargestellte Index ist dimensionslos.

**Abbildung 10:**  
Wirtschaftlicher  
Gewichtungsindex –  
Ergebnis der  
Rohstoffbewertung  
[Eigene  
Berechnungen].



Die Ergebnisse wurden nach absteigenden Zahlenwerten sortiert, wobei die unterschiedliche Farbgebung die Rohstoffe nach hoher, mittlerer sowie niedriger Bedeutung abgrenzt. Nach den Seltenerdmetallen weisen die Platinmetalle mit einem Index von 59,0 den zweithöchsten Wert auf. Mit deutlichem Abstand wurden darüber hinaus die Rohstoffe Tantal, Niob, Kobalt, Baryt, Wolfram, Silber, Germanium sowie Titan als besonders bedeutend identifiziert. Die Rohstoffe Gold und Gallium weisen mit einem Wert von jeweils 8,8 die geringste Bedeutung auf. Die Ursache liegt darin, dass in beiden Fällen lediglich Abteilung 26 als für die Berechnung relevantes Anwendungsgebiet identifiziert wurde.

#### 4.2.2 Bewertungskriterium 2: Mengenindex

##### **Methodik**

Für eine länderspezifische Analyse potenziell versorgungskritischer Rohstoffe ist insbesondere die Kenntnis des Rohstoffbedarfs bedeutender Industriezweige entscheidend. Hier besteht aber ein erhebliches Datendefizit, da keine Angaben zum Rohstoffverbrauch einzelner Industriezweige vorliegen. Eine Auswertung über Produktionsstatistiken ist nicht möglich, da diese Daten von Seiten des Statistischen Landesamtes nicht zur Verfügung gestellt werden können, oftmals der Geheimhaltung unterliegen und zudem das Rohstoffinventar der produzierten Güter zum Großteil nicht bekannt ist. Ausführlich dargestellt wird diese Problematik im IAW Policy Report Nr. 11 »Nicht-energetische Rohstoffe: Datenlage in Deutschland und Baden-Württemberg sowie rohstoffökonomische Überlegungen zur Schließung von Datenlücken« [IAW 2014].

Als Datengrundlage für eine alternative Abschätzung dient die Außenhandelsstatistik Baden-Württembergs und Deutschlands [vgl. StaLa BW 2013a]. Der Mengenbedarf wird anhand rohstoffspezifischer Warenimporte abgeschätzt, Bezugszeitraum ist dabei das Berichtsjahr 2010. Problematisch bei dieser Abschätzung ist allerdings, dass Rohstoffimporte über Halbzeuge oder Fertigwaren nicht berücksichtigt werden, da aus der Warenbezeichnung die enthaltenen Rohstoffe nicht ersichtlich sind. Für die weitere Auswertung wurde zunächst für jeden Rohstoff die Zuordnung der Warengruppen gemäß der 8-stelligen Warennummern des Warenverzeichnisses überprüft und diejenigen Warengruppen von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen für die keine Einfuhrdaten für Baden-Württemberg und / oder Deutschland vorlag. Ebenfalls keine Berücksichtigung fanden diejenigen Warengruppen, für die der Mengenanteil des einzelnen Rohstoffs nicht nachvollziehbar ist, wie beispielsweise die Warengruppe »Sulfide des Calciums, des Antimons oder des Eisens« (Warennummer 28309011). Für die restlichen Warengruppen wurde errechnet, ob die nach Baden-Württemberg eingeführte Menge im Vergleich zu der nach Deutschland importieren, überdurchschnittlich ist. Dafür wurde der Anteil des Bruttoinlandsprodukts Baden-Württembergs am gesamtdeutschen Bruttoinlandsprodukt ermittelt. Für 2010 liegt dieser Wert bei 14,7 Prozent [AK VGRdL 2014]. Jede Warengruppe, für die der Quotient des Einfuhrgewichts Baden-Württemberg / Deutschland mehr als 14,7 Prozent betrug, wurde somit als überdurchschnittlich definiert.

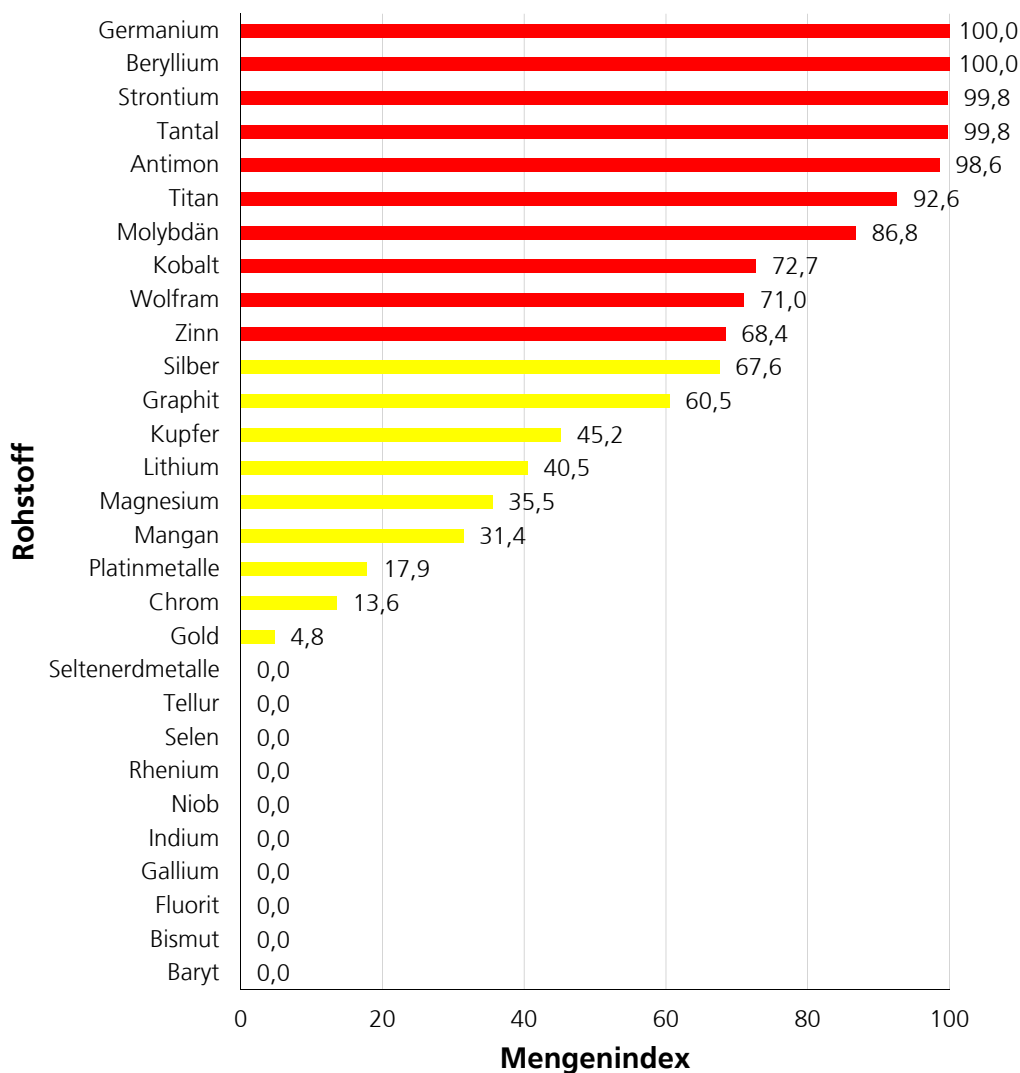
Für jeden Rohstoff wurde anschließend das Einfuhrgewicht der überdurchschnittlichen Warengruppen addiert und die Summe durch die Gesamteinfuhrmenge der dem jeweiligen Rohstoff zugeordneten Warengruppen dividiert. Dieser Quotient wird in der vorliegenden Studie als Mengenindex eines Rohstoffes bezeichnet und bildet im Ergebnis die Mengenrelevanz der Rohstoffe untereinander ab.



**Ergebnisse**

Die Auswertung ergab nachfolgendes Ranking (siehe Abbildung 11):

**Abbildung 11:**  
Mengenindex –  
Ergebnis der  
Rohstoffbewertung  
[Eigene  
Berechnungen].



Zunächst ist auffallend, dass sich für zehn der 29 Rohstoffe ein Mengenindex von 0 ergab. Zieht man als stellvertretendes Beispiel etwa die Gruppe der Seltenerdmetalle heran, so lag bei Prüfung auf Überdurchschnittlichkeit der drei identifizierten Warengruppen der höchste Wert bei 7,1 Prozent. Für alle Rohstoffe, bei denen keine der identifizierten Warengruppen den Grenzwert von 14,7 Prozent überschritt und somit die nach Baden-Württemberg importierte Menge aller Warengruppen als unterdurchschnittlich einzustufen war, ergab die

Berechnung des Mengenindex 0. Außerdem ergab sich 0 für den Mengenindex, wenn aufgrund fehlender Daten für Baden-Württemberg oder Deutschland kein Quotient gebildet werden konnte, was für eine Vielzahl der Rohstoffe der Fall war.

Blickt man hingegen an die Spitze der obigen Skala (Abbildung 11), so ergab sich für Germanium und Beryllium jeweils ein Mengenindex von 100. In beiden Fällen entsprach die Einfuhrmenge überdurchschnittlicher Warengruppen der Gesamteinfuhrmenge aller identifizierten Warengruppen (gerundet). So wurden für Germanium insgesamt drei Warengruppen identifiziert, zwei davon mit überdurchschnittlichem Einfuhrgewicht. Da die Menge der beiden überdurchschnittlichen Warengruppen insgesamt bei rund 2 170 Tonnen, die der dritten Warengruppe hingegen lediglich bei sieben Kilogramm lag, ergab sich durch Rundung des Quotienten (Summe des Einfuhrgewichts der überdurchschnittlichen Warengruppen dividiert durch die Gesamteinfuhrmenge, der dem Rohstoff zugeordneten Warengruppen) für den Mengenindex ein Wert von 100.

Kupfer, einem Rohstoff mit einem mittleren Mengenindex, wurden aus der Außenhandelsstatistik insgesamt 61 Warengruppen zugeordnet. Für sechs dieser Warengruppen war der Importanteil Baden-Württembergs aufgrund von Datenlücken nicht bestimmbar, 23 wurden als überdurchschnittlich definiert. Das Gesamtgewicht der überdurchschnittlichen Warengruppen beträgt 72 600 Tonnen, das aller Warengruppen 160 500 Tonnen, womit sich ein Mengenindex von 45,2 ergibt. Ein Vergleich der Beispiele Germanium und Kupfer verdeutlicht, dass nicht die Einfuhrmenge an sich (2 170 Tonnen Germanium im Vergleich zu 72 600 Tonnen Kupfer), sondern der Gewichtsanteil überdurchschnittlicher Warengruppen den Mengenindex bildet.

### 4.2.3 Bewertungskriterium 3: Rohstoff-Risiko-Index

#### ***Methodik***

Um auch nicht landesspezifische, aber dennoch bedeutende Rohstoffrisiken im Bewertungsschema zu berücksichtigen, wurde als drittes Kriterium ein Rohstoff-Risiko-Index herangezogen. Der Index basiert auf Einschätzungen aus der Fachliteratur, wobei insbesondere die Studie »Rohstoffsituation Bayern – keine Zukunft ohne Rohstoffe« des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln [IW 2011] sowie eine Untersuchung des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung [IZT 2011] berücksichtigt wurden. Die in der Studie des IW betrachteten Aspekte sind nicht regionalspezifisch und somit nicht nur für Bayern gültig (wie es der Titel vermuten ließe). Der Rohstoff-Risiko-Index des IW untersucht Versorgungsrisiken für insgesamt 45 Metalle und Minerale. Tabelle 4 zeigt die Gewichtung der acht Indikatoren, die zur Rohstoffbewertung herangezogen werden:

**Tabelle 4:**  
 Indikatoren und  
 Gewichtung des  
 Rohstoff-Risiko-Index  
 des IW [IW 2011].

Quantitative Indikatoren (60 %)	Qualitative Indikatoren (40 %)
Statische Reichweite (12,5 %)	Bedeutung für Zukunftstechnologien (15 %)
Länderrisiko (12,5 %)	Gefahr des strategischen Einsatzes (15 %)
3-Länder-Konzentration (15 %)	Substituierbarkeit (10 %)
3-Unternehmen-Konzentration (10 %)	
Preisrisiko (10 %)	

In der Studie des IZT wurde die Versorgungslage 52 mineralischer Rohstoffe aus der Sicht des produzierenden Gewerbes in Deutschland untersucht, wobei als Kriterien für die Kritikalität das Versorgungsrisiko und die Vulnerabilität betrachtet wurden. Versorgungsrisiko bedeutet, dass die deutsche Wirtschaft Risiken für eine sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Versorgung mit mineralischen Rohstoffen ausgesetzt ist. Vulnerabilität betrachtet hingegen die Schädigung der deutschen Wirtschaft bei auftretenden Versorgungsstörungen. Tabelle 5 gibt einen detaillierten Überblick über das verwendete Indikatoren-Set und dessen Gewichtung zur Bestimmung der Rohstoffkritikalität:

**Tabelle 5:**  
 Indikatoren-Set für  
 das Kritikalitäts-  
 Screening des IZT  
 [IZT 2011].

Vulnerabilität (100%)	Versorgungsrisiko (100%)
<b>Mengenrelevanz</b>	<b>Länderrisiko</b>
Anteil Deutschlands am Weltverbrauch (2008) (25%)*	Länderrisiko für die Importe Deutschlands (2008) (10%)*
Änderung des Anteils Deutschlands am Weltverbrauch (2004-2008) (10%)*	Länderrisiko für die globale Produktion (2008) (10%)*
Änderung der Importe Deutschlands (2004-2008) (10%)*	Länderkonzentration der globalen Reserven (2008) (10%)**
<b>Strategische Relevanz</b>	<b>Marktrisiko</b>
Sensitivität der Wertschöpfungskette in Deutschland (25%)**	Unternehmenskonzentration der globalen Produktion (2008) (25%)*
Globaler Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) (20%)**	Verhältnis von globalen Reserven zu globaler Produktion (2008) (25%)**

Substituierbarkeit (10%)**	<b>Strukturrisiko</b>
	Anteil der globalen Haupt- und Nebenproduktion (2008) (10%)**
	Recyclingfähigkeit (10%)**
Zeitliche Relevanz: kurzfristig*, mittel- bis langfristig **	

Keine der zwei beschriebenen Studien bewertet alle 29 für Baden-Württemberg zu prüfenden, potenziellen Mangelressourcen. 22 Rohstoffe wurden in beiden Studien bewertet, die restlichen sieben Rohstoffe in nur einer der beiden Studien. Allerdings wurden in den Studien teilweise gleiche Indikatoren zur Kritikalitätsbewertung herangezogen, so dass zur Generierung eines spezifischen Rohstoff-Risiko-Index für Baden-Württemberg zunächst geprüft wurde, inwieweit beide Untersuchungen zu vergleichbaren Einschätzungen hinsichtlich der Kritikalität der Rohstoffe kommen.

Vor Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Studien wurden die 28 Rohstoffe der IZT Studie mit einem Skalierungsfaktor dem Indexkonzept der IW Studie angepasst. Der Faktor ergab sich aus der Anpassung des Maximalwertes der IZT Studie (Versorgungsrisiko für Wolfram: 0,81) an den Maximalwert der IW Studie (Seltenerdmetalle: 21). Für die Rohstoffgruppen Seltenerdmetalle sowie Platinmetalle ist dabei folgendes zu berücksichtigen: Bei den Seltenerdmetallen lag der Fokus der Studie auf den drei Elementen Yttrium, Neodym und Scandium, wohingegen die Studie des IZT die Seltenerdelemente als gesamte Gruppe bewertete. Bei der Gruppe der Platinmetalle wurden die drei Elemente Palladium, Platin und Rhodium [IW 2011] bzw. ausschließlich Palladium untersucht [IZT 2011]. Bei Vorliegen mehrere Indizes für eine Gruppe wurde der Mittelwert für die Bewertung herangezogen, lag nur ein Wert vor, so wurde dieser verwendet.

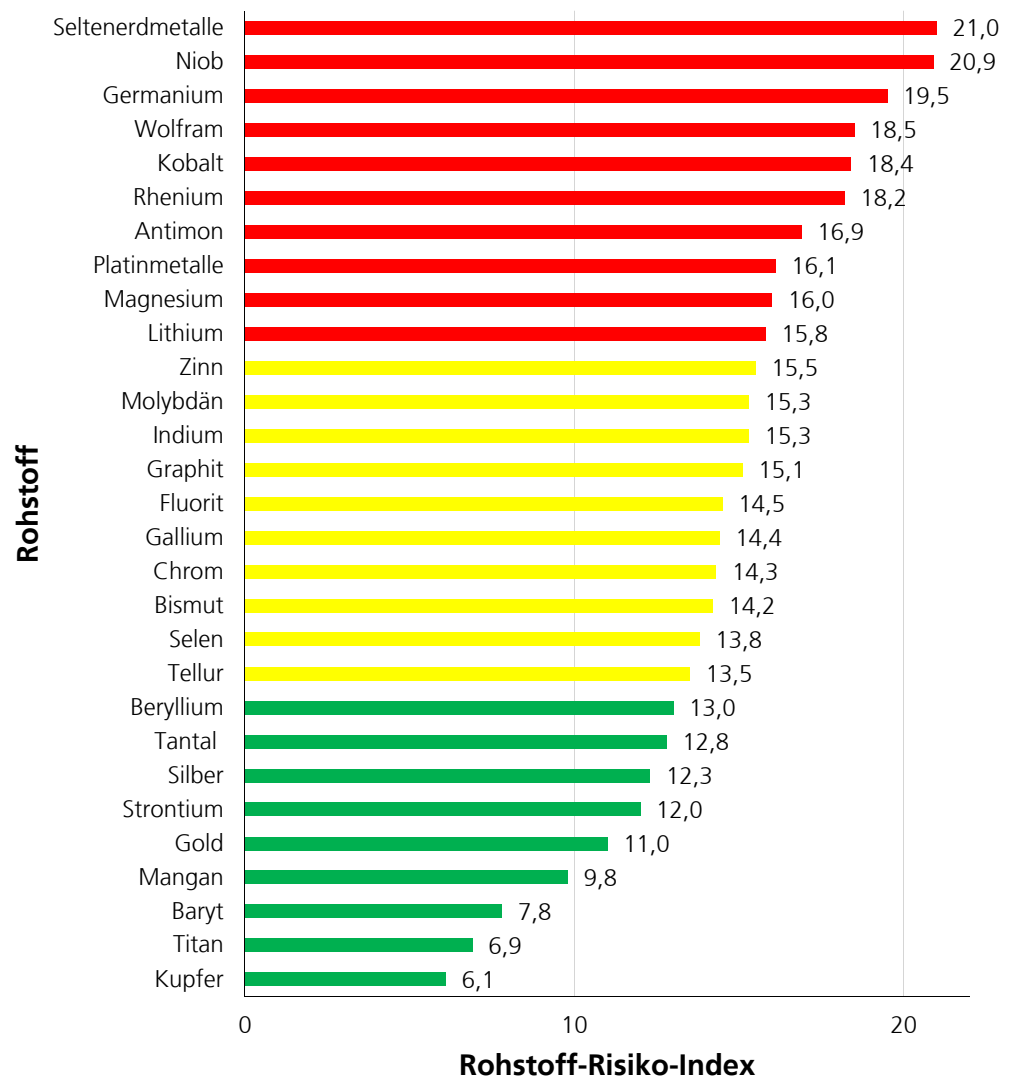
### **Ergebnisse**

Die Gegenüberstellung der Einschätzungen der beiden Studien ergab, dass 17 der 22 verglichenen Rohstoffe auf der Gesamtskala um weniger als 25 Prozent voneinander abweichen. Lässt man weiterhin die sieben Rohstoffe mit nur einer Bewertung unberücksichtigt und vergleicht die Platzierungen der 22 Rohstoffe auf zwei Einzelskalen, lässt sich erkennen, dass mit den Seltenerdmetallen, Niob, Germanium, Wolfram, den Platinmetallen, Zinn sowie Lithium sieben Rohstoffe auf beiden Einzelskalen jeweils zu den zehn bedeutendsten zählen.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse des Wirtschaftlichen Gewichtungindex mit den Einschätzungen zur Rohstoffkritikalität der beiden Studien [IW 2011;

IZT 2011] wird erkennbar, dass das Rohstoff-Ranking der IW-Studie dem Ranking des Wirtschaftlichen Gewichtungsindezes eher entspricht, als das Ranking der IZT-Studie. Daher wurde die IW-Studie als Grundlage für den Rohstoff-Risiko-Index bestimmt. Folglich wurden für die Generierung des Rohstoff-Risiko-Index 23 Rohstoffbewertungen der IW Studie sowie – als Aushilfswerte – sechs Einschätzungen der IZT Studie herangezogen. Nachstehende Abbildung 12 zeigt das abschließende Ergebnis für Kriterium 3:

**Abbildung 12:**  
Rohstoff-Risiko-Index  
– Ergebnis der  
Rohstoffbewertung  
[IW 2011; IZT 2011;  
Eigene  
Berechnungen].



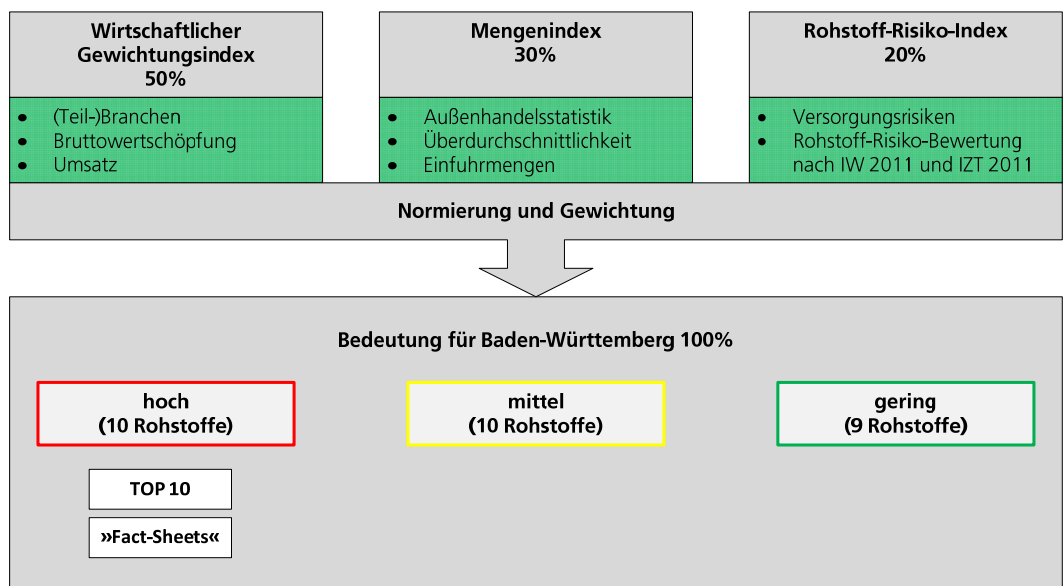
## 4.3 Rohstoff-Ranking

### 4.3.1 Vorgehensweise

Als Ergebnis der Rohstoffbewertung steht der Index »Bedeutung für BW«. Dieser wird über Aggregation und Gewichtung der drei Einzelkriterien generiert. Um landesspezifische Besonderheiten Baden-Württembergs im Endergebnis ausreichend zu berücksichtigen, werden der »Wirtschaftliche Gewichtungsindex« mit 50 Prozent und der »Mengenindex« mit 30 Prozent gewichtet. Mit der deutlichen Dominanz des Wirtschaftlichen Gewichtungsindex wird ganz klar in den Vordergrund gestellt, dass für die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft nicht nur Massenelemente, sondern gerade auch Spezialmetalle in geringen Mengen, essenziell sein können.

Da das Bewertungskriterium 3, der Rohstoff-Risiko-Index, keine für Baden-Württemberg spezifischen, aber dennoch bedeutende Rohstoffrisiken abbildet, wird ihm ein Gewichtungsanteil von 20 Prozent zuteil. Nachstehende Abbildung 13 gibt einen Überblick über die Methodik der Rohstoffbewertung:

**Abbildung 13:**  
Grafische Darstellung der Systematik der Rohstoffbewertung.



Die in der Abbildung 13 farblich hervorgehobene Unterteilung in hohe (rot), mittlere (gelb) sowie geringe (grün) wirtschaftliche Bedeutung dient der besseren Einordnung der Ergebnisse. Nach erfolgter Priorisierung wurden für die zehn bedeutendsten Rohstoffe Fact-Sheets angefertigt, die der Anlage 1 entnommen werden können.

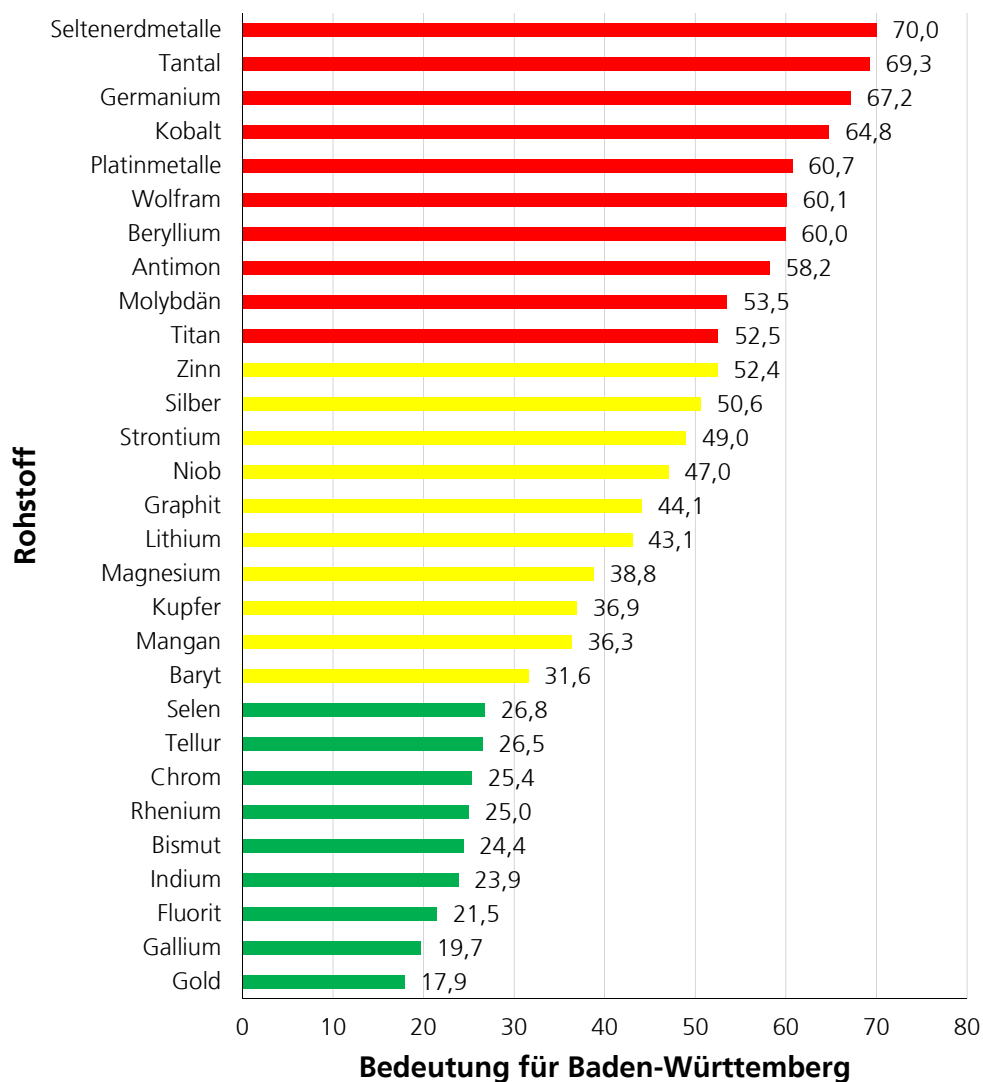
Die Zusammenführung der drei Einzelindizes erfolgte mittels Normierung auf den festgelegten Zielwert von 100.

Zur Veranschaulichung wird im Folgenden die Berechnung des Gesamt-Index am Beispiel Tantal dargestellt. Der Wirtschaftliche Gewichtungswert beträgt 40, nach Multiplikation mit dem Normierungsfaktor ergibt sich ein Wert von 54,4. Der Mengenindex beträgt 99,8 und der Rohstoff-Risiko-Index beträgt 12,8, nach Normierung 60,9. Gewichtet mit 50, 30 und 20 Prozent ergeben sich die Werte 27,2, 29,9 und 12,2, die in Summe den Gesamt-Index »Bedeutung für BW« von 69,3 ergeben.

### 4.3.2 Ergebnisse

Nachstehende Abbildung 14 zeigt das abschließende Ergebnis der Rohstoffbewertung für alle 29 betrachteten Rohstoffe in der Übersicht.

**Abbildung 14:**  
Bedeutung der untersuchten Rohstoffe für Baden-Württemberg. Endergebnis der Rohstoffbewertung [Eigene Berechnungen].



Die Darstellung der Bedeutung für BW unterteilt die 29 betrachteten Rohstoffe zunächst in drei Gruppen.

Die rote Gruppe umfasst Werte zwischen 70,0 und 52,5 und stellt die zehn Rohstoffe mit der höchsten Bedeutung für Baden-Württemberg dar: Seltenerd-



metalle, Tantal, Germanium, Kobalt, Platinmetalle, Wolfram, Beryllium, Antimon, Molybdän sowie Titan. Eine Einstufung innerhalb der roten Gruppe impliziert keine kritische Versorgungslage an sich bzw. physische Knappheit eines Rohstoffes. Vielmehr bedeutet die Einstufung, dass diese zehn Rohstoffe nach Auswertung der drei Bewertungskriterien für Baden-Württemberg eine höhere Bedeutung besitzen als die anderen 19 Rohstoffe. Bei der Prüfung von Maßnahmen, die potenziellen Versorgungsrisiken entgegenwirken, sollten diese Rohstoffe demnach prioritär behandelt werden.

Die folgenden zehn Rohstoffe mit gelber Farbmarkierung haben für Baden-Württemberg eine mittlere Bedeutung (52,4 - 31,6). Wobei insbesondere bei Zinn, dass nur um 0,1 Punkte unter Titan (rote Gruppe) liegt, zu berücksichtigen ist, dass alle Zahlen nur eine Momentaufnahme mit der Datengrundlage aus dem Jahr 2010 darstellen und veränderlich sind. Deshalb ist eine regelmäßige Überprüfung und Aktualisierung der Zahlen notwendig, um Maßnahmen zur Sicherung der Rohstoffversorgung an die jeweils aktuelle Situation anpassen zu können.

Rohstoffe der grünen Gruppe weisen nach Zusammenführung aller drei Bewertungskriterien die geringste Bedeutung auf (26,8 - 17,9). Diese Rohstoffe wurden mit Ausnahme von Rhenium in keinem der Bewertungskriterien unter den zehn bedeutendsten eingestuft, vielmehr lagen meist zwei von drei Einzelwerten im unteren Drittel der jeweiligen Indizes.

Eine vergleichbare Bewertung wurde im Jahr 2011 im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit für den Freistaat Bayern und im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz für das Bundesland Hessen durchgeführt [BY 2011, HE 2011]. In nachfolgender Tabelle werden die darin identifizierten Rohstoffe mit der höchsten Bedeutung für die Bundesländer Bayern und Hessen den in der vorliegenden Baden-Württemberg spezifischen Studie identifizierten Top-10 Rohstoffen gegenübergestellt. Die Bedeutung der Rohstoffe für das jeweilige Bundesland ist in der Tabelle von oben nach unten abnehmend dargestellt.

**Tabelle 6:**  
 Gegenüberstellung der  
 10 Rohstoffe mit der  
 höchsten Bedeutung  
 für die Bundesländer  
 Baden-Württemberg,  
 Bayern und Hessen  
 [BY 2011, HE 2011].

Top-10 Rohstoffe BW	Top-10 Rohstoffe Bayern	Top-10 Rohstoffe Hessen
Seltenerdmetalle	Seltenerdmetalle	Platinmetalle
Tantal	Kupfer	Seltenerdmetalle
Germanium	Graphit	Tellur
Kobalt	Tantal	Lithium
Platinmetalle	Platinmetalle	Tantal
Wolfram	Indium	Graphit
Beryllium	Germanium	Kupfer
Antimon	Gallium	Silber
Molybdän	Silber	Indium
Titan	Beryllium	Germanium

### **Sonderfall Platingruppenmetalle und Seltenerdelemente**

Betrachtet man die Rohstoffe der roten Gruppe im Detail, so zeigt sich, dass darunter mit den Seltenerdmetallen sowie den Platinmetallen zwei Rohstoffgruppen fallen. Die Gruppe der Seltenerdmetalle besteht tatsächlich aus siebzehn, die Gruppe der Platinmetalle aus sechs Elementen. Aufgrund der lückenhaften Datenlage ist eine durchgängige Betrachtung auf Elementebene jedoch nicht möglich. Aus der Fachliteratur geht hervor, dass innerhalb der Gruppe der Platinmetalle insbesondere Platin, Palladium und Rhodium von besonderer Bedeutung sind [Fraunhofer ISI 2009]. Die Studie des IW [2011] bestätigt dies, da in der Studie überhaupt nur diese drei Elemente der Gruppe auf Kritikalität überprüft wurden. Die vorgenommene Bewertung weist Palladium (17,3) vor Platin (16,1) sowie Rhodium (14,9) die höchste Bedeutung zu. Einzelheiten können der Studie entnommen werden (vgl. IW 2011).

Innerhalb der Gruppe der Seltenerdmetalle sind laut einer Publikation der deutschen Rohstoffagentur [DERA 2011a] schwere Seltene Erden tendenziell kritischer einzustufen als leichte Seltene Erden. Überdies lassen sich zu den fünf Seltenerdelementen Dysprosium, Neodym, Terbium, Europium und Yttrium übereinstimmende Aussagen in der Fachliteratur finden, die besagen, dass die Versorgungslage hier besonders kritisch ist [Öko-Institut 2011, U.S. DOE 2011]. Darüber hinaus führt die Studie des Öko-Instituts Praseodym und Lanthan als weitere kritische Seltene Erden an, die Studie des U.S. Department of Energy (DOE) hingegen bezeichnet Lanthan als nur »beinahe kritisch« und ordnet auch Cer dieser Kategorie zu.

#### 4.3.3 Mögliche Verschiebungen aufgrund der Wirtschaftsentwicklung

Eine Verschiebung im Rohstoff-Ranking würde sich dann ergeben, wenn eine Branche in Baden-Württemberg im Vergleich zur Branche in Gesamtdeutschland eine andere wirtschaftliche Entwicklung durchläuft oder innerhalb der Branche eine Abteilung an Bedeutung gewinnt oder verliert (Berechnung des Bewertungskriteriums 1, des Wirtschaftlichen Gewichtungszindex, basiert auf dem Anteil des Umsatzes der Abteilung, in der ein Rohstoff verwendet wird, an der gesamten Branche, multipliziert mit dem Bruttowertschöpfungsanteil der Branche Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland). Eine Änderung des Rankings könnte sich außerdem ergeben, wenn sich die Importmenge überdurchschnittlicher Warengruppen nach Baden-Württemberg im Vergleich zu Deutschland ändert (Bewertungskriterium 2), was wiederum mit der wirtschaftlichen Entwicklung der Branchen zusammenhängt. Selbstverständlich können auch Änderungen beim Bewertungskriterium 3 (nicht landesspezifisch) zu Verschiebungen innerhalb des Rankings führen, da aber die Entwicklung der Leitindustrien in diesem Zusammenhang nicht relevant ist, wird dieser Aspekt im Folgenden nicht betrachtet.

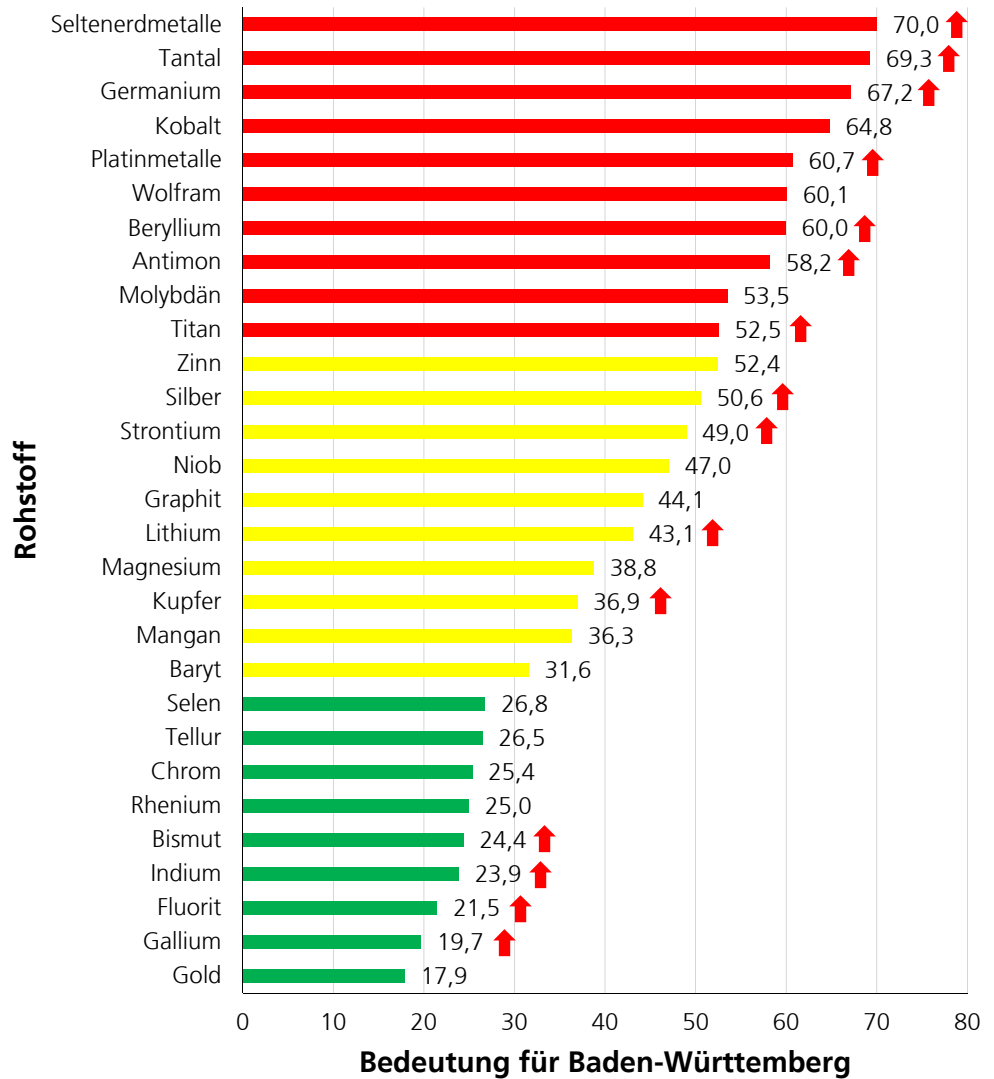
Gemäß Vorhabensbeschreibung sollten für die Abschätzung der Entwicklungsperspektiven der Leitindustrien die Einschätzungen aus den Branchendialogen herangezogen werden. Da die Branchendialoge im Einvernehmen mit dem Auftraggeber nicht in der ursprünglich vorgesehenen Art und Weise stattgefunden haben (näheres dazu in Kapitel 7.2), wurden andere Quellen und zwar insbesondere die Regionalergebnisse der VCI-Prognos-Studie zur deutschen chemischen Industrie 2030 [VCI-Prognos 2014], die auch Angaben zu den anderen Leitbranchen enthält, ausgewertet. Diese Studie wurde auf Anfrage bei den Chemie-Verbänden Baden-Württemberg als Quelle für eine längerfristige Prognose empfohlen, Anfragen an weitere Branchenverbände hingegen wurden damit beantwortet, dass längerfristige Prognosen derzeit aufgrund der politischen Situation in der Ukraine und der Unsicherheiten über die Auswirkungen der Einführung des Mindestlohns nicht vorliegen. Die Regionalergebnisse der VCI-Prognos-Studie basieren auf der Anfang 2013 vom Verband der Chemischen Industrie (VCI) veröffentlichten Studie »Die deutsche chemische Industrie 2030« [VCI-Prognos 2013]. Für die Regionaldaten wurde das in dieser Studie beschriebene Basisszenario Gesamtdeutschland auf die einzelnen Bundesländer herunter gebrochen, die getroffenen Annahmen für das Basisszenario und weitere mögliche (aber nach Experteneinschätzung weniger wahrscheinliche) Szenarien zur Wirtschaftsentwicklung können der Studie entnommen werden.

Das Wirtschaftswachstum in den Bundesländern wird wesentlich durch die relative Bevölkerungsdynamik, die Handelsstruktur im Ausgangsjahr 2011 sowie durch die bestehende Industriestruktur im jeweiligen Bundesland bestimmt. Deutschlandweit wird für die Branchen Automobilindustrie, Maschinenbau, Elektrotechnik, Chemie sowie die Gummi- und Kunststoffverarbeitung bis 2030 ein dynamischeres Wachstum prognostiziert als für das übrige verarbeitende

Gewerbe. Dies gilt auch für das Bundesland Baden-Württemberg, wobei das Wachstum der Branchen unterschiedlich hoch ist. Insgesamt wächst der Anteil der Industrieproduktion des Landes an Gesamtdeutschland bis 2030 um 0,8 Prozent. Dabei verbucht die Automobilindustrie mit 0,6 Prozent die größte Zunahme, gefolgt vom Maschinenbau (0,5 Prozent), der chemischen Industrie (0,4 Prozent) und der Elektroindustrie (0,3 Prozent). Die Metallindustrie in Baden-Württemberg wird den Anteil der Industrieproduktion an Gesamtdeutschland bis 2030 wie die sonstige Industrie um 0,2 Prozent erhöhen [VCI-Prognos 2014].

Die Prognose eines insgesamt dynamischeren Wachstums der Industrie in Baden-Württemberg als in Gesamtdeutschland führt in Bezug auf die Rohstoffe dazu, dass alle innerhalb des Landes an Bedeutung gewinnen. Im Folgenden wird betrachtet, inwiefern das unterschiedliche Wachstum der Branchen zu Verschiebungen innerhalb des Rankings führen kann. Die folgende Abbildung 15 zeigt nochmals das Ergebnis des Rohstoff-Rankings aus Kapitel 0, wobei durch rote Pfeile markiert ist, bei welchen Rohstoffen sich die Nachfrage im Hinblick auf die Wirtschaftsentwicklung erhöhen könnte. Dabei wird von einer erhöhten Nachfrage ausgegangen, wenn das oder die Haupteinsatzgebiet(e) des jeweiligen Rohstoffs innerhalb der Branchen mit dem höchsten Wachstum (Automobilindustrie, Maschinenbau, Elektro- und Elektronikindustrie oder chemische Industrie) liegen.

**Abbildung 15:**  
Bedeutung der untersuchten Rohstoffe für Baden-Württemberg und mögliche Nachfrageerhöhung durch Wirtschaftswachstum (markiert durch rote Pfeile).



Bei einer priorisierten Betrachtung der Top-10-Rohstoffe sind insbesondere die Rohstoffe interessant, deren Kategorisierung (rot / gelb) sich aufgrund der Wirtschaftsentwicklung verändern könnte. Molybdän, das sich derzeit auf Platz 9 des Rankings befindet, hat seinen Einsatzbereich zu fast 90 Prozent in der Metallindustrie. Da für die Metallindustrie ein eher geringes Wachstum prognostiziert wird [VCI-Prognos 2014] wird hier mit keinen ausgeprägten Nachfrageimpulsen gerechnet. Es wäre also möglich, dass Molybdän bei einer erneuten Analyse in der Zukunft in die gelbe Kategorie eingestuft wird. Silber und

Strontium (Platz 11 und 12) hingegen haben ihre Haupteinsatzgebiete in der Elektro- und Elektronikindustrie sowie der chemischen Industrie, für die ein höheres Wirtschaftswachstum prognostiziert wird und somit eine Verschiebung in die rote Kategorie möglich wäre.

Bei diesen Überlegungen ist jedoch stets zu berücksichtigen, dass sowohl die Wirtschaftsprognose mit Unsicherheiten behaftet ist, dass konkrete Zahlen zum Rohstoffverbrauch in den Industriezweigen fehlen, sowie dass sich die nicht BW-spezifischen Faktoren ändern können. Somit wird, wie in Kapitel 0 bereits erwähnt, empfohlen die Daten regelmäßig zu überprüfen und falls notwendig zu aktualisieren, um Maßnahmen zur Sicherung der Rohstoffversorgung an die jeweils aktuelle Situation anpassen zu können.

## 5 Statusanalyse der Primärrohstoffgewinnung

Bei der Analyse der Primärgewinnung wurden insbesondere solche Aspekte miteinbezogen, die das Versorgungsrisiko für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg beeinflussen können. Ferner soll die Defizitanalyse auch dazu beitragen, Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Rohstoffgewinnung zu identifizieren. Hierfür wurden sieben zu untersuchende, relevante Aspekte gewählt: (1) Mengenanalyse, (2) Rohstoffkonzentration, (3) politisches und ökologisches Risiko der Produktionsländer, (4) Technologische Aspekte, (5) Umweltwirkung, (6) Humantoxizität und Umwelttoxizität und (7) Problematik der Konfliktminerale (siehe Abbildung 16).

**Abbildung 16:**  
Die Indikatoren zur Analyse relevanter Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos der Primärgewinnung. Eigene Darstellung. Methodik u.a. basierend auf den Rohstoffrisikobewertungen der DERA [DERA 2013].

<b>(1) Mengenanalyse</b>	Jährliche Produktionsmenge weltweit
	Globale Reserven und Ressourcen
	Statische Reichweite
<b>(2) Rohstoffkonzentration</b>	Länderkonzentration der Produktion und Reserven
	Marktkonzentration (HHI)
<b>(3) Länderrisiko der Produktion</b>	Politische Stabilität: Worldwide Governance Indicators (WGI)
	Umweltleistung: Environmental Performance Index (EPI)
<b>(4) Technologische Aspekte</b>	Koppelproduktion
<b>(5) Umweltwirkung</b>	Umwelteinwirkungsbelastungsindikator (UEBEL)
<b>(6) Humantoxizität und Ökotoxizität</b>	
<b>(7) Konfliktminerale</b>	

Die einzelnen Aspekte und die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer erläutert.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Analyse der gewählten Kriterien überblicksweise dargestellt. Detaillierte Informationen zu den Gewinnungsverfahren und weiteren wichtigen Aspekten der einzelnen Rohstoffe sind in der

Anlage 2 dargestellt. Da Baden-Württemberg fast gänzlich auf Rohstoffimporte angewiesen ist [Anderson 2011], erfolgte die Betrachtung der Primärgewinnung aus einer globalen Perspektive.

## 5.1 Mengenanalyse

Die Aggregation der Daten zur Mengenanalyse (jährliche Produktion, Reserven, Ressourcen) bildet die Grundlage für weitere Untersuchungen. Hauptquellen bilden nationale Einrichtungen, namentlich das U.S. Geological Survey (USGS), das als Datenfundament dient und durch Informationen der deutschen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie dem British Geological Survey (BGS) ergänzt wurde.<sup>1</sup>

Die statische Reichweite wird sowohl für die weltweiten Reserven als auch die globalen Ressourcen berechnet, um für etwaige Unterschiede zu sensibilisieren. Als Reserven werden jene Rohstoffmengen bezeichnet, die »zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbar« [DERA 2013] sind. »Nachgewiesene, aber derzeit als unwirtschaftlich und/oder als technisch nicht abbaubar eingestufte Anteile« [Melcher und Wilken 2013] hingegen werden als Ressourcen bezeichnet.

Die statische Reichweite errechnet sich wie folgt:

statische Reichweite [a] =	$\frac{\text{Reserven [t] bzw. Ressourcen [t]}}{\text{Förderung [t/a]}}$
----------------------------	--

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Reserven, Ressourcen und der statischen Reichweite um dynamische und rein rechnerische Größen handelt, die zeitpunktabhängig und hypothetisch sind. Daher geben sie keinen unmittelbaren Aufschluss über die tatsächliche Verfügbarkeit eines Rohstoffes.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Primärgewinnung der zehn Rohstoffe im Zeitraum von 2010 bis 2013. Die Primärgewinnung des Jahres 2013 wurde von Seiten des USGS geschätzt.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Insbesondere die frei zugänglichen und umfassenden Daten der USGS stellten sich als hilfreiche Quelle heraus. Daneben gibt es auch Rohstoffinformationen kommerzielle Anbieter, wie *Roskill Information Services* oder *Raw Materials Group*.

<sup>2</sup> Für einige Länder liegen aus strategischen und/oder wirtschaftspolitischen Gründen keine Daten zur Primärgewinnung vor. Infolgedessen bleiben sie in der Statistik unberücksichtigt, weshalb die tatsächlichen Mengen und prozentuale Verteilungen in der Realität variieren können. Für Germanium liegen anstelle der weltweiten Primärgewinnung (*mine production*) Daten zur weltweiten Produktion (*refinery production*) vor. Die Massendaten für Beryllium verstehen sich in Tonnen Be-Gehalt. Die Titanminerale Ilmenit und Rutil verstehen



**Tabelle 7:**  
 Übersicht über die  
 Primärgewinnung  
 von 2010-2013.  
 Eigene Darstellung  
 basierend auf  
 [USGS 2012a;  
 USGS 2013;  
 USGS 2014].

		Primärgewinnung weltweit [in t]			
		2010	2011	2012	2013 <sup>e</sup>
<b>Antimon</b>		167 000	178 000	174 000	163 000
<b>Beryllium</b>		205	260	250	240
<b>Germanium</b>		118 000	118 000	128 000	150 000
<b>Kobalt</b>		89 450	109 100	103 000	120 000
<b>Molybdän</b>		241 670	263 860	259 000	270 000
<b>PGM</b>	Palladium	215	215	201	211
	Platin	195	195	183	192
<b>SEM</b>	Gesamt	133 380	110 530	110 000	110 000
	Cer-Oxid				53 619
	Lanthan-Oxid				35 879
	Neodym-Oxid				21 741
	Praseodym-Oxid				6 536
<b>Tantal</b>		681	767	670	590
<b>Titan</b>	Ilmenit	6 096 000	6 096 000	6 500 000	6 790 000
	Rutil	733 000	733 000	730 000	770 000
<b>Wolfram</b>		68 820	72 990	75 700	71 000

Hervorzuheben sind die sehr geringen Produktionsmengen von Germanium, Beryllium, den Platingruppenmetallen und Tantal. Die restlichen Rohstoffwirtschaften sind durch große Produktionen gekennzeichnet. Titanerze werden in größtem Umfang gefördert.

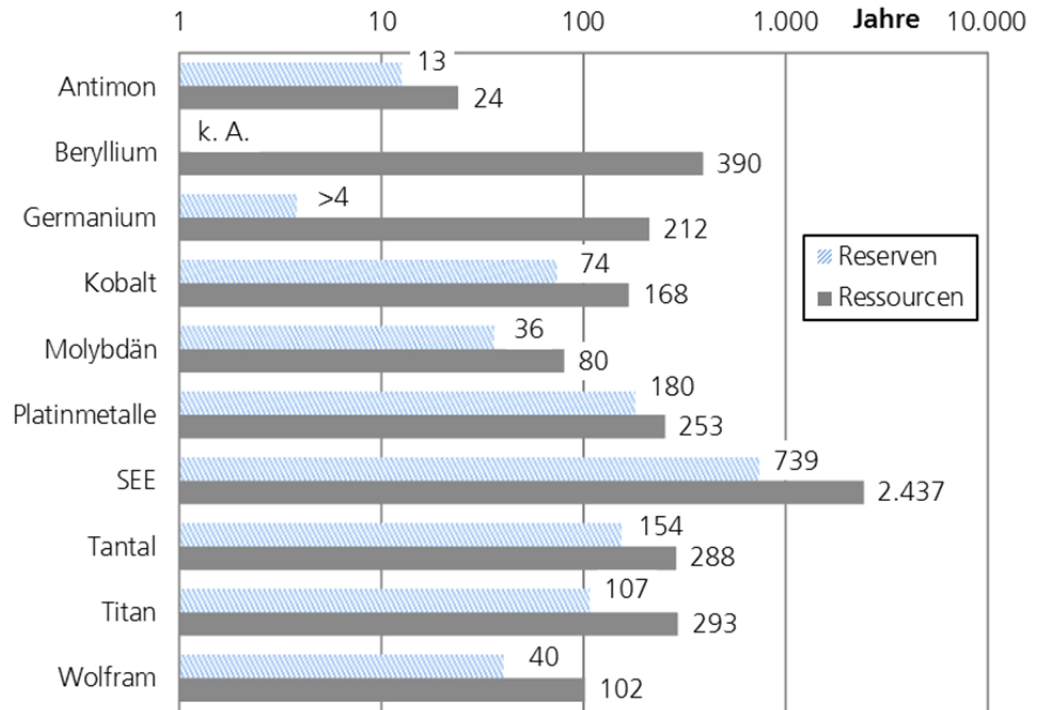
Die Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der statischen Reichweiten von Reserven und Ressourcen im Vergleich.

---

sich in Tonnen TiO<sub>2</sub>-Gehalt [USGS 2013]. Die Daten zur Produktion der Seltenen Erden wurden anhand der Angebotssituation nach [Mishra et al. 2012] berechnet und stellen somit Näherungswerte dar.

**Abbildung 17:**

Die statischen Reichweiten der Reserven und Ressourcen. Die Berechnungen basieren auf den Informationen zur Jahresproduktion 2010 (siehe Tabelle 7), den Daten zu Reserven für die meisten Rohstoffe [USGS 2010b] und für Tantal [BGS 2011a] sowie den Daten zu Ressourcen für Antimon [Grund et al. 2000], Beryllium [Svilar et al. 2000], Germanium [Scoyer et al. 2000], Kobalt [CDI 2013] Seltenerdelemente [Melcher und Wilken 2013], Tantal [BGS 2011a] und [Burt 2010] die restlichen Rohstoffe [USGS 2010b].



Die globalen Antimonreserven und -ressourcen sind durch sehr geringe Reichweiten geprägt; die Reserven von Molybdän und Wolfram sind als gering einzustufen. Hierdurch sind diese Rohstoffe hinsichtlich ihrer Vorkommen als besonders versorgungskritisch zu bewerten. Bei Zugrundelegung der Ressourcengrößen, verdoppeln sich die statischen Reichweiten aller Rohstoffe mindestens.

Für die Rohstoffe Beryllium und Germanium sind nur unzureichende Daten vorhanden. Daten über die Germanium-Reserven beziehen sich auf die USA, globale Informationen liegen nicht vor [USGS 2013]. Für Beryllium liegen wiederum nur Daten zur Ressourcenmenge vor. Werden bei Kobalt noch potenzielle Ressourcen in der Tiefsee hinzugezählt, geschätzt eine Milliarde Tonne, vergrößert sich die statische Reichweite erheblich [CDI 2013].

Einige Publikationen weisen darauf hin, dass durch die Entdeckung immer neuer Vorkommen durch Explorationstätigkeit, für kritische Rohstoffe in der Regel keine geologische Begrenztheit und damit mittelfristig keine Gefahr ihrer absoluten Erschöpfung besteht [Meadows et al. 2006; Schmitz und Sievers 2013; Hagelüken 2013]. Diese Ansicht ist jedoch kritisch zu bewerten angesichts der Tatsache, dass Rohstoffmärkte dynamisch sind und ihre Parameter kontinuierlichen Veränderungen unterliegen. Daher sind vorhandene Prognosen mit großen Unsicherheiten verbunden.

## 5.2 Regionale Rohstoffkonzentration

Anschließend erfolgte die Analyse der Rohstoffkonzentration, die die Marktanteile der einzelnen Länder hinsichtlich ihrer Produktion und Reserven untersucht. Zunächst wurde die prozentuale Verteilung in Anlehnung an den Bewertungsmaßstab nach [Wuppertal-Institut 2011c] beurteilt.

Tabelle 8 zeigt die geographische Konzentration der Rohstoffe. Auffallend ist, dass sich die Produktion der fünf Rohstoffe Antimon, Beryllium, Platin, Seltenerdmetalle und Wolfram auf je ein Land konzentriert, das jeweils über 75 Prozent der globalen Produktion bereitstellt (»äußerst hohe Konzentration«). Die Rohstoffe Antimon, Beryllium, die SEM und Wolfram werden überwiegend in China abgebaut und Platin zum Großteil in Südafrika.

Daneben wird die Produktion von drei Rohstoffen zu über 50 Prozent in nur einem Land durchgeführt (»hohe Konzentration«): Germanium in China, Kobalt in der Demokratischen Republik (DR) Kongo und Rutil in Australien. Eine »erhöhte Konzentration« liegt bei der Produktion von Molybdän und Palladium vor, die jeweils zu über 50 Prozent in zwei Ländern stattfindet, nämlich China und USA (Molybdän) und Russland und Südafrika (Palladium). Bei Tantal ist eine »schwach erhöhte Konzentration« festzustellen, da über 50 Prozent der Produktion in drei Ländern realisiert wird, namentlich Brasilien, der DR Kongo und Mozambique.

Hinsichtlich der globalen Reserven herrscht für die Platingruppenmetalle eine »äußerst hohe Konzentration« vor, da über 75 Prozent der Reserven auf nur ein Land, nämlich Südafrika entfallen. Daneben ist für Tantal eine »sehr hohe Konzentration« festzustellen. Hier konzentrieren sich über 90 Prozent der Reserven lediglich auf die beiden Länder Brasilien und Australien.

Die Reserven von Germanium, Kobalt und Wolfram konzentrieren sich zu über 50 Prozent auf ein Land (»hohe Konzentration«), China (Germanium), DR Kongo (Kobalt) und China (Wolfram). Die Reserven von Antimon, Molybdän, dem Titanerz Rutil sowie den Seltenerdmetallen verteilen sich zu über 50 Prozent auf zwei Länder (»erhöhte Konzentration«). Für Beryllium liegen keine verlässlichen Daten oder Schätzungen hinsichtlich der globalen Reserven vor.

Eine genauere Analyse der Länderkonzentrationen weist zudem auf eine geringe Anzahl an Staaten und eine dominierende Stellung Chinas hin (siehe Tabelle 8). Überdurchschnittlich häufig konzentriert sich die Primärgewinnung auf die Volksrepublik China. Fünf der Rohstoffe werden am häufigsten in China gewonnen, dabei vereint die Volksrepublik bei drei Rohstoffen (Antimon, SEM, Wolfram) sogar mehr als 85 Prozent der globalen Primärproduktion. Auch verfügt China bei fünf Rohstoffen (Antimon, Germanium, Molybdän, SEM, Wolfram) und dem Titanmineral Ilmenit über die meisten Reserven weltweit.

**Tabelle 8:**  
 Geographische Konzentration der Produktion und der Reserven. Die Bedeutung der farblichen Hinterlegungen sind der Legende zu entnehmen. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Wuppertal-Institut 2011c].

Rohstoffe		Primärgewinnung (2010)	Globale Reserven
<b>Antimon</b>		China (90%), Bolivien (3%)	China (37%), Thailand (20%), Russland (17%)
<b>Beryllium</b>		USA (88%), China (11%)	k. A.
<b>Germanium</b>		China (68%), Russland (4%), USA (3%)	China (71%)
<b>Kobalt</b>		DR Kongo (53%), China (7%), Russland (7%)	DR Kongo (51%), Australien (23%), Kuba (8%)
<b>Molybdän</b>		China (39%), USA (25%), Chile 15%	China (38%), USA (31%), Chile (13%)
<b>PGM</b>	Palladium	Russland (42%), Südafrika (41%), USA (6%)	Südafrika (89%), Russland (9%), USA (1%)
	Platin	Südafrika (77%), Russland (13%), Simbabwe (5%)	
<b>Seltene Erden</b>		China (97%), Indien (2%)	China (37%), GUS (19%), USA (13%)
<b>Tantal</b>		Brasilien (26%), DR Kongo (25%), Mozambique (18%)	Brasilien (62%), Australien (38%)
<b>Titan</b>	Ilmenit	Australien (17%), Südafrika (17%), Kanada (13%)	China (29%), Australien (19%), Indien (12%)
	Rutil	Australien (54%), Südafrika (22%), Sierra Leone (10%)	Australien (48%), Südafrika (18%), Indien (16%)
<b>Wolfram</b>		China (86%), Russland (4%)	China (65%), USA (5%), Kanada (4%)

**Legende**

	äußerst hohe Konzentration sehr hohe Konzentration hohe Konzentration	> 75% in 1 Land > 90% in 2-3 Ländern > 50% in 1 Land
	erhöhte Konzentration schwach erhöhte Konzentration	> 50% in 2 Ländern > 50% in 3 Ländern
	keine Besonderheiten	Verteilung der Produktion auf viele Länder
	mangelhafte Datenlage	Fehlende Daten der Produktionsverteilung

Im Anschluss daran wurde die Marktkonzentration der Förderländer mit Hilfe des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) analysiert. Der HHI errechnet sich aus der Summe der quadrierten Marktanteile aller Marktteilnehmer [Bleymüller et al. 1996]. N steht für die Anzahl der produzierenden Länder,  $a_i$  ist der Marktanteil der jeweiligen Förderländer an der Jahresproduktion. Infolge des Quadrierens werden höhere Produktionskonzentrationen stärker gewichtet als niedrigere [Bleymüller et al. 1996].

$$HHI(a) = \sum_{i=1}^N (a_i^2)$$

Das U.S. Department of Justice und die Federal Trade Commission gibt folgende Skala zur Bewertung der HHI-Werte vor (siehe Tabelle 9):

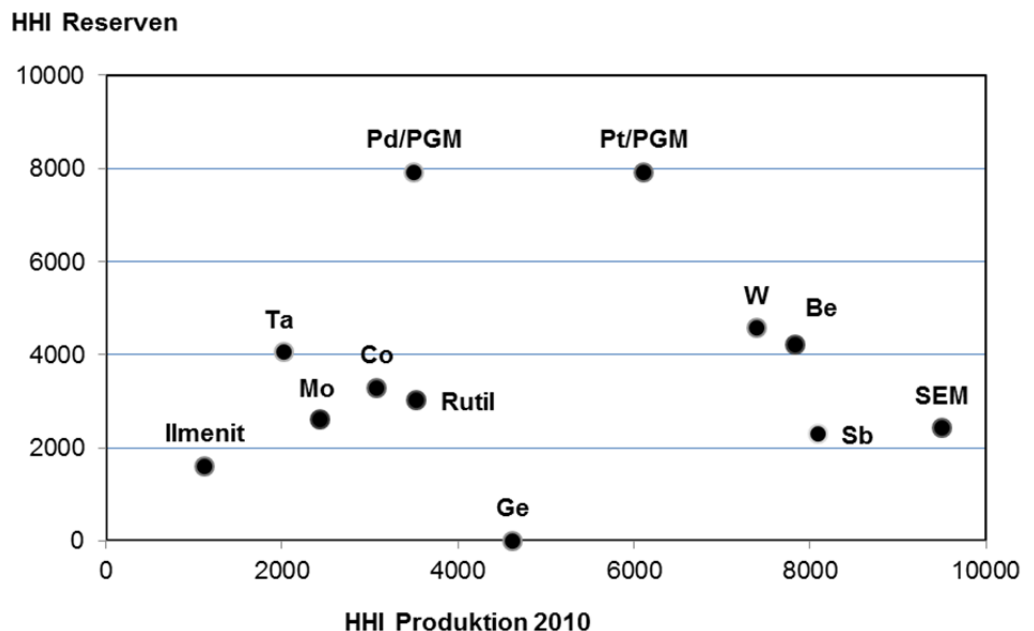
**Tabelle 9:**  
Bewertungsskala des Herfindahl-Hirschman-Index. Eigene Darstellung nach [U.S. Department of Justice 2010].

Beurteilung der Marktkonzentration nach HHI		
niedrig	mittelmäßig	stark
< 1 000	1 000 – 2 500	> 2 500

Die Marktkonzentration nach Herfindahl-Hirschman-Index in Abbildung 18 zeigt, dass sowohl die Produktion als auch die Reserven generell auf hohe Länderkonzentrationen hinweisen. Die HHI-Werte für die Rohstoffgewinnung von Antimon, Beryllium, Germanium, Kobalt, den Platinmetallen, den Seltenen Erden, dem Titanerz Rutil sowie Wolfram weisen auf eine starke Konzentration hin. Die

Molybdän- und Tantalförderung sowie die Gewinnung des Titanerzes Ilmenit ist von einer mittelmäßigen Konzentration geprägt. Auch bei den Reserven weist die überwiegende Anzahl der Rohstoffe auf eine starke Konzentration hin: Germanium, Kobalt, Molybdän, Platinmetalle, Tantal, Rutil und Wolfram. Daneben weisen die übrigen Rohstoffe (Antimon, Seltenerdelemente und Ilmenit) mittelmäßige Konzentration auf. Für die Berylliumreserven liegen keine Daten vor. Bei Germanium ist zu beachten, dass der HHI der Produktion tatsächlich noch höher liegt, da 25 Prozent der Produktion in Ländern stattfindet, die jedoch mit ihren jeweiligen Anteilen nicht ermittelt werden konnte.

**Abbildung 18:** Marktkonzentration der Produktion und der Reserven nach dem Herfindahl-Hirschman-Index. Berechnungen basierend auf [USGS 2010b; USGS 2011b; U.S. Department of Justice 2010; Melcher und Wilken 2013].



### 5.3 Länderrisiko der Produktion

Der Indikator Länderrisiko der Produktion basiert auf der Annahme, dass die politische Stabilität eines Staates und dessen Umweltleistung das künftige Versorgungsrisiko eines Rohstoffes beeinflussen [EC-JCR 2013].

Folgende zwei Indikatoren-Sets dienen als Bewertungsgrundlage für das Länderrisiko der Rohstoffproduktion: die »Worldwide Governance Indicators (WGI)« der Weltbank [World Bank Group 2013] und der »Environmental Performance Index (EPI)« der Yale University [YCELP 2012]. Die Worldwide Governance Indikatoren bewerten 213 Staaten hinsichtlich der Qualität ihrer Regierungsführung, basierend auf sechs Analysekatoren: Mitspracherecht und Rechenschaftspflicht, politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt,

Leistungsfähigkeit der Regierung, Regierungsqualität, Rechtsstaatlichkeit und Korruptionsbekämpfung [World Bank Group 2010].

Zur Berechnung des WGI-Länderrisikos der Produktion jedes Rohstoffes wurden in Anlehnung an [DERA 2013] folgende Schritte unternommen:

- Aggregation der sechs Analysekatoren zu einem WGI-Länderwert
- Multiplikation des prozentualen Anteilswertes eines Landes an der Primärproduktion mit dessen WGI-Länderwert
- Summierung der WGI-Länderwerte zu einem Gesamtindikator je Rohstoff

Das WGI-Länderrisiko der Produktion (Übersicht siehe Tabelle 10) variiert in der Regel zwischen Werten von +2,5 und -2,5, wobei +2,5 ein sehr geringes und -2,5 ein sehr kritisches Versorgungsrisiko repräsentiert.

In Bezug auf die politische Stabilität weisen die Rohstoffmärkte für Antimon, die Seltenerdmetalle, Tantal und Kobalt auf eine schwache Regierungsführung ihrer Hauptförderländer hin (vgl. Tabelle 10). Es handelt sich hierbei in erster Linie um die Länder China und die DR Kongo.

**Tabelle 10:**  
 Kategorisierung der Rohstoffproduktion hinsichtlich der Regierungsführung der Produktionsländer. Berechnungen basierend auf [World Bank Group 2013].

<b>Beurteilung des Versorgungsrisikos nach WGI-Länderrisiko der Förderländer</b>		
<b>niedriges Versorgungsrisiko</b>	<b>mäßiges Versorgungsrisiko</b>	<b>Versorgung kritisch</b>
+2,5 bis +0,5	+0,5 bis -0,5	-0,5 bis -2,5
Beryllium (1,03) Rutil (Titan-Erz) (0,79)	Ilmenit (Titan-Erz) (0,46) Molybdän (0,26) Platin (0,08) Palladium (-0,14) Germanium (-0,38) Wolfram (-0,47)	Antimon (-0,54) Seltene Erden (-0,55) Tantal (-0,60) Kobalt (-0,86)

Die Rohstoffe Ilmenit, Molybdän, Platin, Palladium, Germanium<sup>3</sup> und Wolfram charakterisieren sich durch ein mäßiges Versorgungsrisiko. Lediglich zwei der Rohstoffe (Beryllium und Rutil) sind wiederum durch ein niedriges Versorgungsrisiko geprägt. Im Falle von Beryllium ist dies auf die hohe Unsicherheit der Informationen über Förderländer zurückzuführen. Es wird angenommen, dass die Bewertung tatsächlich anders ausfallen würde, würden die Bergbauaktivitäten aller Länder, inkl. Russland und Kasachstan transparent veröffentlicht. Insgesamt

<sup>3</sup> Im Falle von Germanium konnte nicht ermittelt werden, welchen Ländern neben China, USA und Russland 25 Prozent Marktanteil zugerechnet werden soll.

lässt sich schlussfolgern, dass es bei neun der elf untersuchten Rohstoffe ein Versorgungsrisiko hinsichtlich der Governance ihrer Produzentenländer gibt.

Dies gilt in ähnlicher Weise für die Umweltleistungen der Förderländer, gemessen anhand des Environmental Performance Index (EPI). Der EPI vergleicht die ökologische Leistungsbilanz von 132 Ländern. Anhand von zehn Analyse-kategorien und 22 Indikatoren werden Umweltgesundheit und Zustand von Ökosystemen bewertet [YCELP 2012]. Hierauf basierend werden die Länder hinsichtlich ihrer Umweltleistung bewertet (siehe Tabelle 11).

**Tabelle 11:**  
 Kategorisierung der Rohstoffproduktion anhand der Umweltleistung 2010. Eigene Darstellung. Berechnungen basierend auf [USGS 2011; YCELP 2012].

<b>Beurteilung des Versorgungsrisikos nach EPI-Umweltleistung der Förderländer</b>				
<b>am stärksten</b>	<b>stark</b>	<b>mittel</b>	<b>schwach</b>	<b>am schwächsten</b>
100 – 67	67 – 57	57 – 49	49 – 39	39 – 0
		Beryllium (54,7) Molybdän (49,3)	Ilmenit (46,9) Kobalt (45,6) Rutil (44,3) SEM (42,2) Antimon (41,5) Wolfram (41,4) Palladium (40,2)	Platin (37,4) Tantal (36,4) Germanium (32,0)

Auffallend hierbei ist, dass keines der untersuchten Elemente durch starke Umweltleistungen seiner Produktionsländer geprägt ist. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Primärgewinnung aller untersuchten Rohstoffe überwiegend in Ländern stattfindet, die durch eine mittlere, schwache oder schwächste Umweltleistungen charakterisiert sind. In diesen Ländern sind Umweltschäden durch Klimawandel, Landwirtschaft, Abholzung, Luft- und Wasserverschmutzungen besonders ausgeprägt und bewirken somit eine Gefährdung für die Gesundheit von Ökosystemen und Menschen.

Für manche Länder sind aufgrund fehlender Informationen keine EPI-Daten verfügbar [YCELP 2012]. Betraf dies Länder mit Produktionsanteilen von weniger als 5 Prozent, wurden sie bei dieser Analyse vernachlässigt. Lediglich beim Rohstoff Tantal waren die Produktionsanteile für Ruanda (16 Prozent) und Äthiopien (11 Prozent) größer; bei Germanium konnte nicht ermittelt werden, welche Länder in die Kategorie »andere Länder« (25 Prozent) fallen. Daher wird davon ausgegangen, dass der Wert von Tantal und Germanium in Wahrheit über dem ermittelten Wert rangiert und das Versorgungsrisiko faktisch geringer ist. Die EPI-Umweltleistung der Tantal- und Germanium-Förderländer ist folglich als mit am schwächsten eingestuft, zumal mangelnde Informationen über Ökosystemgesundheit auch als Hinweis für eine schwache Umweltleistung gewertet werden können.

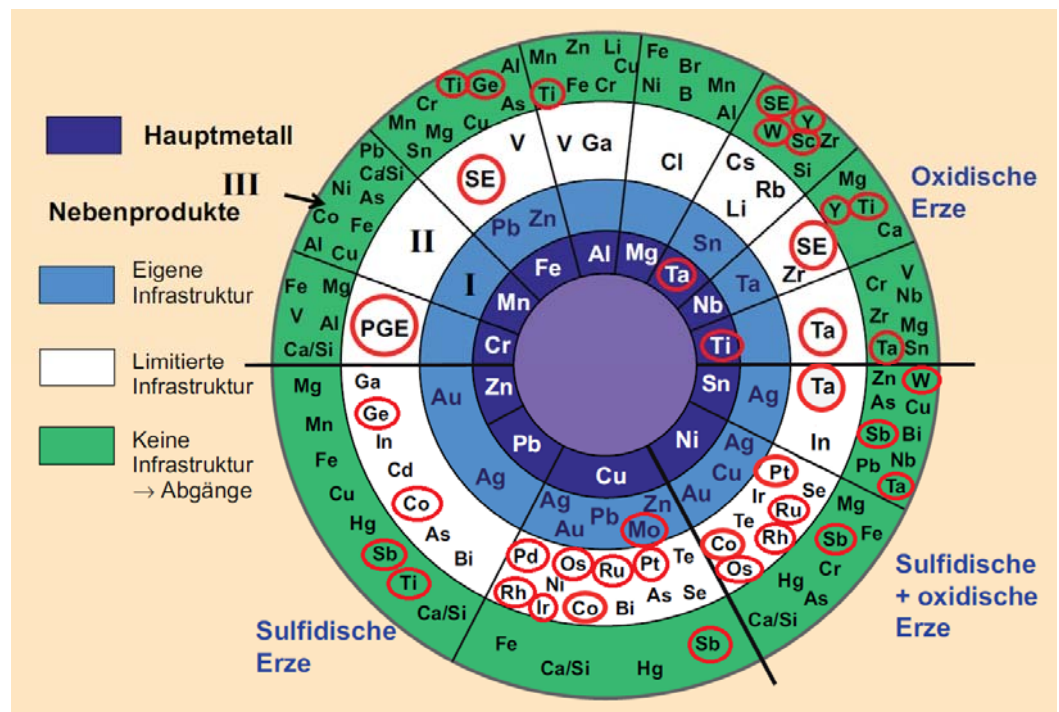


## 5.4 Koppelproduktion

Ein wichtiger technologischer Aspekt der Primärgewinnung ist, dass einige der versorgungskritischen Rohstoffe vorrangig als Nebenprodukt von Hauptmetallen gewonnen werden. Infolge der Koppelproduktion kann strukturelle Ressourcenknappheit bestehen [Hagelücken 2013]. Der Rohstoff fällt bei der Förderung eines Hauptmetalls lediglich als Nebenprodukt an und kann erst durch einen notwendigen Zwischenschritt wirtschaftlich abgebaut werden [Achzet 2012]. Dies ist insofern problematisch, da das globale Angebot des Koppelprodukts vom Bergbau der Hauptmetalle abhängt [Hagelücken 2013]. Umgekehrt bedeutet dies, dass bei einer sprunghaft gesteigerten Nachfrage für einen Rohstoff, der in Koppelproduktion gewonnen wird, ein zeitnaher Förderungsanstieg des Hauptmetalls notwendig wird und die damit verbundenen Absatzmöglichkeiten gegeben sein müssen.

Der Aspekt der Koppelproduktion wird durch das sogenannte Metallrad anschaulich verdeutlicht (siehe Abbildung 19). Die für diese Studie relevanten Elemente sind mit einem roten Kreis hervorgehoben.

**Abbildung 19:**  
Das Metallrad [Reuter et al. 2005], leicht verändert nach [Melcher und Wilken 2013].



Die globalen Bergbauaktivitäten konzentrieren sich überwiegend auf die dunkelblau hinterlegten Hauptmetalle. Im Ring I (blau hinterlegt) sind Nebenelemente mit eigener Produktionsinfrastruktur dargestellt [Melcher und Wilken 2013]. Der weiß hinterlegte Ring II enthält Koppelprodukte deren Gewinnung häufig unwirtschaftlich ist und die über eine limitierte oder fehlende Produktionsinfrastruktur verfügen [Melcher und Wilken 2013]. Der grün eingefärbte Ring III verweist auf Nebenprodukte, die als Reststoffe oder in Form von Emissionen bei primären Gewinnungsprozessen in der Regel verloren gehen [Melcher und Wilken 2013].

Tabelle 12 zeigt, ob die untersuchten Rohstoffe überwiegend als Haupt- oder Nebenprodukt gewonnen werden. Zudem gibt sie an, bei welchem Hauptprodukt sie in Koppelproduktion anfallen.

**Tabelle 12:**  
 Überwiegende Gewinnungsart der Rohstoffe und Hauptprodukte der Koppelproduktion.

Gewinnung überwiegend als Haupt oder Nebenprodukt		Koppelprodukt	Quellen
<b>Antimon</b>	Hauptprodukt	Blei, Kupfer, Silber	[Grund et al. 2000; Kammer 2006a; DERA 2013]
<b>Beryllium</b>	Hauptprodukt		
<b>Germanium</b>	Nebenprodukt (~100%)	Zink, Kupfer, Blei, Kohle	[Scoyer et al. 2000; Kammer 2006b; Guberman 2012]
<b>Kobalt</b>	Nebenprodukt (~85 %)	Nickel (50 %) Kupfer (30 %)	[Shedd 2012a; Bertau et al. 2013]
<b>Molybdän</b>	Nebenprodukt (54 %), Hauptprodukt (46 %)	Kupfer	[Polyak 2012]
<b>Platinmetalle</b>	Nebenprodukt	Platin und Palladium: Koppelprodukte von Kupfer-, Nickel- und Chrom-Erzen Rhodium, Iridium, Ruthenium, Osmium: Koppelprodukte von Platin oder Palladium	[Hagelüken und Kleinwächter 2006]
<b>Seltene Erdmetalle</b>	Nebenprodukt (Ausnahme: zwei Standorte in den USA und Australien)	Eisen (SEM), Uran, Wolfram, Zinn, Niob, Zirkon, Nickel (Scandium)	[BGS 2011b]
<b>Tantal</b>	Hauptprodukt (60 %)	Zinnbleche (10-14 %), Altmetallrecycling und synthetische	[Crocket et al. 1993; Albrecht et al. 2000; Bertau et al. 2013]

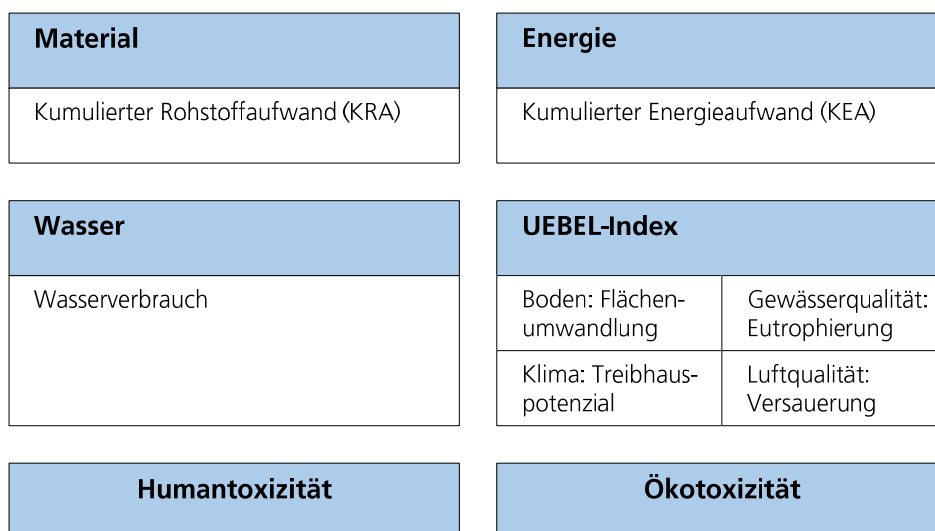
		Konzentrate (20 %), Lithium	
<b>Titan</b>	Hauptprodukt		[Sattelberger 2006; Bedinger 2012]
<b>Wolfram</b>	Hauptprodukt		[Bertau et al. 2013]

## 5.5 Umweltwirkungen

Immer mehr Publikationen beschäftigen sich mit Nachhaltigkeits- und Umweltaspekten sowie Ökobilanzierung im Bergbau [Awuah-Offei und Adekpedjou 2011; Jacquemin et al. 2012; Norgate und Haque 2010; Rankin 2010; Wäger et al. 2012].

Laut Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) stehen folgende Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit Rohstoffgewinnung: Verlust und Verschlechterung von Ökosystemen, Flächenverbrauch, Beeinträchtigung des Wasserhaushalts, Emissionen, Schadstoffe aus der Extraktion sowie Energie- und Wassereinsatz [SRU 2012]. Im Rahmen dieser Studie wurden sechs Kategorien von Umweltwirkungen untersucht (vgl. Abbildung 20).

**Abbildung 20:**  
Untersuchte Kategorien hinsichtlich Umweltwirkung des Bergbaus: Material-, Energie- und Wasserverbrauch und aggregierter Index zur Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL).



Die verwendeten Daten stammen aus der Datenbank »Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas)« des Umweltbundesamts und des Öko-Instituts e.V. [UBA und Öko-Institut 2013] sowie der ecoinvent v2.2 Datenbank [ecoinvent 2009]. Näheres zu den verwendeten Prozessen und Daten ist dem Anhang 3 zu entnehmen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung der Umweltwirkungen der Rohstoffproduktion dargestellt, zunächst pro Rohstoffeinheit, also je Tonne, und anschließend für die Weltgesamtförderung 2010 (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22).

Da sämtliche Umweltwirkungen in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt sind, wird hierfür eine einheitliche Größe zur Gewichtung gewählt, um sie vergleichbar zu machen, der UEBEL-Index.

1 UEBEL= »Das Maß der jeweiligen Belastung, bei der der langfristige und nachhaltige Schutz des jeweiligen Schutzgutes gerade noch gewährleistet ist«  
[UBA 2012].

Der UEBEL-Indikator ist eine aggregierte Messgröße, die vom Umweltbundesamt für Deutschland entwickelt wurde, um einen nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen messbar zu machen. Hierfür wurde die Senkenfunktion von vier Umweltschutzgütern (Klima, Luftqualität, Gewässer und Boden im Sinne von Fläche) bewertet. Der UEBEL-Index ist demnach als Verhältniszahl zu verstehen, der die globale Rohstoffgewinnung aus der Perspektive Deutschlands bemisst und die Umweltwirkungen so bewertet, als würde der Bergbau in der Bundesrepublik stattfinden. Der Indikator legt anhand von Umweltzielen und hieraus abgeleiteten Umrechnungsfaktoren fest, welche Grenzwerte von Deutschland bei nachhaltigem Wirtschaften nicht überschritten werden dürfen (siehe Tabelle 13). Eine ausführliche Beschreibung hierzu liefert [UBA 2012].

**Tabelle 13:**

Übersicht über Teilindikatoren basierend auf Umweltzielen und den hieraus abgeleiteten Umrechnungsfaktoren. Eigene Darstellung basierend auf [UBA 2012].

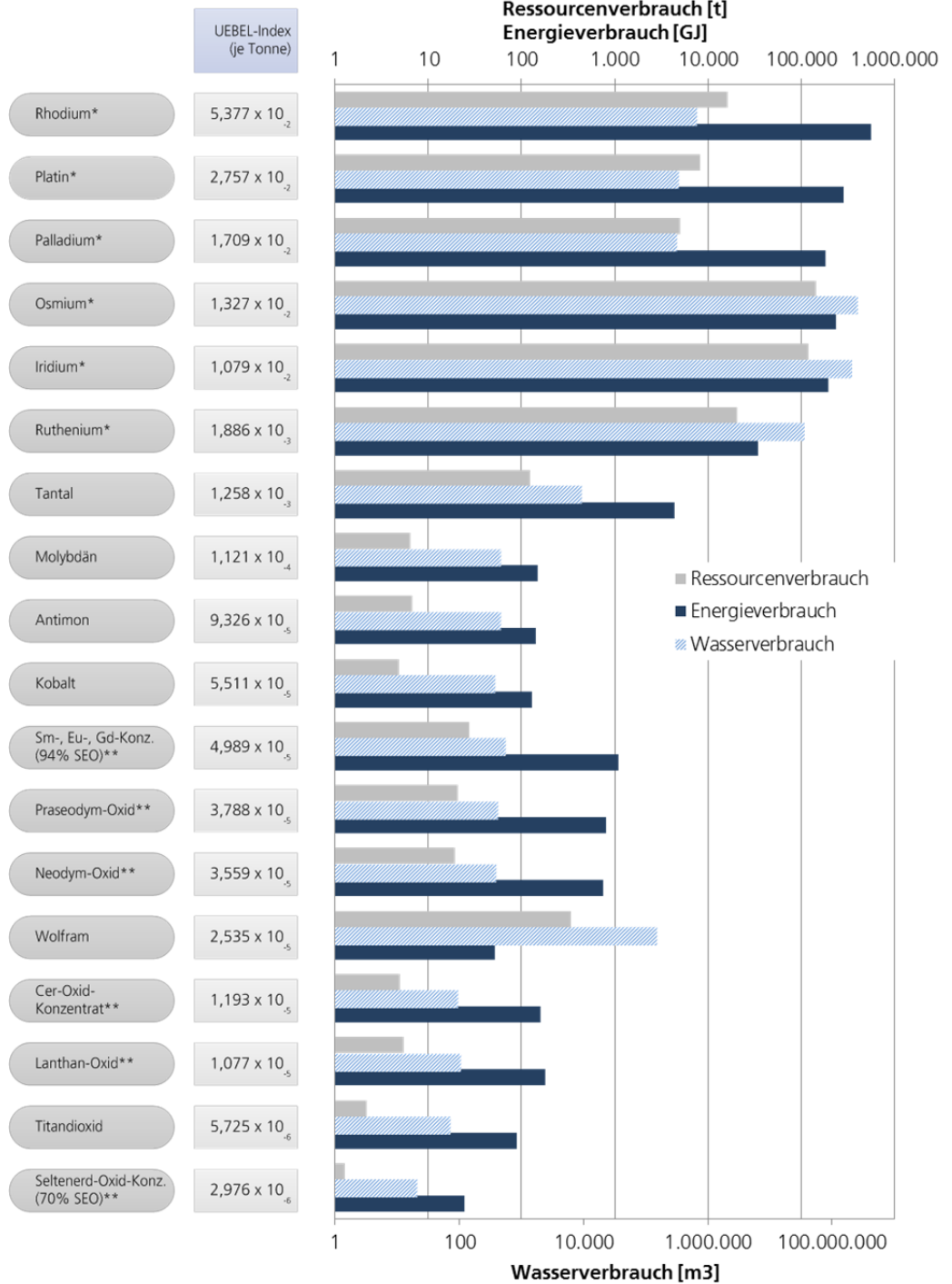
Schutzgut				
Klima	1 UEBEL	=	250 000 000	t CO <sub>2</sub> -Äquivalent pro Jahr
	1/4 UEBEL	=	530 000	SO <sub>2</sub> pro Jahr
Luft	1/4 UEBEL	=	1 150 000	t NO <sub>x</sub> pro Jahr
	1/4 UEBEL	=	537 000	t NH <sub>3</sub> pro Jahr
	1/4 UEBEL	=	1 150 000	t NMVOC pro Jahr
	1/2 UEBEL	=	420	t AO <sub>x</sub> pro Jahr
Gewässer	1/2 UEBEL	=	245 000	t Gesamt-N pro Jahr
	1 UEBEL	=	110	km <sup>2</sup> pro Jahr

Schutzgut	Einheit	Umrechnungsfaktor
Klima	1 t CO <sub>2</sub> -Äquivalent	1/250 Mio UEBEL x Jahr
Luftqualität	1 t SO <sub>2</sub>	1/2,12 Mio UEBEL x Jahr
	1 t NO <sub>x</sub>	1/4,6 Mio UEBEL x Jahr
	1 t NH <sub>3</sub>	1/2,15 Mio UEBEL x Jahr
	1 t NMVOC	1/4,6 Mio UEBEL x Jahr
Gewässer	1 t AO <sub>x</sub>	1/840 UEBEL x Jahr
	1 t Gesamt-N	1/490 000 UEBEL x Jahr
Boden / Fläche	1 km <sup>2</sup>	1/110 UEBEL x Jahr

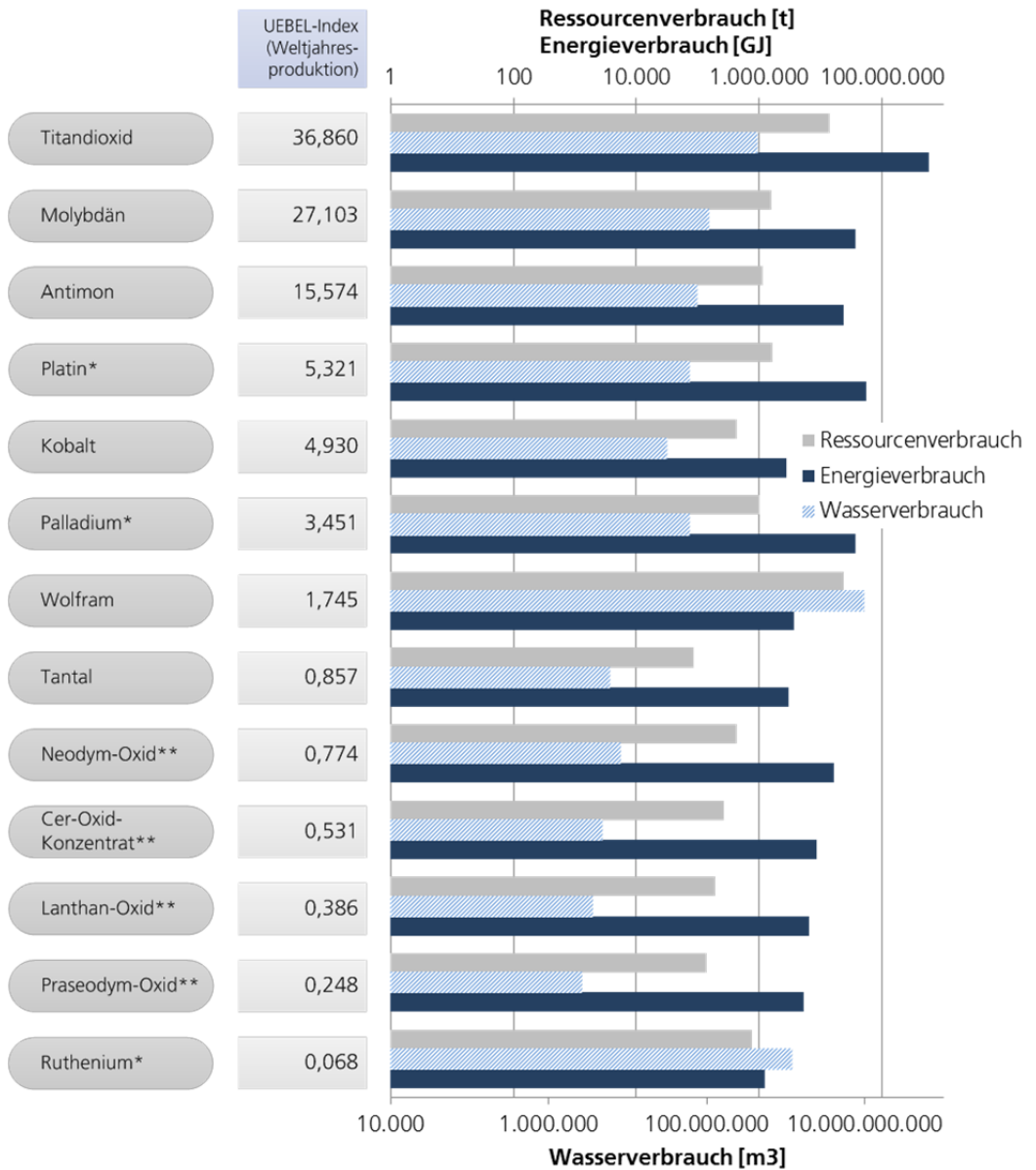
**Abbildung 21:**

Die Ressourcenindikatoren Energie-, Material- und Wasserverbrauch je Tonne Rohstoff im Vergleich. Die Platinmetalle sind mit einem Stern, die Selteneroxide mit zwei Sternen gekennzeichnet. Darstellung in logarithmischer Skalierung. Rohstoff-Datensätze und LCIA-Methoden basierend auf [ecoinvent 2009; UBA und Öko-Institut 2013; UBA 2012].



**Abbildung 22:**

Die Ressourcen-,  
energie-,  
Material- und  
Wasserverbrauch der  
Weltjahresproduktion  
der Rohstoffe im  
Vergleich. Die  
Platinmetalle sind mit  
einem Stern, die  
Seltenerdoxide mit  
zwei Sternen  
gekennzeichnet.  
Darstellung in  
logarithmischer  
Skalierung. Rohstoff-  
Datensätze und  
LCIA-Methoden  
basierend auf  
[ecoinvent 2009;  
UBA und Öko-Institut  
2013; UBA 2012].



Die Ergebnisse je Rohstoffeinheit Tonne zeigen einen extrem hohen Energieverbrauch und Materialaufwand der Platinmetalle. Auffallend ist zudem der große Wasserverbrauch insbesondere für Iridium, Osmium und Ruthenium. Er liegt mit über zehn Mio Kubikmeter (m<sup>3</sup>) je Tonne Rohstoff wesentlich über dem der anderen Rohstoffe, für deren Produktion in der Regel weniger als 1 000 m<sup>3</sup> benötigt wird.



Abgesehen von den Platinmetallen, werden auch für die Produktion einer Tonne Tantal vergleichsweise große Mengen an Energie und Wasser benötigt. Daneben braucht es zur Herstellung einer Tonne Wolfram verhältnismäßig viel Wasser und Ressourcen. Der Energieverbrauch ist für einige Seltenerdelemente relativ groß. Die niedrigsten Umweltwirkungen je Tonne weisen die Rohstoffe Titandioxid und das Seltenerd-Oxid-Konzentrat (70 Prozent SEO) auf.

Bei Gewichtung der Werte nach dem UEBEL-Index zeigt sich, dass die Umweltwirkungen der Platinmetalle am größten sind. Insbesondere Rhodium, Platin und Palladium scheinen über ein extrem großes Schadpotenzial je Tonne zu verfügen. Neben den Platinmetallen weisen insbesondere Tantal und Molybdän hohe Werte auf. Besonders niedrige UEBEL-Werte weisen einige der Seltenen Erden (Cer-Oxid, Lanthan-Oxid, Seltenerdoxid-Konzentrat) sowie Titandioxid auf.

Bei der Analyse der Umweltwirkungen auf Basis der Weltjahresproduktion wird deutlich, dass die Titandioxid-, Molybdän- und Antimonproduktionen die größten Umweltbelastungen der untersuchten Rohstoffe aufweisen. Die Seltenerdoxide Cer-Oxid-Konzentrat, Lanthan- und Praseodym-Oxid sowie Ruthenium weisen insgesamt die geringsten UEBEL-Werte auf.

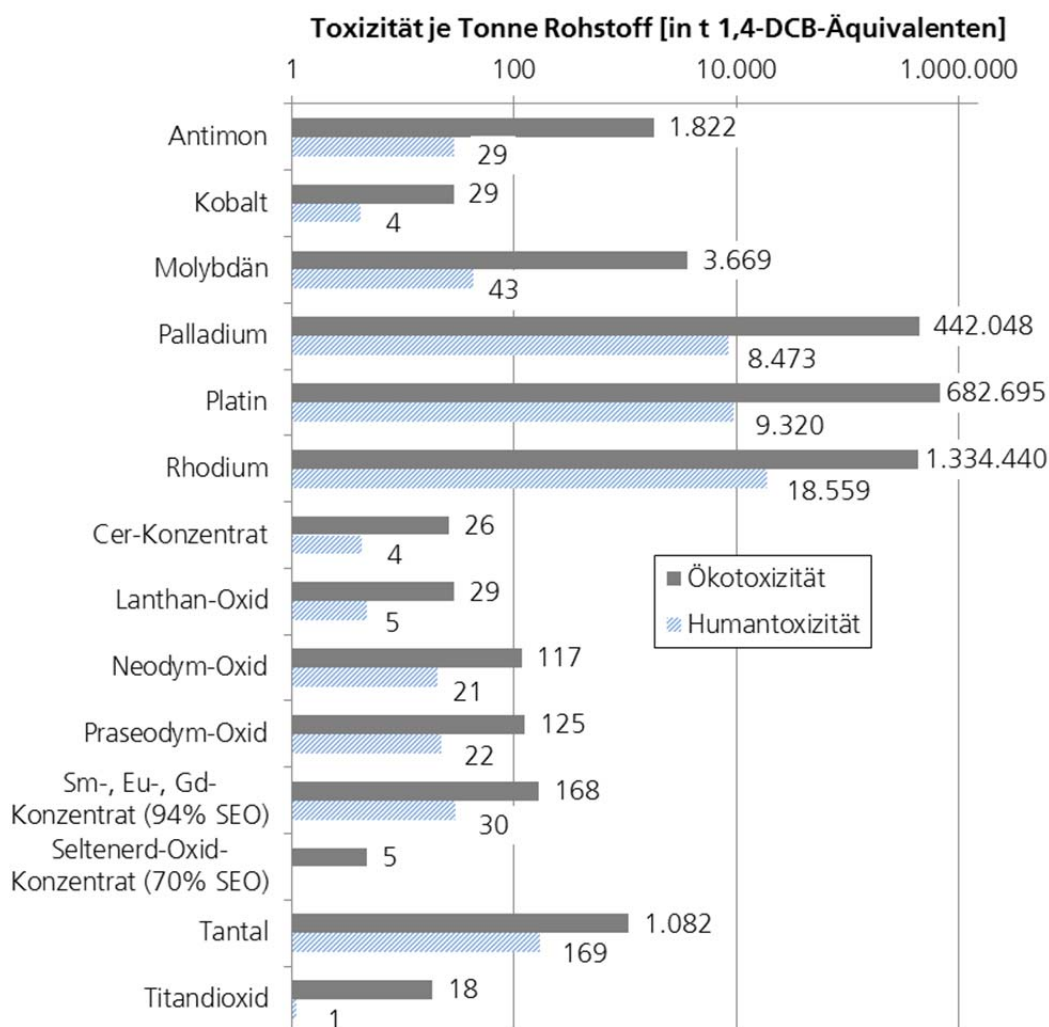
Während die Platinmetalle bei der Untersuchung je Tonne Rohstoff die höchsten Werte haben, werden diese Umweltwirkungen durch die geringen Produktionsvolumina relativiert. Dies zeigt sich besonders am Beispiel Ruthenium, das die größten Umweltwirkungen je Tonne aufwies und zugleich die niedrigsten für die Weltjahresproduktion 2010. Palladium und Platin zeigen trotzdem die größten SO<sub>2</sub>-Emissionen und auch enorme Mengen an Kohlenstoffdioxid-äquivalenten ausgestoßen. Auffallend ist zudem der große Wasserverbrauch, der bei der globalen Wolfram-, Ruthenium- und Titandioxid-Produktion jährlich anfällt.

## 5.6 Ökotoxizität und Humantoxizität

Zur Bewertung der Umweltwirkung der Rohstoffe auf die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen wurden die Indikatoren »Ökotoxizität« und »Humantoxizität« [Guinée 2002] des Centrums voor Milieukunde (CML) der Universität Leiden gewählt (siehe Anhang 3). Der Indikator der Ökotoxizität wurde aus der Summe von fünf Indikatoren für aquatische und terrestrische Ökotoxizität berechnet. Wie bei der Analyse der Umweltwirkungen, erfolgt auch hier die Betrachtung je Tonne Rohstoff als auch für die Weltjahresproduktion 2010. Abbildung 23 verdeutlicht die Toxizität je Tonne produzierten Rohstoffes. Für Beryllium, Germanium, die Seltenerdoxid-Konzentrate und Wolfram sowie die übrigen Platinmetalle Iridium, Osmium, Ruthenium sind keine Daten verfügbar.



**Abbildung 23:**  
Vergleich der Ökotoxizität und Humantoxizität je Tonne Rohstoff. Darstellung in logarithmischer Skalierung, Berechnungen basierend auf der LCIA-Methode CML 2001 [ecoinvent 2009; Guinée 2002].

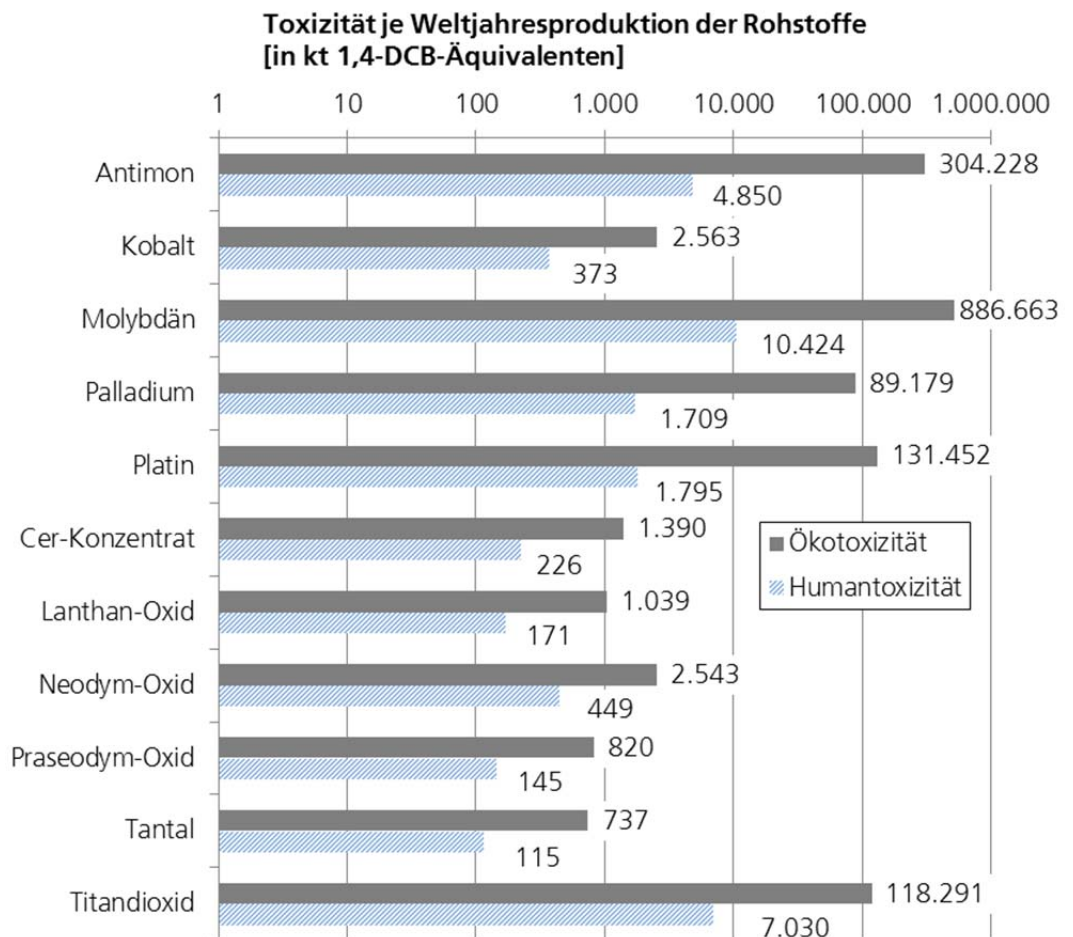


Für alle untersuchten Elemente gilt die Aussage, dass die Ökotoxizität deutlich über der Humantoxizität liegt. Daneben scheint auch eine Korrelation zwischen beiden Werten zu bestehen, d.h. solche Rohstoffe, die hohe Werte hinsichtlich Ökotoxizität zeigen, weisen auch hohe Werte für Humantoxizität auf und umgekehrt. Auffallend hohe Umweltwirkungen weisen Palladium, Platin und Rhodium auf. Während die 1,4-DCB-Äquivalenten für Kobalt, Cer-Oxid-Konzentrat, Lanthan-Oxid und Titandioxid unter 30 Tonnen liegen, weist Rhodium einen Wert von über einer Million Tonnen auf und auch die Werte von Platin und Palladium liegen deutlich über den anderen Rohstoffen. Diese extremen Werte spiegeln sich

auch in der Humantoxizität wider, bei der Rhodium die größte Wirkung aufweist, gefolgt von Platin und Palladium. Ihre Werte für Ökotoxizität liegen zu einem Hunderttausendfachen über denen der Vergleichsrohstoffe. Relativ hohe Ökotoxizität zeigen Molybdän, Antimon und Tantal. Eine vergleichsweise hohe Humantoxizität je Tonne Rohstoff zeigt auch Tantal.

Beim Vergleich der Umweltwirkungen der Weltjahresproduktion (Abbildung 24) der einzelnen Rohstoffe weisen Molybdän und Antimon die höchsten Werte für Ökotoxizität auf, gefolgt von Titandioxid, Platin und Palladium. Für Humantoxizität ist die globale Molybdän-Produktion ebenfalls dominierend, gefolgt von der weltweiten Titandioxid-Gewinnung sowie Antimon.

**Abbildung 24:**  
Vergleich der Ökotoxizität und Humantoxizität (in kt 1,4-DCB-Äquivalenten) des globalen Produktionsvolumens (in t) 2010. Darstellung in logarithmischer Skalierung, Berechnungen basierend auf der LCIA-Methode CML 2001 [ecoinvent 2009; Guinée 2002].



Auffallend ist zudem, dass die Platinmetalle trotz ihrer sehr geringen jährlichen Produktionstonnagen relativ hohe Werte für Toxizität im Hinblick auf Mensch und Umwelt haben. Umgekehrt weist die Molybdän-Jahresproduktion die größten Toxizitätswerte auf, während eine Tonne Molybdän im Vergleich nur mittlere Werte zeigte. Ebenso wie bei den Umweltwirkungen, wären auch hier weitere und ausführlichere Datenerhebungen notwendig, um fundierte Aussagen, über die Toxizität des Bergbaus aller Rohstoffe treffen zu können.

## 5.7 Konfliktminerale

Die politische Stabilität eines Förderlandes und seine Regierungsführung bedingen den Zugang zu Rohstoffen [IZT 2011]. Herrscht in einem Staat politische Instabilität, ein bewaffneter Konflikt oder Krieg, kann dies die Rohstoffförderung negativ beeinflussen [IZT 2011]. Dieser Thematik widmet sich eine Veröffentlichungsreihe unter Federführung des UBA [adelphi und UBA 2014; adelphi und UBA 2011]. In bestimmten Weltregionen ist konfliktverschärfende Rohstoffextraktion, neben Arbeitssicherheit und -bedingungen, Schutz der Bevölkerung und Umweltproblemen, eines der Hauptprobleme des Bergbaus [IZT 2011]. Beispielsweise trugen im Kongokonflikt der DR Kongo Rohstoffförderung und -handel maßgeblich zur Finanzierung bewaffneter Gruppen, Menschenrechtsverletzungen und damit zur Verlängerung des Konflikts bei, was gravierende Auswirkungen auf die humanitäre Situation des Landes zur Folge hatte [UN 2009].

Die zehn Rohstoffe wurden dahingehend untersucht, ob es sich bei den Elementen oder den Erzen, aus denen sie abgebaut werden, um sogenannte Konfliktminerale handelt. Bei der Analyse wurden als Anhaltspunkte berücksichtigt, ob die Rohstoffe Gegenstand des U.S. Dodd-Frank Gesetzes [Dodd-Frank Act 2010] oder den OECD-Leitlinien [OECD 2013] sind, die sich für verantwortungsvolle Rohstofflieferketten einsetzen. Der U.S. Dodd-Frank Act fordert in der Sektion 1502 über Konfliktminerale von US-börsennotierten Firmen Rechenschaft über die Herkunft dieser Erze.

Insgesamt stehen zwei der zehn Rohstoffe im Verdacht, als Konfliktminerale in den internationalen Markt zu gelangen, nämlich Tantal und Wolfram. Der Grund hierfür ist, dass ihre Erze teilweise im Zusammenhang mit bewaffneten Konflikten stehen, nämlich Coltan (Tantal), Wolframit (Wolfram) und Kassiterit (Tantal aus Zinnschlacken) [OECD 2013; Dodd-Frank Act 2010]. Zugleich sollte nicht geschlussfolgert werden, dass diese Rohstoffe tatsächlich unter konfliktverschärfenden Bedingungen gewonnen werden. In jedem Fall empfiehlt es sich jedoch, bei diesen Rohstoffen ein verstärktes Augenmerk auf transparente Bereitstellungsketten zu legen.

Neben Konfliktmineralien, sind auch Methoden des Kleinbergbaus (engl. artisanal and small-scale mining) kritisch zu betrachten [BGR 2007b], da diese Art der Rohstoffgewinnung z. T. von bewaffneten Gruppen organisiert wird, die durch die

Bergbauaktivitäten ihre bewaffneten Konflikte finanzieren [BGS 2011a]. Der Kleinbergbau ist global von großer sozialer und ökonomischer Bedeutung. Rund 15 Mio Menschen sind direkt im Kleinbergbau beschäftigt und er spielt für mehr als 100 Mio Menschen eine essenzielle Rolle für den Lebensunterhalt [ILO 1999].

Bei der Extraktion von vier der Top-10-Rohstoffe findet Kleinbergbau in nennenswertem Umfang Anwendung. Nach Schätzungen der BGR beträgt der maximale Anteil des Kleinbergbaus an der globalen Gesamtproduktion bei Kobalt 30 Prozent, bei Tantal 20 bis 26 Prozent, bei Wolfram 6 Prozent und bei Platin 5 Prozent [BGR 2007b].

Es gibt verschiedene Initiativen, die sich dafür einsetzen, die Transparenz der Rohstoffextraktion zu erhöhen. Eine Beteiligung an Systemen zur Erhöhung der Transparenz der Lieferketten wird demzufolge insbesondere für die Rohstoffe Tantal und Wolfram empfohlen. Aufgrund des hohen Anteils des in der DR Kongo gewonnenen Kobalts, kann eine Beteiligung an Initiativen zu transparenten Wertschöpfungsketten auch bei diesem Rohstoff die Versorgungssicherheit langfristig erhöhen.

## 6 Statusanalyse der Sekundärrohstoffgewinnung

### 6.1 Sekundärrohstoffpotenziale

#### 6.1.1 Potenziale in kommunalen Abfallströmen

Für die Ermittlung der theoretischen Wertstoffpotenziale aus dem Bereich der kommunalen Abfälle wurden folgende Abfallströme untersucht:

- Wertstofffraktionen aus der Getrennten Sammlung von Verpackungen
- Wertstofffraktionen aus der mechanisch-biologischen Behandlung (MBA)
- Resthausmüll
- Rost- und Kesselaschen aus der thermischen Abfallbehandlung
- Elektro- und Elektronikschrott (inklusive Altbatterien und Akkus sowie Leuchtstoffröhren)

Zunächst wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um die Abfallströme zu identifizieren in denen versorgungskritische Rohstoffe der roten Kategorie enthalten sind. Bei der Recherche u.a. im Datenbestand des Informations-Portals-Abfallbewertung (IPA) wurde festgestellt, dass für die betrachteten Abfälle nur wenige bis keine Analysendaten dieser Elemente vorhanden sind. Dies betrifft vor allem die Wertstofffraktionen (DSD und MBA) und den Resthausmüll.

Für die Wertstofffraktionen wurden, aufgrund fehlender Daten, keine Abschätzungen zu den Rohstoffen der roten Kategorie durchgeführt, wenngleich in den Produkten solche Rohstoffe enthalten sein können. So wird z.B. Titandioxid u.a. zur Einfärbung von Kunststoffen verwendet.

Für Resthausmüll liegen ebenfalls keine Analysendaten zu den Rohstoffen der roten Kategorie vor. Aus Sortieranalysen lässt sich jedoch ableiten, dass ein theoretisches Potenzial vorhanden sein muss. Dieses ergibt sich vor allem aus dem nicht erfassten Elektro- und Elektronikschrott sowie den nicht erfassten Altbatterien und Akkus sowie Leuchtstoffröhren, die über den Resthausmüll entsorgt werden. Da der Resthausmüll in Baden-Württemberg bis auf 104 000 Tonnen, die mechanisch-biologisch behandelt werden, in Müllheizkraftwerken verbrannt wird, finden sich die relevanten Rohstoffe in den Rost- und Kesselaschen (s.u.).

Beim Elektro- und Elektronikschrott ist davon auszugehen, dass jährlich ca. ein bis zwei Kilogramm je Einwohner [eigene Untersuchungen] über den Restmüllbehälter entsorgt werden. Dies ergibt ein theoretisches Mengenpotenzial von ca. 11 000 - 22 000 Tonnen pro Jahr für Baden-Württemberg.

Nach einer Untersuchung von [Kern 2006] finden sich im Resthausmüll in Deutschland (untersuchte öffentlich-rechtliche Entsorger, Kap. 5.3.1) ca. 0,044 bis 0,196 kg/E-a Altbatterien. Übertragen auf Baden-Württemberg ergibt sich damit jährlich ein theoretisches Mengenpotenzial von ca. 473 bis 2 107 Tonnen.

**Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter Abfallschlüsselnummer 19 01 11 fallen**

In den sechs baden-württembergischen Müllheizkraftwerken (MHKW) wurden 1 739 477 Tonnen Siedlungsabfall [Abfallbilanz 2010] thermisch behandelt. Weitere 189 604 Tonnen [Abfallbilanz 2010] wurden in MHKWs außerhalb Baden-Württembergs (Bayern, Schweiz) entsorgt. Gemischte Siedlungsabfälle (AVV 20 03 01) stellen dabei den überwiegenden Teil des Inputs dar.

Anhand der ITAD Anlagensteckbriefe [ITAD 2014] und eigener Berechnungen wurde das Aufkommen an Schlacken auf ca. 454 000 Tonnen im Jahr 2010 abgeschätzt.

Für die Berechnung der Wertstoffpotenziale der Rohstoffe der roten Kategorie wurde im Wesentlichen auf den Datenbestand der Abfallanalysendatenbank (IPA) zurückgegriffen. Eine Vielzahl weiterer Publikationen zu Rost- und Kesselaschen fokussieren auf andere rückgewinnbare Metalle wie Aluminium, Fe-Metalle, Kupfer etc. und weisen nur wenige Analysen zu den Rohstoffen der roten Kategorie aus. Im Falle der Seltenerdelemente wurde lediglich eine schwedische Quelle aufgefunden. Die von Johansson [2013] durchgeführte Literaturstudie ergab eine Analyse zu den Seltenerdelementen, der Summenwert beträgt 83 mg/kg Rostasche. Eine Hochrechnung auf Baden-Württemberg wurde nicht durchgeführt. Die in der Tabelle 14 dargestellten theoretischen Wertstoffpotenziale wurden anhand der Werte der Abfallanalysendatenbank (IPA) und der Abschätzung des Massenstroms berechnet. Für die Berechnung wurde der ausgewiesene Median der aggregierten Daten herangezogen. Die Anzahl der Datensätze ist dabei sehr unterschiedlich, für Titan liegen z.B. nur acht Datensätze mit einem Minimum von 0,43 mg/kg und einem Maximum von 5 570 mg/kg vor.

**Tabelle 14:**  
 Theoretisches Wertstoffpotenzial für Abfallschlüssel 19 01 12 erfasste Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen [IPA 2013; ITAD 2014; Eigene Berechnungen].

Abfallschlüssel	Gesamtmenge in t	Theoretisches Wertstoffpotenzial in kg	
19 01 12	ca. 454 000	Titan	1 498 200
<b>Bezeichnung</b>		Antimon	23 661
Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen		Kobalt	8 853
		Molybdän	4 086
		Beryllium	420

Die oben dargestellten Ergebnisse stellen nur das theoretische Potenzial (Median) dar und geben keinen Hinweis auf das technisch rückgewinnbare Potenzial. Zumal die Rohstoffe nicht elementar vorliegen sondern u.a. als Oxide, wie z.B. Titandioxid.

Neben den Rohstoffen der roten Kategorie (Top-10) sind weitere Analysendaten zu Rohstoffen des Rankings wie z.B. Silber, Zinn oder Chrom zu finden. Für weitere Details sei auf die Abfallanalysendatenbank (IPA) verwiesen.

Hinsichtlich der Rost- und Kesselaschen ist festzustellen, dass die Datenlage als nicht ausreichend erachtet wird. Zum einen sind nicht alle Top-10-Rohstoffe vertreten und zum anderen sind die Einzelanalysen über einen längeren Zeitraum aggregiert. In den letzten 15 Jahren hat sich die Zusammensetzung der thermisch behandelten Abfallströme jedoch stark verändert. Orientierende Untersuchungen werden ergänzend derzeit an der Universität Stuttgart durchgeführt. Im Hinblick auf eine gesicherte Datenlage wird empfohlen weitere Analysen durchzuführen.

### **Elektro- und Elektronikaltgeräte**

Im Jahr 2010 betrug das Aufkommen an Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) aus der kommunalen Sammlung in Baden-Württemberg 79 672 Tonnen (Tabelle 15). Damit ergibt sich eine Sammelmenge von 7,4 Kilogramm pro Einwohner im Bezugsjahr [StaLa BW 2014a]. Die Darstellung in Tabelle 15 beruht auf den Daten des Statistischen Landesamt Baden-Württembergs für das Aufkommen im Jahr 2010 an EAG in Form von zum Teil zusammengefasster Sammelgruppen. Des Weiteren wurden von der Stiftung Elektro-Altgeräte-Register sowie im Abfallwirtschaftsplan Baden-Württemberg veröffentlichte Angaben zur Zusammensetzung von gemischten Sammelgruppen für eine detaillierte Darstellung nach den Kategorien des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes herangezogen.

**Tabelle 15:**  
 Kommunales Aufkommen an Elektro- und Elektronikaltgeräten in Baden-Württemberg 2010 nach Kategorien [nach StaLa BW 2014a; EAR 2014 und BiPRO 2013].

<b>Kategorie (nach ElektroG §2)</b>		<b>Aufkommen 2010 in Tonnen</b>
1	Haushaltsgroßgeräte	29 667
2	Haushaltskleingeräte	8 788
3	Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik	16 337
4	Geräte der Unterhaltungselektronik	18 856
5	Beleuchtungskörper	411
6	Elektrische und elektronische Werkzeuge	4 731
7	Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte	519
8	Medizinprodukte	194
9	Überwachungs- und Kontrollinstrumente	157
10	Automatische Ausgabegeräte	-
<b>Gesamtaufkommen</b>		<b>79 672</b>



Die in Bezug auf die Ermittlung des Sekundärrohstoffpotenzials in EAG angestellten Recherchen zeigen nachfolgend beschriebenes Bild. Insgesamt wird ein vielfältiges Spektrum an unterschiedlichen Rohstoffen für die Herstellung solcher Geräte verwendet. Hinsichtlich der genauen Zusammensetzung der Geräte sowie auch der Sammelgruppen/Kategorien für EAG erweist sich die Datenlage als bisher unzureichend [Blaser 2012]. Die Ursache darin ist in den unterschiedlich verwendeten Bauteilen in Abhängigkeit des jeweiligen Herstellers und der Gerätegeneration zu sehen. Beispielsweise können je nach Rohstoffpreis Tantal-Kondensatoren in Laptops durch andere Kondensatoren ersetzt werden. Daraus ergeben sich enorme Schwankungen in Bezug auf die Tantal-Konzentrationen in einzelnen Laptop-Generationen [LANUV 2012]. Eine hohe Bedeutung für die im Rahmen dieser Studie für Baden-Württemberg als wirtschaftsrelevant eingestuft Rohstoffe besitzen die Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik sowie die der Unterhaltungselektronik (Kategorie 3 und 4) [LANUV 2012]. Im Wesentlichen befinden sich wirtschaftsrelevante Rohstoffe in den dort verbauten Leiterplatten. Anlage 4 gibt einen Überblick über die zu erwartenden Metallgehalte in allen Leiterplatten verschiedener Elektrogeräten in diesen Kategorien. Diese Übersicht stellt eine umfassende Zusammenfassung von durchschnittlichen Metallkonzentrationen in EAG aus mehreren Studien mit unterschiedlichen Zielsetzungen dar. Sie gibt somit die jeweils dem Fokus der Studien entsprechenden Metallvorkommen als Mittelwert wieder. Die von den Autoren recherchierten Metallgehalte bezogen sich zunächst auf das Gewicht der Leiterplatte (mg Metall/kg Leiterplatte) und wurden zu einem Durchschnittswert zusammengefasst. Aus der Multiplikation dieses Wertes mit dem prozentualen Anteil der Leiterplatten am Gesamtgerätgewicht resultiert die Metallkonzentration in mg/kg Gerät [Blaser 2012].

Anhand der Übersicht in Anlage 4 lässt sich die derzeitige Problematik bezüglich der Rohstoffpotenziale in EAG darlegen. Die dort angegebenen Metallkonzentrationen sind lediglich als grobe Einschätzung zu verstehen. Zum Teil existieren nicht ausreichend Daten zur Bildung eines aussagekräftigen Mittelwerts oder das Baujahr der untersuchten Geräte erweist sich als veraltet. Wie bereits erwähnt, spiegeln sich erhebliche Unterschiede in der Höhe der Metallkonzentrationen in den Leiterplatten einzelner Elektrogeräte wieder. Zum Beispiel variieren die Tantal-Konzentrationen in Leiterplatten von Mobiltelefonen im Bereich von 8 bis 6 500 mg/kg Leiterplatte. Anhand der Kriterien Aktualität der Daten und Anzahl der Datenpunkte zur Mittelwertbildung wurden die Mittelwerte der Metallkonzentrationen in Leiterplatten bewertet. Die jeweilige Farbgebung zeigt das Ergebnis der Bewertung an (vgl. Anlage 4).

Die Grundlage der Potenzialermittlung wirtschaftsrelevanter Rohstoffe in EAG, hier am Beispiel von PC, Digitalkamera, Laptop, Mobiltelefon, DVD-Spieler und Videokamera, (Tabelle 16, ausführlicher Anlage 6) bilden die Anzahl der Haushalte in Baden-Württemberg (2010: 5 041 700), der Ausstattungsgrad der Haushalte mit



elektronischen Geräten 2010, das durchschnittliche Gerätegewicht (Anlage 5) sowie die in Anlage 4 genannten Gehalte an Metallen in Leiterplatten. Damit beschreiben die ermittelten Werte in Tabelle 16 die im Jahr 2010 verfügbaren Mengen an wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in den Elektronikgeräten in baden-württembergischen Haushalten. Demnach handelt es sich somit um die nach 2010 zur möglichen Rückgewinnung bereitstehenden Potenziale. Die farbliche Markierung der Potenzialmassen resultiert aus der oben vorgenommenen Einschätzung der Metallkonzentrationen. Die berechneten Massen verstehen sich daher nur als ungefähre Größenordnung, da wie bereits beschrieben, die Metallkonzentrationen in EAG erheblichen Schwankungen unterliegen. Weiß hinterlegte Werte weisen auf erhebliche Unsicherheiten und grau hinterlegte Massen auf geringere Unsicherheiten hin (vgl. auch Anlage 6). Die dargestellten Metallmassen berücksichtigen, wie bereits erwähnt, nur Konzentrationen in Leiterplatten. Weitere Gerätekomponenten beinhalten aber dennoch bedeutende Metallvorkommen. Von Relevanz sind in Laptops beispielsweise Festplatten oder Akkus. In Smartphones können ebenfalls Akkus sowie auch Lautsprecher Bauteile mit wirtschaftsrelevanten Rohstoffen darstellen [LANUV 2012].

**Tabelle 16:**  
 Theoretisches Potenzial an wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in Leiterplatten der Elektrogeräte PC, Laptop, Digitalkamera, Mobiltelefon, DVD-Spieler und Videokamera in baden-württembergischen Haushalten 2010 [nach Blaser 2012, EMPA 2009, StaLa BW 2014b, StaLa BW 2014c, StaLa BW 2014d].

Element	Potenzial in kg
<b>Antimon</b>	10 409
<b>Beryllium</b>	64
<b>Germanium</b>	68
<b>Kobalt</b>	367
<b>Molybdän</b>	-
<b>Platinmetalle</b>	
Palladium	513
Rhodium	110
Platin	18
Ruthenium	21
<b>Seltenerdelemente</b>	
Cer	226
Dysprosium	18
Gadolinium	18
Lanthan	574
Neodym	1 520
Praseodym	36
Terbium	14
<b>Tantal</b>	5 155
<b>Titan</b>	-
<b>Wolfram</b>	719

Eine Abschätzung bezüglich der Metallgehalte der Gerätekomponenten in Laptops in baden-württembergischen Haushalten im Jahr 2010 befindet sich in Tabelle 17 sowie in ausführlicher Weise in Anlage 6. Die Berechnungen basieren auf der Anzahl der Haushalte in Baden-Württemberg 2010, dem Ausstattungsgrad der Haushalte mit Laptops 2010 sowie auf in Blaser 2012 bereitgestellte Metallgehalte. Unterschieden wird bei der Ermittlung der Potenziale von wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in Laptops mit Liquid Crystal Displays (LCD) die entweder über eine Kaltkathodenröhre (Cold Cathode Fluorescent Lamp, kurz: CCFL) oder Leuchtdioden (Light-Emitting Diode, kurz: LED) als Hintergrundbeleuchtung verfügen. Laptops mit der jeweiligen Hintergrundbeleuchtungs-Technologie unterscheiden sich geringfügig im Hinblick auf die Höhe der Metallgehalte. Näherungsweise wurden die Verkaufszahlen von 2010 (CCFL: 10 Prozent aller verkauften Laptops, LED: 90 Prozent aller verkauften Laptops) für die Abschätzung der Anteile der zwei Beleuchtungsarten am Laptop-Bestand herangezogen [LANUV 2012].

**Tabelle 17:**  
 Theoretisches Potenzial an wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in Laptops in baden-württembergischen Haushalten 2010 [nach StaLa BW 2014c, StaLa BW 2014d, LANUV 2012].

<b>Element</b>	<b>Potenzial Laptop BW 2010 in kg</b>
Kobalt	153 369,00
Neodym	4 955,00
Tantal	4 011,00
Praseodym	637,00
Dysprosium	142,00
Palladium	94,00
Platin	9,00
Yttrium	4,00
Gallium	3,00
Gadolinium	1,60
Cer	0,20
Europium	0,10
Lanthan	0,03
Terbium	0,01

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aufgrund der stark variierenden Metallkonzentrationen von EAG erhebliche Unsicherheiten in der Höhe der Potenziale, welche diese Geräte hinsichtlich wirtschaftsrelevanter Rohstoffe bieten, bestehen. Sie zeigen aber grundsätzlich, dass EAG über bedeutende Metallgehalte verfügen, jedoch ohne Bewertung ob eine Rückgewinnung unter wirtschaftlichen oder technischen Aspekten als möglich erscheint. Im Wesentlichen von Relevanz sind

die Leiterplatten der Geräte, aber auch weitere Gerätekomponenten, wie hier am Beispiel von Laptops aufgezeigt, beinhalten entsprechende Metallvorkommen.

### **Altbatterien und Akkus**

Im Jahr 2010 wurden in Baden-Württemberg 2 038 Tonnen Altbatterien durch das Gemeinsame Rücknahme System (GRS) Batterien gesammelt. Pro Einwohner beträgt die Sammelmenge damit 190 Gramm. Der bundesdeutsche Durchschnitt liegt im Vergleich dazu bei 177 Gramm pro Einwohner. Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein erreichen die höchsten Sammelmengen von mehr als 196 Gramm pro Einwohner. Tabelle 18 beschreibt die vom Altbatterieaufkommen (GRS) in Deutschland abgeleiteten Anteile der einzelnen Batteriesysteme an der gesamten Sammelmenge in Baden-Württemberg. Unter Primärbatterien sind alle nicht wiederaufladbaren Batterien (Akkus) zu verstehen, unter Sekundärbatterien alle wiederaufladbaren [GRS 2011].

**Tabelle 18:**  
 Masse an durch das GRS in Baden-Württemberg zurückgenommener Altbatterien im Jahr 2010 [nach GRS 2011].

	Typengruppe	System	Masse in t
Primärbatterien	Rundzellen	ZnC/Zn-Luft	371
		AlMn	1 284
		Li	16
	Knopfzellen	AgO	12
		AlMn	
		Zn-Luft	
		Li	
Sekundärbatterien	Rundzellen	Li-Ion	39
		NiMH	47
		NiCd	134
		AlMn	-
	Knopfzellen	NiCd	-
		Li-Ion	
		NiMH	
Kleinbatterien		134	
<b>Summe</b>			<b>2 038</b>

Legende: AgO: Silberoxid, AlMn: Alkali-Mangan, Li: Lithium, Li-Ion: Lithium-Ion, NiCd: Nickel-Cadmium, NiMH: Nickel-Metallhydrid, Zn-Luft: Zink-Luft, ZnC: Zink-Kohle

Hinsichtlich der wirtschaftsrelevanten Rohstoffe erweisen sich Lithium-Ion-Alt-Batterien (Li-Ion) sowie Nickel-Metallhydrid-Alt-Batterien (NiMH) als bedeutend. Die beiden Batteriesysteme beinhalten sowohl Kobalt als auch Seltene Erden. Tabelle 19 stellt recherchierte Größenordnungen der Gewichtsanteile von Kobalt und Seltenen Erden an Li-Ion und NiMH Batteriesystemen dar.

**Tabelle 19:**

Gehalt an Kobalt und Seltene Erden in Li-Ion und NiMH Alt-Batterien [nach Lee 2002, Vest 2010].

in Gewichtsprozent	Kobalt	Seltene Erden
Li-Ion	5 – 15	
NiMH	3 – 4	8 – 10

Tabelle 19 und die Massen an zurückgenommenen Alt-Batterien der Batteriesysteme Li-Ion sowie NiMH bilden die Grundlage für die Abschätzung eines theoretischen Potenzial an Kobalt und Seltenen Erden (Tabelle 20).

**Tabelle 20:**

Theoretische Potenziale an den wirtschaftsrelevanten Rohstoffen Kobalt und Seltene Erden in den zurückgenommenen Mengen der Batteriesysteme Li-Ion und NiMH [nach GRS 2011, Lee 2002, Vest 2010].

Potenzial in Tonnen	Kobalt	Seltene Erden
Li-Ion	1,9 – 5,8	
NiMH	1,4 – 1,9	3,8 – 4,7

Wie auch bei den EAG kann bei den in Tabelle 20 dargestellten Potenzialen nur von ungefähren Größenordnungen gesprochen werden. Die gewonnenen Werte berücksichtigen wiederum keine Einschätzung in wieweit die Rückgewinnung unter wirtschaftlichen und technischen Aspekten als möglich erscheint. Weyhe beschreibt diesbezüglich eine Wirtschaftlichkeitsschwelle bei einem Alt-Batterieaufkommen von 5 000 Tonnen pro Jahr für die Rückgewinnung von Seltenen Erden [Weyhe 2010].

### **Leuchtstoffröhren/Gasentladungslampen**

Die Sammlung und das Recycling von Leuchtstofflampen erfolgt in Einklang mit dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz [ElektroG 2005] und der Abfallverzeichnisverordnung (AVV 2001). Die Gasentladungslampen, die in privaten Haushalten genutzt werden können gehören der Gerätekategorie 5 an.

Während sonstige Beleuchtungskörper oder Geräte für die Ausbreitung oder Streuung von Licht, die in privaten Haushalten genutzt werden können zur Gerätekategorie 5 b gehören. Gebrauchte Gasentladungslampen werden in der Sammelgruppe 4 und andere Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper und ähnliche werden in der Sammelgruppe 5 erfasst. Die Leuchtstofflampen werden unter der Abfallschlüsselnummer 20 01 21\* gesammelt. Einzelne Bestandteile der Lampen, wie das abgetrennte Leuchtstoffpulver können auch als »aus gebrauchten elektrischen und elektronischen Geräten entfernter gefährlicher Bestandteil«, zur Schlüsselnummer 16 02 15\* zugeordnet werden.

### ***Seltenerdelemente, Wolfram und andere Metalle***

Zwischen einem und drei Gewichtsprozent Leuchtpulver werden in Leuchtstofflampen verwendet [AGLV 2013]. Das Leuchtpulver setzt sich idealerweise aus einem Wirtsgitter aus Oxiden ( $\text{BaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , etc.), Phosphaten ( $\text{LaPO}_4$ ), Sulfaten oder Silikaten ( $\text{BaSi}_2\text{O}_5$ ) und einer Dotierung mit Aktivatoren zusammen. Defekte und Verunreinigungen sind nicht auszuschließen [Jüstel 2012b; Martens 2011]. Häufig kommen Zinkoxide, Zinksulfide, Zink-Calcium-Sulfid, Zink-Sulfid-Selenid, Willemite und Zinkberylliumsilicat als Wirtsgitter zum Einsatz. Die Dotierung erfolgt über Aktivatoren und Sensibilisatoren aus Seltenerdmetall-, Übergangsmetall- oder s<sub>2</sub>-Ionen [Jüstel 2012b]. Rund zehn Gewichtsprozent des Leuchtstoffpulvers sind Seltenerdoxide [Wojtalewicz-Kasprzak 2007]. Aus rotem, grünem und blauem Licht wird, bei den gängigen Dreibandleuchtstoffen weißes Licht. Blaues Licht wird durch Bariummagnesiumaluminat (BAM), das mit zweiwertigem Europium aktiviert ist, erzeugt. Grünes Licht ist durch terbiumaktiviertes Cermagnesiumaluminat (CAT) erzeugbar. Manchmal wird grünes Licht auch durch Lanthanphosphat, bzw. Cergadoliummagnesiumborat (CBT) erzeugt. Der Rotanteil wird ausschließlich durch Yttriumeuropiumoxid (YOE) erzeugt, d.h. Yttriumoxid welches mit dreiwertigem Europium dotiert ist [Wojtalewicz-Kasprzak 2007].

Die Anteile an Seltenerdelementen, meist als Seltenerdoxide, in Leuchtpulver wurden in unterschiedlichen Studien untersucht. Das von Rabah untersuchte Leuchtpulver aus 5 000 Lampen wies einen Europiumoxidanteil von 1,62 Prozent und einen Yttriumoxidanteil von 1,65 Prozent auf [Rabah 2008]. Innocenzi et al. wiesen mit 4,57 Prozent Yttrium einen höheren Anteil im Leuchtpulver nach [Innocenzi 2013]. In einer Untersuchung von Luidold et al. wurde Leuchtpulver nach einer mechanischen Aufbereitung der Lampen auf seine Bestandteile hin untersucht [Luidold et al. 2012 zitiert in Wu 2014]. Die Anteile an Seltenerdelementen sind in Tabelle 21 dargestellt. Als weiteres kritisches Element wurde Antimon mit einem Anteil von 0,19 Prozent als Bestandteil der Lampen angegeben.

**Tabelle 21:**

Seltenerdelemente im untersuchten Leuchtpulver, verändert nach [Luidold et al. 2012 zitiert in Wu 2014].

Element	Ce	La	Y	Gd	Tb	Eu
<b>Gewichtsprozent</b>	0,30	0,31	2,88	0,09	0,12	0,14

Wolframwendel sind mit Emitttern (W, Ba, Sr, Ca, BaO, SrO, CaO) beschichtet um die Effizienz zu steigern [Jüstel 2012a]. Rabah untersuchte Leuchtstofflampen und fand 0,85 Gramm Wolfram pro Lampe, dies entspricht einem Gehalt von 0,4 Gewichtsprozent bis 0,8 Gewichtsprozent je nach Lampentyp [Rabah 2008].

Weitere kritische Elemente können in den Vorschaltgeräten der Gasentladungslampen verbaut sein, hierbei ist eine genaue Analyse der Bestandteile nicht bekannt. »Das Vorschaltgerät besteht aus einer Leiterplatte mit darauf verlöteten Bauteilen, vergleichbar mit der Elektronik anderer Konsumgüter« [OSRAM 2011/2012].

### **Mengen und Potenziale**

**Tabelle 22:**

Mengen der verkauften und gesammelten Gasentladungslampen

Menge	Gegenstand	Jahr	Quelle
40 207 Tonnen	In Verkehr gebrachte Gasentladungslampen (Kategorie 5a)	2010	[BMU 2010]
11 092 Tonnen	Gesammelte Menge Gasentladungslampen (Kategorie 5a)	2010	[BMU 2010]
411,2 Tonnen	gesammelte Leuchtstoffröhren und Gasentladungslampen	2010	[StaLa BW 2014a]

In Tabelle 22 sind die Verkaufs- und Sammelmengen für Deutschland und Baden-Württemberg für das Jahr 2010 aufgeführt. Eine exakte Sammelquote aus den Verkaufszahlen und Sammelmengen eines Jahres zu berechnen ist unzulässig, da die Leuchtstofflampen eine Lebensdauer von ca. acht Jahren haben. Die grobe Abschätzung zeigt bereits eine geringe Sammelquote unter 50 Prozent, sodass noch weiteres Potenzial vorhanden ist.

Nimmt man die Werte der Arbeitsgemeinschaft Lampen-Verwertung (AGLV), liegen die Anteile des Leuchtpulvers in den Lampen zwischen einem und drei Gewichtsprozent. Demzufolge lässt sich für Baden-Württemberg eine Menge von 4,1 Tonnen bis 12,4 Tonnen gesammeltes Leuchtpulver für das Jahr 2010 berechnen [AGLV 2013]. Nach Wojtalewicz-Kasprzak sind rund 10 Gewichtsprozent des Leuchtstoffpulvers Seltenerdoxide, sodass in Baden-Württemberg im Jahr 2010 zwischen 0,4 Tonnen bis 1,2 Tonnen gesammeltes Seltenerd-Oxidgemisch angefallen ist [Wojtalewicz-Kasprzak 2007].

Mit den Literaturwerten von Rabah, Innocenzi et al. und Luidold et al. können hieraus Anteile an spezifischen Elementen berechnet werden. In Tabelle 23 ist dargestellt welche Mengen an kritischen Elementen in Baden-Württemberg im Jahr 2010 durch entsorgte Leuchtstofflampen gesammelt worden sind.

**Tabelle 23:**  
 Wertstoffpotenzial  
 in Leuchtstoffröhren  
 ohne Leiterplatte  
 des Vorschaltgerätes  
 in Baden-  
 Württemberg  
 (2010).

Wirtschafts- relevante Roh- stoffe	Bauteil / Bestandteil	Wertstoffpotenzial in BW 2010 in kg		
		[Rabah 2008]	[Innocenzi 2013]	[Luidold et al. 2012] zitiert in [Wu 2014]
<b>Seltenerd- elemente</b>				
Lanthan (La)	Leuchtpulver und Elektroden / Lampenwendel			12,7 – 38,4
Yttrium (Y)	Leuchtpulver	67,7 – 204,6 <sup>(1)</sup>	187,4 – 566,7	118,1 – 357,1
Cer (Ce)		-	-	12,3 – 37,2
Europium (Eu)		66,4 – 200,8 <sup>(1)</sup>	-	5,7 – 17,4
Gadolinium (Gd)		-	-	3,7 – 11,2
Terbium (Tb)		-	-	4,9 – 14,8
<b>Weitere Elemente</b>				
Beryllium (Be)		-	-	-
Wolfram (W)	Elektroden / Lampenwendel	1 600 – 3 300	-	-

<sup>(1)</sup> Menge als Seltenerdoxid

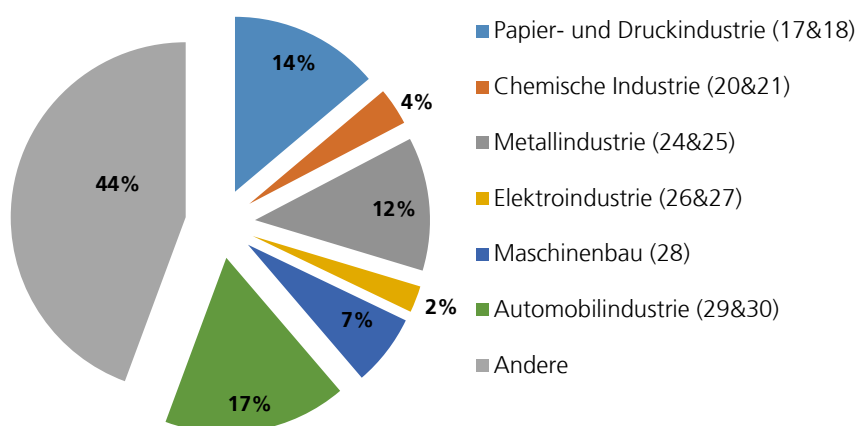
### 6.1.2 Potenziale in gewerblichen Abfallströmen

Als Grundlage für die Potenzialermittlung wirtschaftsrelevanter Rohstoffe in gewerblichen Abfällen diente die im Turnus von vier Jahren durch das Statistische Landesamt durchgeführte »Erhebung zum Abfallaufkommen in Industrie und Gewerbe in Baden-Württemberg« [StaLa BW 2012b]. Den Erhebungsergebnissen zu Folge lag das Abfallaufkommen in Industrie und Gewerbe in Baden-Württemberg im Jahr 2010 für die befragten Betriebe bei knapp 7,3 Mio Tonnen. Im Vergleich zum Jahr 2006, bedeutet dies einen Rückgang um 6,6 Prozent. Als mögliche Gründe für die leichte Abnahme werden von Seiten des Statistischen Landesamtes, neben konjunkturellen Einflüssen, insbesondere die Einführung ressourcenschonender und nachhaltiger Produktionsmethoden genannt. So wurden nach Auskunft einiger Betriebe seit dem Jahr 2006 gezielt Maßnahmen zur Abfallreduktion sowie zur Effizienzsteigerung in der Produktion ergriffen. Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die Rückführung von Abfällen in den Produktionskreislauf, was vor allem für Holz- und Metallabfälle in erheblichem Umfang zutrifft. Eine weitere Ursache für den vermeintlichen Rückgang der Abfallmengen resultiert aus der Abgabe an Entsorger außerhalb des Landes. Dadurch ergibt sich auch die im Rahmen der Erhebung nachgewiesene Diskrepanz zwischen in Baden-Württemberg erzeugter und entsorgter Abfallmenge. So meldete die Entsorgungswirtschaft im Land für das Jahr 2010 eine überlassene Abfallmenge von lediglich vier Mio Tonnen gewerblicher Abfälle [StaLa BW 2012b]. Folglich ergibt sich durch die direkte Verwertung von Abfällen sowie Exporte an Entsorger außerhalb Baden-Württembergs eine Differenz von rund 3,3 Mio Tonnen. Da zu diesen Stoffflüssen keine detaillierten Informationen vorliegen, wurde für die weitere Betrachtung auf das Gesamtabfallaufkommen in Höhe von 7,3 Mio Tonnen Bezug genommen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass ein gewisser Anteil der ermittelten Wertstoffpotenziale durch Abfallexporte verloren geht.

Nachstehende Abbildung zeigt die Anteile verschiedener Wirtschaftszweige an der von den Betrieben für das Jahr 2010 insgesamt gemeldeten Abfallmenge in Höhe von 7,3 Mio Tonnen. Die sechs Leitindustrien stehen dabei im Fokus und werden differenziert dargestellt. Die Kategorie »Andere« umfasst den summierten Anteil aller übrigen Wirtschaftsbereiche nach WZ 2008, mit Ausnahme des separat erfassten Baugewerbes und der Leitindustrien.



**Abbildung 25:**  
In Baden-  
Württemberg  
erzeugte Abfall-  
menge in Industrie  
und Gewerbe 2010  
(insgesamt 7,4 Mio  
Tonnen) [StaLa BW  
2013b].



Von der für 2010 insgesamt gemeldeten Abfallmenge fielen mit rund 5,2 Mio Tonnen 86 Prozent im Verarbeitenden Gewerbe an [StaLa BW 2013b]. Erwähnenswert ist, dass die gesamte Abfallmenge zwar rückläufig war, dies jedoch gerade nicht für das Verarbeitende Gewerbe zutrifft. Ganz im Gegenteil stieg die erzeugte Abfallmenge dort seit 2006 um rund 3,5 Prozent. Dies lässt sich nach Einschätzungen des Statistischen Landesamtes unter anderem auf die sehr positive Konjunktur in der Automobilindustrie und dem damit verbundenen Anstieg erzeugter Abfälle zurückführen [StaLa BW 2012b].

Mit mehr als vier Mio Tonnen trugen die sechs Leitindustrien zusammen mit 56 Prozent zur Gesamtabfallmenge bei. In der Kategorie »Andere« fiel der Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren eine besondere Bedeutung zu. Mit einem Aufkommen von gut 1,3 Mio Tonnen wies diese Branche eine sehr hohe Abfallintensität auf und erzeugte damit allein ein Drittel der Abfälle der Kategorie »Andere«.

Grundsätzlich muss bei der Betrachtung der dargestellten Abfallmengen berücksichtigt werden, dass die Erhebung der Daten auf einer Befragungssystematik beruht, die je nach Struktur der untersuchten Branche (vorwiegend Großunternehmen / Aktiengesellschaften oder Unternehmen mit eher klein- und mittelständischer Prägung) zu variierenden Repräsentationsgraden führt. Der Repräsentationsgrad der Gesamtheit aller Unternehmen und Betriebe errechnet sich aus dem Anteil der Beschäftigten der befragten Betriebe an der gesamten Beschäftigtenzahl der jeweiligen Wirtschaftsbereiche [StaLa BW 2012b].

Nachfolgende Tabelle verdeutlicht die unterschiedlichen Repräsentationsgrade der im Rahmen der Studie betrachteten Leitindustrien.

**Tabelle 24:**  
 Repräsentationsgrad der Branchen bei der Erhebung der Abfallerzeugung anhand der Zahl der Gesamtbeschäftigten nach [StaLa BW 2012b].

<b>Wirtschaftsbereich</b>	<b>Einbezogene Betriebe ab ... Beschäftigte</b>	<b>Beschäftigte in den befragten Betrieben</b>	<b>Anteil der befragten Beschäftigten</b>
	<b>Anzahl</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Prozent <sup>1)</sup></b>
Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus sowie Druck- erzeugnissen; Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild- und Datenträgern	50	39 932	67
Herstellung von chemischen und pharmazeutischen Erzeugnissen	50	53 828	91
Metallerzeugung und -bearbei- tung, Herstellung von Metall- erzeugnissen	100	99 032	50
Herstellung von Datenverar- beitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen, elektrischen Ausrüstungen	100	128 236	77
Maschinenbau	100	237 345	81
Fahrzeugbau	50	200 483	96

<sup>1)</sup>Anteil an allen Beschäftigten eines Wirtschaftsbereichs

Betrachtet man den in den einzelnen Branchen jeweils erzielten Repräsentationsgrad, so zeigt sich, dass die Ergebnisse zu den ermittelten Abfallmengen stellenweise nur über eine begrenzte Aussagekraft verfügen. So war der Repräsentationsgrad in der Automobilindustrie mit 96 Prozent beispielweise besonders hoch, wohingegen in der Metallbranche ein Wert von lediglich 50 Prozent erreicht wurde. Dies bedeutet, dass für Betriebe, die die Hälfte aller Mitarbeiter der Metallbranche in Baden-Württemberg beschäftigen, keine Angaben zum Abfallaufkommen vorliegen. Zieht man den für alle sechs Leitindustrien durchschnittlich erreichten Repräsentationsgrad von 77 Prozent heran, so ist davon auszugehen, dass das tatsächliche Abfallaufkommen im Land, die in der Statistik erhobenen Mengen deutlich übersteigt. Folglich stellen die nachfolgend ermittelten Wertstoffpotenziale auch Mindestwerte dar.

Zur Vorbereitung der Potenzialermittlung wurden in einem nächsten Schritt die in den sechs Leitindustrien erzeugten Abfallmengen detaillierter betrachtet. Hierfür wurde als Datenbasis die Statistik zu »Abfallmengen nach Abfallarten (EAV 6-Steller) und Wirtschaftszweigen« für das Berichtsjahr 2010 [StaLa BW 2013b] herangezogen. In nachfolgender Tabelle sind die für die Auswertung relevante Anzahl der Datensätze und die in den jeweiligen Branchen erhobenen Abfallmengen aufgeführt.

**Tabelle 25:**  
 Ergebnisse der Erhebung zur Abfallerzeugung 2010 für die sechs Leitindustrien [StaLa BW 2013b].

<b>Branche (WZ)</b>	<b>Anzahl der Datensätze</b>	<b>Abfallaufkommen in Tonnen</b>
Papier- und Druckindustrie (17 & 18)	611	1 004 771
Chemische Industrie (20 & 21)	1 039	250 856
Metallindustrie (24 & 25)	1 550	894 526
Elektroindustrie (26 & 27)	1 311	177 859
Maschinenbau (28)	1 848	480 427
<b>Automobilindustrie (29 &amp; 30)</b>	<b>672</b>	<b>1 226 822</b>
<b>Gesamt</b>	<b>7 031</b>	<b>4 035 261</b>

Die Auswertung der Statistik ergab, dass für die sechs Leitindustrien für das Berichtsjahr 2010 insgesamt mehr als 7 000 Datensätze zum Abfallaufkommen erfasst wurden. Ein Datensatz beinhaltet – sortiert nach Wirtschaftszweigen – dabei jeweils sowohl die Menge einer angefallenen Abfallart als auch die entsprechende Klassifizierung nach dem 6-stelligen Abfallschlüssel des Europäischen Abfallartenverzeichnisses (EAV). Demnach wiesen die für die Automobilindustrie angeführten 672 Datensätze eine Abfallmenge von etwas mehr als 1,2 Mio Tonnen aus. Eine ebenfalls hohe Abfallmenge besaßen mit ca. einer Mio Tonnen (611 Datensätze) bzw. 0,9 Mio Tonnen (1 550 Datensätze) die Papier- und Druckindustrie sowie die Metallindustrie. In der Elektroindustrie wurde mit weniger als 0,2 Mio Tonnen hingegen die geringste Abfallmenge erzeugt.

Nachfolgend soll nun am Beispiel einer in der Automobilindustrie anfallenden Abfallart die Systematik der Potenzialermittlung erläutert werden. Grundsätzlich sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei den ausgewiesenen Werten zunächst um theoretische Potenziale – also lediglich um den auf Erfassungs- und Analysedaten beruhenden Gehalt an wertgebenden Bestandteilen – im Abfallstrom handelt.

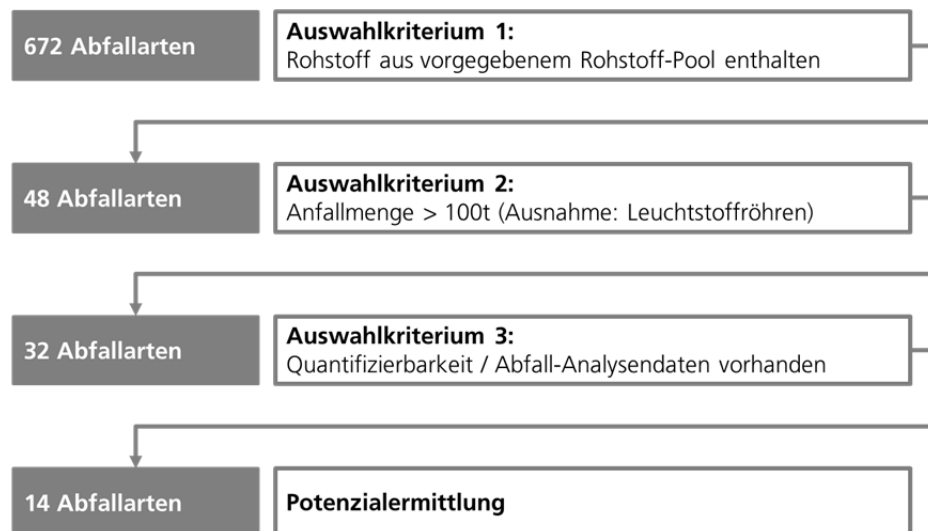
Um theoretische Wertstoffpotenziale auf Basis der Erhebung zur Abfallerzeugung 2010 [StaLa BW 2013b] berechnen zu können, wurden zunächst die für die

Automobilindustrie vorliegenden 672 Datensätze untersucht. Zur Realisierung der Potenzialermittlung wurde daraufhin eine Vorauswahl der weiter zu untersuchenden Datensätze unternommen. Als maßgebendes Auswahlkriterium galt dabei, inwiefern in den erhobenen Abfallarten die als versorgungskritisch eingestuft Elemente enthalten sind. Im Rahmen dieser Vorauswahl konnten 48 Abfallarten identifiziert und für die weitere Betrachtung ausgewählt werden.

Im nächsten Schritt erfolgte eine weitere Selektierung der 48 Abfallarten in Abhängigkeit der erzeugten Abfallmenge. Dabei wiesen 16 Abfallströme eine Gesamtmenge von deutlich weniger als 100 Tonnen auf und wurden aus diesem Grund nicht weiter berücksichtigt. Eine Ausnahme bildet dabei die Abfallart »Leuchtstoffröhren und andere quecksilberhaltige Abfälle«, die aufgrund der enthaltenen Wertstoffdichte eine nähere Betrachtung, trotz einer Aufkommensmenge von nur 46 Tonnen, rechtfertigt.

In einem nächsten Schritt wurden die verbliebenen 32 Abfallströme hinsichtlich ihrer »Quantifizierbarkeit« untersucht. Die Auswertung ergab, dass für neun der 32 Abfallarten aufgrund ihrer unspezifischen Bezeichnung keine Aussagen zur durchschnittlichen Materialzusammensetzung getroffen werden konnten. Hier wären beispielsweise nicht quantifizierbare Mengenanteile verschiedener Metalle innerhalb der Abfallart mit den Bezeichnungen »NE-Metalle« oder »Schweißabfälle« zu nennen. Von den 23 als quantifizierbar eingestuften Abfallarten wurden dann weitere neun aussortiert, da eine Literaturrecherche keine Ergebnisse hinsichtlich durchschnittlicher Materialzusammensetzungen dieser Abfallarten ergab. Die beschriebene Systematik ist in nachfolgender Graphik noch einmal schematisch dargestellt.

**Abbildung 26:**  
Systematik zur Auswahl relevanter Datensätze / Abfallarten für die Wertstoffpotenzialermittlung am Beispiel der Automobilindustrie.



Als einer der verbleibenden 14 Abfallarten der Automobilindustrie wurden produktionsspezifische Gewerbeabfälle untersucht, die unter Abfallschlüssel 11 01 09\* »Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten«, erfasst werden. Für nähere Informationen zu Herkunft, charakteristischer Zusammensetzung oder Sammlung und Entsorgung dieser Abfallart wird auf die Abfallsteckbriefe des Informations-Portals-Abfallbewertung ([www.abfallbewertung.org](http://www.abfallbewertung.org)) verwiesen. Dieses Portal (IPA) ist ein bundesweites Projekt, an dem sich Fachbehörden mehrerer Bundesländer sowie des Bundes beteiligen. Dabei enthält die Abfallanalysendatenbank ABANDA detaillierte Informationen zu Analysen von über 40 000 Abfallproben [IPA 2013]. Die zuvor genannte Abfallart 11 01 09\* wird an dieser Stelle exemplarisch für die Erläuterung des Potenzialermittlungsprozesses herangezogen, da für diese nach [IPA 2013] Analysedaten für insgesamt 19 Rohstoffe des Rohstoffpools vorlagen und somit die Vorgehensweise bei der Potenzialermittlung gut veranschaulicht werden kann.

Die Anzahl der für einzelne Elemente jeweils vorhandenen Probe- und Analysedaten variierte dabei zwischen 1 (z.B. Gold, Palladium, Platin) sowie 429 (Kupfer). Aus Gründen der Repräsentativität wurden nur Analysenwerte bei der Potenzialermittlung berücksichtigt, bei denen die Anzahl der durchgeführten Analysen bei  $n > 10$  lag. Für die Berechnung wurden jeweils die in der Datenbank angegebenen Mittelwerte herangezogen (Verfahren: OS/Feststoff). Das theoretische Wertstoffpotenzial wurde anschließend anhand des prozentualen Gewichtsanteils eines Rohstoffes an der in der Abfallart insgesamt erzeugten Menge von knapp 2 190 Tonnen ermittelt. Tabelle 26 zeigt für Abfallart 11 01 09\* die Ergebnisse der Berechnung für alle 19 Rohstoffe. Elemente, die der roten Gruppe mit besonders hoher Bedeutung für Baden-Württemberg zuzuordnen sind, wurden jeweils hervorgehoben. Die höchsten Wertstoffpotenziale ergaben sich hierbei für Kupfer mit einem Mengenanteil von gut 38 Tonnen bzw. für Chrom mit knapp 26 Tonnen. Die Elemente Beryllium, Selen oder Strontium sind im Hinblick auf die in der Abfallart erzeugte Gesamtmenge hingegen nur in Kleinstmengen enthalten. Da im Abfallstrom acht Rohstoffe der roten Gruppe zu finden sind, ist dieser als besonders bedeutsam einzuschätzen. Insbesondere im Hinblick auf branchenübergreifende Betrachtungen könnte sich die in der Abfallart erzeugte Gesamtmenge – und somit das Wertstoffpotenzial kritischer Rohstoffe – möglicherweise signifikant erhöhen.

**Tabelle 26:**  
 Theoretisches Wertstoffpotenzial für die in der Automobilindustrie anfallende Abfallart 110109\*: Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten [IPA 2013; StaLa BW 2013b; Eigene Berechnungen].

Abfallschlüssel	Gesamtmenge in Tonnen	Theoretisches Wertstoffpotenzial in kg/a	
11 01 09*	2 187,7	<b>Antimon</b>	<b>476</b>
<b>Bezeichnung</b>		<b>Beryllium</b>	<b>1,8</b>
Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten		Chrom	25 995
		Gold	_ <sup>1)</sup>
		<b>Kobalt</b>	<b>138</b>
		Kupfer	38 485
		Lithium	_ <sup>1)</sup>
		Magnesium	3 075
		Mangan	1 357
		<b>Molybdän</b>	<b>174</b>
		<b>Palladium</b>	_ <sup>1)</sup>
		<b>Platin</b>	_ <sup>1)</sup>
		Selen	68
		Silber	1 084
		Strontium	85
		Tellur	_ <sup>1)</sup>
		<b>Titan</b>	_ <sup>1)</sup>
		<b>Wolfram</b>	_ <sup>1)</sup>
		Zinn	18 675

<sup>1)</sup> für diese Elemente betrug die Analysenanzahl  $n < 10$ ; diese Elemente sind im Abfallstrom enthalten, bleiben aber aufgrund mangelnder Repräsentativität bei der Potenzialberechnung unberücksichtigt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Vorgehensweise der Potenzialermittlung hier nur exemplarisch für einen Abfallstrom aus einer Branche dargestellt. Der gleichen Systematik folgend wurden jedoch sämtliche relevante Abfallarten für alle anderen Leitindustrien in gleicher Weise untersucht. Die sich aus dieser Analyse ergebenden Gesamtpotenziale aus den einzelnen Wirtschaftszweigen (WZ) sind in nachfolgender Tabelle 27 zusammengefasst. Die Top-10-Rohstoffe sind farblich hervorgehoben.

**Tabelle 27:**  
 Abschätzung  
 theoretischer  
 Gesamtpotenziale für  
 Rohstoffe des Roh-  
 stoff-Pools aus  
 gewerblichen  
 Abfällen, dargestellt  
 nach Wirtschafts-  
 zweigen in kg/a.

Rohstoff	Druck- industrie	Chem. Industrie	Metall- industrie	Elektro- industrie	Maschinen bau	Auto- mobil- industrie
<b>WZ</b>	17, 18	20, 21	24, 25	26, 27	28	29, 30
<b>Antimon</b>	<b>2 223</b>	<b>2 709</b>	<b>3 113</b>	<b>642</b>	<b>1 177</b>	<b>1 088</b>
<b>Beryllium</b>	<b>2 126</b>	<b>21</b>	<b>2 168</b>	<b>2</b>	<b>36</b>	<b>47</b>
Chrom	5 298	9 342	292 212	38 021	378 376	137 183
<b>Kobalt</b>	<b>782</b>	<b>48 583</b>	<b>173 167</b>	<b>645</b>	<b>307 765</b>	<b>98 578</b>
Fluorit	316	27 138	433 785	192	76 862	121 313
Gallium	81	- <sup>1)</sup>	81	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
Kupfer	34 389	40 848	711 555	140 476	984 985	359 341
Lithium	107	211	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	10	69
Magnesium	389 243	125 797	125 029	12 874	60 326	32 655
Mangan	43 446	18 604	91 153	1 918	47 622	20 124
<b>Molybdän</b>	<b>671</b>	<b>35</b>	<b>2 405</b>	<b>236</b>	<b>325</b>	<b>385</b>
Niob	- <sup>1)</sup>	8	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	1	9
Selen	388	311	544	91	327	103
<b>SEM</b>	<b>-<sup>1)</sup></b>	<b>583</b>	<b>-<sup>1)</sup></b>	<b>-<sup>1)</sup></b>	<b>92</b>	<b>638</b>
Silber	151	171	6 550	1 462	5 503	7 754
Strontium	12 333	1 816	1 778	115	120	517
<b>Titan</b>	<b>13 348</b>	<b>23 032</b>	<b>9 626</b>	<b>-<sup>1)</sup></b>	<b>5 087</b>	<b>-<sup>1)</sup></b>
<b>Wolfram</b>	<b>-</b>	<b>4</b>	<b>-<sup>1)</sup></b>	<b>-<sup>1)</sup></b>	<b>1</b>	<b>4</b>
Zinn	4 060	5 050	45 353	25 161	20 154	18 801

<sup>1)</sup> keine ausreichenden Daten für eine Potenzialabschätzung vorhanden

Bei der Auswertung der Daten wurde deutlich, dass nur für 19 der insgesamt 29 im Rahmen der Studie betrachteten Rohstoffe eine Potenzialabschätzung durchgeführt werden kann. Ursächlich hierfür ist die Tatsache, dass für einige Abfallarten keine oder nur unrepräsentative Analysenwerte (Analysenanzahl  $n < 10$ ) vorliegen. Dies kann dadurch begründet werden, dass bei der Durchführung von Abfallanalysen das Augenmerk vorwiegend auf die Identifikation von Schadstoffen gerichtet ist. Eine Analyse im Hinblick auf potenziell vorhandene Wertstoffe erfolgt meist nur in wenigen Einzelfällen. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass die in den Abfallströmen enthaltenen Wertstoffpotenziale deutlich über den hier ausgewiesenen Werten liegen könnten, die relevanten Elemente im Rahmen der Abfallanalysen bisher aber nicht untersucht werden. So konnten aufgrund nicht oder nur in geringem Umfang

vorliegenden Analysenwerten für die Rohstoffe Baryt, Bismut, Germanium, Gold, Graphit, Indium, Platinmetalle, Rhenium, Tantal und Tellur keine Potenzialabschätzungen getroffen werden. Dies ist insofern ungünstig, als dass es sich bei Germanium, den Platinmetallen und Tantal um besonders im Fokus stehende Top-10-Rohstoffe handelt.

### **Auswahl besonders wertstoffhaltiger Abfallströme**

Bei der Abschätzung der Wertstoffpotenziale konnten einige besonders werthaltige Abfallströme identifiziert werden. Dabei erfolgte eine Unterscheidung zwischen Potenzialen, die bei der Bewertung alle Rohstoffe des Rohstoff-Pools berücksichtigten und Potenzialen, die sich ausschließlich auf die Betrachtungsebene der Top-10-Rohstoffe beschränkten. Nachfolgend sind die jeweils zehn werthaltigsten Abfallströme tabellarisch zusammengestellt (Tabelle 28 und Tabelle 29):

**Tabelle 28:**

Darstellung der zehn werthaltigsten Abfallströme unter Berücksichtigung aller im Rohstoff-Pool enthaltenen Rohstoffe [Eigene Berechnungen].

<b>Abfall-schlüssel</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Gesamtwertstoffpotenzial in t<sup>1)</sup></b>
12 01 18*	ölbaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	3 070
11 01 09*	Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	670
10 02 07*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	485
15 02 02*	Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich Ölfilter a. n.g.), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	313
10 01 01	Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub mit Ausnahme von Kesselstaub, der unter 10 01 04 fällt	248
11 01 05*	saure Beizlösungen	209
19 01 13*	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	180
19 01 12	Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen	140
17 05 03*	Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten	113
16 08 02*	gebrauchte Katalysatoren, die gefährliche Übergangsmetalle(3) oder deren Verbindungen enthalten	76

<sup>1)</sup> Ohne Fluorid und Barium, für die auf Basis der Analysen eine Umrechnung auf Elementebene nicht möglich war



**Tabelle 29:**  
 Darstellung der zehn werthaltigsten Abfallströme unter Berücksichtigung der Top-10-Rohstoffe [Eigene Berechnungen].

Abfall-schlüssel	Bezeichnung	Gesamtwertstoff-potenzial in t
12 01 18*	ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	570
19 01 11*	Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten	186
19 01 13*	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	36
19 08 13*	Schlämme, die gefährliche Stoffe aus einer anderen Behandlung von industriellem Abwasser enthalten	35
16 08 02*	gebrauchte Katalysatoren, die gefährliche Übergangsmetalle(3) oder deren Verbindungen enthalten	20
17 05 03*	Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten	19
10 02 07*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	5
10 01 02	Filterstäube aus Kohlefeuerung	5
11 01 09*	Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	5
17 05 04	Boden und Steine mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 05 03 fallen	2

Bei der Betrachtung der werthaltigsten Stoffströme wird deutlich, dass insbesondere Schlämme, Schlacken, Aschen und Stäube aussichtsreiche Wertstoffpotenziale enthalten. Dies gilt sowohl in Bezug auf die BW-spezifischen Top-10-Rohstoffe als auch hinsichtlich sämtlicher im Rohstoff-Pool enthaltenen und als potenziell versorgungskritisch eingeschätzten Rohstoffe. Insofern erscheint eine Wertstoffrückgewinnung aus diesen Stoffströmen als besonders vielversprechend. Welche Elemente im Einzelnen enthalten sind, veranschaulicht Tabelle 30, in der die Potenziale für die als besonders relevant einzustufende Abfallart 12 01 18\* »ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)« dargestellt sind.

**Tabelle 30:**  
 Abschätzung des  
 theoretischen  
 Wertstoffpotenzials  
 für Abfallschlüssel  
 120118\* ölhaltige  
 Metallschlämme  
 (Schleif-, Hon- und  
 Läppschlämme)  
 [Eigene  
 Berechnungen].

Abfallschlüssel	Gesamtmenge in Tonnen (aus allen WZ)	Theoretisches Wertstoffpotenzial in kg/a <sup>1)</sup>	
12 01 18*	11 643	<b>Antimon</b>	- <sup>2)</sup>
<b>Bezeichnung</b>		Barium	- <sup>2)</sup>
ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)		<b>Beryllium</b>	- <sup>2)</sup>
		Chrom	643 541
		<b>Kobalt</b>	<b>570 449</b>
		Fluor	- <sup>2)</sup>
		Kupfer	1 739 306
		Magnesium	40 571
		Mangan	75 649
		<b>Molybdän</b>	- <sup>2)</sup>
		Selen	- <sup>2)</sup>
		<b>Seltene Erden</b>	- <sup>2)</sup>
		<b>Tantal</b>	- <sup>2)</sup>
		Tellur	- <sup>2)</sup>
		<b>Titan</b>	- <sup>2)</sup>
		Zinn	- <sup>2)</sup>

- <sup>1)</sup> Ohne Fluorid für das auf Basis der Analysen eine Umrechnung auf Elementebene nicht möglich war  
<sup>2)</sup> Diese Elemente sind ebenfalls im Abfallstrom enthalten, wurden jedoch aufgrund mangelnder Repräsentativität (Analysenanzahl n<10) nicht bei der Potenzialermittlung berücksichtigt.

Die Auswertung verdeutlicht einmal mehr die bereits beschriebene Problematik der mangelnden Analysedaten für relevante Rohstoffe. So sind im betrachteten Abfallstrom sieben der zehn Top-10-Rohstoffe nachweisbar, eine Potenzialabschätzung ist aufgrund lückenhafter Analyseergebnisse jedoch nur für einen dieser Rohstoffe (Kobalt) möglich. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass das tatsächliche Potenzial noch deutlich über den für den Stoffstrom ausgewiesenen Werten liegen dürfte. Auch die Tatsache, dass für weitere im Rohstoff-Pool enthaltene Elemente wie beispielsweise Germanium, Gallium, Lithium, Platinmetalle oder Wolfram keine Werte bestimmt werden können, bedeutet nicht zwingend, dass diese Elemente nicht im Abfallstrom enthalten sind. Es bedeutet lediglich, dass diese bei den bisherigen Abfallanalysen nicht als Analyseparameter untersucht wurden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass in gewerblichen Abfällen erhebliche Mengen wertvoller Rohstoffe enthalten sind. Bei den in diesem Kapitel ausgewiesenen Potenzialen handelt es sich zunächst um theoretische Potenziale, die auf Erhebungsdaten zu gewerblichen Abfällen und Analysen der Abfalldaten-

bank ABANDA basieren. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Wertstoffgehalte der gewerblichen Abfälle die angegebenen Werte übersteigen.

### 6.1.3 Bewertung der ermittelten Sekundärpotenziale

Um die in den vorigen Kapiteln ausgewiesenen Sekundärpotenziale besser beurteilen zu können, soll abschließend überprüft werden, in welchem Umfang hieraus eine Substitution von Primärressourcen möglich wäre. Hierbei handelt es sich um eine rein quantitative, auf theoretischer Ebene verbleibende Betrachtung. Technologische Aspekte, wie die Verfügbarkeit adäquater Recyclingtechnologien oder die Rückgewinnbarkeit einzelner Rohstoffe aus verschiedenen Abfallströmen werden separat im nachfolgenden Kapitel 6.2 ausführlich dargestellt. Für die Bewertung wurden die ermittelten Potenziale aus gewerblichen und kommunalen Abfallströmen den Importmengen der jeweiligen Rohstoffe gegenübergestellt. Wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben ist dabei auf Basis der Daten der Außenhandelsstatistik eine genaue Quantifizierung der Importe auf Elementebene leider nicht möglich. Dies hat folgende Ursachen:

- **Bestehende Datenlücken**  
Daten zu Importmengen sind nicht verfügbar, oder aus Geheimhaltungsgründen gesperrt.
- **Rohstoffspezifische Datenfilterung**  
Es können nur Warengruppen ausgewertet werden, die den Namen des Rohstoffes auch in der Warenbezeichnung enthalten; Halb- oder Fertigwaren, in denen der Rohstoff enthalten ist, dieser aber namentlich nicht in der Warenbezeichnung erscheint, bleiben unberücksichtigt.
- **Unbekannte stoffliche Zusammensetzung von Warengruppen**  
Aus den teilweise unspezifischen Bezeichnungen der Warengruppen kann nur in sehr wenigen Fällen auf den tatsächlichen Anteil des relevanten Rohstoffes in der Warengruppe geschlossen werden.

Um dies zu veranschaulichen, werden in nachfolgender Tabelle 31 die im Rahmen der Studie betrachteten Warenimporte für den Rohstoff Antimon exemplarisch dargestellt. Wie auch bei nahezu allen anderen Rohstoffen wird hier die Problematik der mangelnden Datenlage sowie der unbekannteren stofflichen Zusammensetzung der Warengruppen deutlich. Darüber hinaus werden, bedingt durch die Systematik der außenhandelsspezifischen Datenfilterung, Waren, in denen beispielsweise Antimon als Flammschutzmittel eingesetzt wird, nicht ausgewiesen und können somit nicht mit betrachtet werden.

**Tabelle 31:**  
Außenhandel Baden-  
Württembergs 2010  
nach ausgewählten  
Warennummern,  
Beispiel Antimon  
[StaLa BW 2013a].

Rohstoff	Warennummer (WA 8)		Importmenge nach BW in kg
<b>Antimon</b>	26 17 10 00	Antimonerze und ihre Konzentrate	- <sup>1)</sup>
	28 25 80 00	Antimonoxide	1 434 602
	28 30 90 11	Sulfide des Calciums, des Antimons oder des Eisens	110
	78 01 91 00	Blei in Rohform, Antimon als gewichtsmäßig vorherrschendes anderes Element enthaltend (ausg. raffiniertes Blei)	20 000
	<b>81 10 10 00</b>	<b>Antimon in Rohform; Pulver aus Antimon</b>	<b>512</b>
	81 10 90 00	Waren aus Antimon, anderweit weder genannt noch inbegriffen	158

<sup>1)</sup> nicht bekannt

Am Beispiel Antimon wird deutlich, dass lediglich bei Warengruppe 81 10 10 00 »Antimon in Rohform; Pulver aus Antimon« (in der Tabelle rot markiert) die Importmenge direkt auf den Rohstoff an sich bezogen werden kann. Für alle anderen Warengruppen kann der Antimonanteil in der Warengruppe nicht zuverlässig geschätzt oder quantifiziert werden. Da sich die Situation für alle anderen Rohstoffe ähnlich darstellt, werden nachfolgend die gewerblichen und kommunalen Sekundärpotenziale nur diesen Rohwarenimporten gegenübergestellt. Jedoch kann auch diese Vorgehensweise aufgrund bestehender Datenlücken nicht für alle Rohstoffe vollzogen werden, wie nachfolgende Tabelle 31 verdeutlicht.

**Tabelle 32:**  
 Gegenüberstellung  
 von Antimon  
 Importmengen (in  
 Rohform) und  
 theoretischen  
 Potenzialen in  
 gewerblichen und  
 kommunalen  
 Abfallströmen.

Rohstoff	Importmenge in Rohform [t]	Theoretische Potenziale gewerblich [t]
<b>Antimon</b>	<b>0,5</b>	<b>10,9</b>
<b>Beryllium</b>	- <sup>1)</sup>	4,3
<b>Kobalt</b>	<b>391</b>	<b>626,2</b>
<b>Germanium</b>	0,007	- <sup>2)</sup>
<b>Molybdän</b>	<b>1,3</b>	<b>4</b>
<b>Platinmetalle</b>	4,8	- <sup>2)</sup>
<b>Seltenerdelemente</b>	23,6	1,2
<b>Tantal</b>	0,007	- <sup>2)</sup>
<b>Titan</b>	71	51
<b>Wolfram</b>	168	- <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Keine Daten zu Importmengen verfügbar

<sup>2)</sup> Aufgrund unzureichender Abfallanalysedaten nicht ermittelbar

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass für die Rohstoffe Antimon, Kobalt und Molybdän die in den gewerblichen Abfallströmen enthaltenen Wertstoffe die Rohwarenimporte teils um ein Mehrfaches übersteigen. Auch für Titan zeigen sich im gewerblichen Bereich nennenswerte Potenziale. Die Untersuchungen ergaben dabei, dass für Antimon die meisten relevanten Abfälle mit 3,1 Tonnen in der Metallindustrie und in der Chemischen sowie der Papier- und Druckindustrie (2,7 und 2,2 Tonnen) anfallen. Für Kobalt ergibt sich fast die Hälfte des angegebenen Potenzials, nämlich 307,8 Tonnen, aus Abfällen des Maschinenbaus. Weitere 173,1 bzw. 48,5 Tonnen entstammen der Metall- bzw. der Chemischen Industrie. Detaillierte Informationen zu den in den verschiedenen Leitindustrien anfallenden rohstoffspezifischen Abfällen können den im Anhang 1 angefügten Fact-Sheets entnommen werden.

Grundsätzlich muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass die hier dargestellte Gegenüberstellung von Sekundärpotenzialen und Importmengen nur als grobe Anhaltswerte angesehen werden können. Um hierzu wirklich belastbare Aussagen treffen zu können, wäre es notwendig, die auf den zahlreichen Betrachtungsebenen bestehenden Datenlücken und -unsicherheiten (vgl. Kapitel 4.2.2 / 6.1.1/ 6.1.2) zu beheben.

## 6.2 Betrachtung von Rückgewinnungsverfahren

Für die Identifizierung relevanter Technologien für das Recycling der zehn ausgewählten Top-10-Rohstoffe erfolgte eine globale Literatur- und Patentrecherche.

Zunächst werden die Ergebnisse der Literaturrecherche präsentiert. Recycling gilt als nachhaltiger Beitrag zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und einer ökologisch sinnvollen Rohstoffnutzung, da hierdurch Industriemetalle in den Wirtschaftskreislauf rückgeführt werden, wodurch die Primärentnahme von Ressourcen sinkt [UNEP 2011; Erdmann und Graedel 2011]. Hierdurch werden der Energiebedarf im Vergleich zur Primärproduktion um bis zu 95 Prozent verringert [Antrekowitsch et al. 2009], Treibhausgasemissionen und die Menge der zu deponierenden Reststoffmengen eingespart [Schmitz und Sievers 2013]. Gleichzeitig beeinflussen Infrastrukturen und Technologien sowie gesetzliche Rahmenbedingungen die tatsächliche Ausbringungsmenge des Recyclings und können umgekehrt wesentlich zu einer effizienteren Ressourcennutzung beitragen [UNEP 2013a]. Eine besondere Bedeutung kommt dem Recycling von Elektroaltgeräten zu, da viele der kritischen Rohstoffe in Elektrogeräten verbaut sind, wenngleich Recycling nur in geringer Größenordnung stattfindet und gleichzeitig der Bedarf an Rohstoffen und die Elementenvielfalt der Industrie sehr groß sind.

Für die Analyse der sekundären Gewinnungsverfahren wird der aktuelle Status des Recyclings anhand von Kennzahlen analysiert. Um Recycling zu messen, wurden von Seiten des International Resource Panel des UNEP verschiedene Kenngrößen definiert, um die Rückgewinnung von Industrierohstoffen vergleichbar zu machen: hierzu zählen die End of Life Recyclingrate (EoL-RR) oder Recyclingquote, der Recyclinganteil (RA) und der Schrottanteil (OSR).

Die **End of Life Recyclingrate** (EoL-RR) bezeichnet den prozentualen Anteil an Rohstoffen, die (als Bauelement in der Verwertung zugeführten Produkten) als Abfall gesammelt und dem Recycling zugeführt werden. Hierbei sind Verluste miteingeschlossen [UNEP 2011; DERA 2011c]. Unberücksichtigt bleibt hingegen oft, dass viele Rohstoffe erst gar nicht erfasst werden oder dissipativ verloren gehen.

	$\frac{\text{Recycelte Altschrottmenge eines Metalls}}{\text{der Verwertung zugeführte Menge inkl. Verluste (Metallinhalt in Produkten, deren Lebensdauer im Bilanzierungsjahr beendet ist)}} \times 100 \%$
End of Life Recyclingrate (EoL-RR) =	

Der **Recyclinganteil** (*engl. recycled content*) bezeichnet den Anteil an recyceltem Metall in der globalen Metallherstellung [UNEP 2011].

$$\text{Recyclinganteil (RA)} = \frac{\text{Recyclingmaterial (Alt- und Fabrikatsschrott)}}{\text{Hergestelltes Metall(-produkt)}} \times 100 \%$$

Der Recyclinganteil liegt immer dann deutlich unter der Recyclingquote, wenn bei steigendem Metallbedarf und langer Lebensdauer mehr Primärmaterial eingesetzt werden muss, als durch das Recycling aus Altschrott und verunreinigtem Fabrikatsschrott zur Verfügung gestellt wird [Rombach 2011].

Der **Schrottanteil** (*engl. old scrap ratio*) verweist auf den Anteil an Abfallmetallen aus dem Endverbrauch im gesamten Abfallaufkommen. Er ist nicht zu verwechseln mit Produktionsabfällen, wodurch neu produzierte Metalle dem Recycling zugeführt werden [UNEP 2011].

Während Recycling bei Massenmetallen bereits einen wesentlichen Beitrag zur globalen Versorgung liefert<sup>4</sup>, liegen die Recyclingraten für Hochtechnologiemetalle zumeist bei weniger als einem Prozent oder es liegen nur begrenzte Informationen über deren Recycling vor (siehe Tabelle 33). Ist keine Quelle angegeben, entsprechen diese der Schätzung der Expertengruppe um die Autoren des UNEP-Berichts; leere Felder verweisen auf das Fehlen von Daten oder verlässlicher Schätzungen [UNEP 2011]. Die Schätzungen des USGS beziehen sich auf die USA und liegen wahrscheinlich über dem weltweiten Durchschnitt [UNEP 2011]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Werte für Baden-Württemberg in einer ähnlichen Größenordnung wie die der USA liegen.

Als Hauptgründe für die geringe Bedeutung des Recyclings vieler Industrie-rohstoffe gelten die mangelhafte Infrastruktur in Bezug auf die Sammlung, Sortierung, Verwertung und Rückgewinnung von Ressourcen, niedrige Elementkonzentrationen und -gehalte in Gebrauchsgütern sowie dissipative Verluste [UNEP 2011; Graedel et al. 2011]. Daneben ist der technologische Aufwand für das Recycling derzeit so groß, dass ökonomische Anreize oftmals fehlen, was u. a. auch an limitierten Märkten für Recyclingmaterial und der damit

<sup>4</sup> Bei einigen Materialien, wie beispielsweise Kupfer, hat Deutschland mit 54 Prozent die höchste Recyclingquote weltweit (EU 45 Prozent, USA 41 Prozent, Welt 13 Prozent). Die Recyclingraten anderer wichtiger Rohstoffe betragen 35 Prozent bei Aluminium, 59 Prozent bei Blei und 90 Prozent bei Stahl [BMW 2010]. Laut Schmitz und Sievers beträgt der globale Recyclinganteil am Gesamtverbrauch für Zink ~15 Prozent, für Kupfer ~35 Prozent und für Blei 55–60 Prozent. Der Sekundärrohstoffanteil in der deutschen Rohstahlproduktion liegt seit über zehn Jahren zwischen 43 und 45 Prozent, beim Aluminium bei ~60 Prozent und bei Kupfer ~43 Prozent [Schmitz und Sievers 2013].

häufig verbundenen Preisvolatilität liegt [Cunningham 2006a; Oakdene Hollins 2011]. Zudem werden an rückgewonnene Rohstoffe die gleichen Qualitäts- und Gesundheitsanforderungen gestellt wie an Primärrohstoffe, was technisch derzeit z. T. noch schwer realisierbar ist [Gille und Meier 2012].

Weitere Defizite sind der Export entsorgter Konsumgüter, wie Altfahrzeuge oder Elektroaltgeräte in sogenannte Entwicklungsländer [Öko-Institut 2011]. Hierdurch stehen die exportierten Güter und darin gebundenen Materialien für Recycling oder Urban Mining nicht mehr zur Verfügung.



**Tabelle 33:**  
 Übersicht über die  
 Recyclingraten  
 (verändert und  
 erweitert nach UNEP  
 2011).

<b>Rohstoffe</b>	<b>Schrottanteil OSR [%]</b>	<b>Recyclinganteil an gesamter Produktion (RC) [%]</b>	<b>Recyclingrate EoL-RR [%]</b>
<b>Antimon</b>	< 10, 80 <sup>a</sup>	< 10, 20 <sup>a</sup> , 10-25 <sup>b</sup> , 30 <sup>c</sup>	89 <sup>a</sup> , < 5, 11 <sup>z</sup>
<b>Beryllium</b>	14 <sup>d</sup> , 75 <sup>e</sup>	10 <sup>d</sup> , 25 <sup>e</sup> , 10 <sup>f</sup>	7 <sup>e</sup> , < 1 <sup>d</sup> , 19 <sup>z</sup>
<b>Germanium</b>	0, 40 <sup>g</sup>	35, 50 <sup>g</sup>	< 1, 76 <sup>g</sup> , 0 <sup>h</sup> , 0 <sup>z</sup>
<b>Kobalt</b>	50 <sup>i</sup>	32 <sup>i</sup>	68 <sup>i</sup> , 20-25 <sup>k</sup> , 16 <sup>z</sup>
<b>Molybdän</b>	33 <sup>m</sup> , 67 <sup>n</sup>	33 <sup>n</sup>	30 <sup>n</sup> , 10 <sup>k</sup> , 17 <sup>z</sup>
<b>Tantal</b>	1-10, 43 <sup>o</sup>	10-25, 21 <sup>o</sup> , 20 <sup>p</sup> , 30 <sup>f</sup> , 20-25 <sup>q</sup>	< 1, 35 <sup>o</sup> , 4 <sup>z</sup>
<b>Titan*</b>	11 <sup>r</sup>	52 <sup>r</sup>	91 <sup>r</sup> , 6 <sup>z</sup>
<b>Wolfram</b>	80 <sup>s</sup>	46 <sup>s</sup> , 35 <sup>f</sup> , 35 <sup>t</sup>	10-25, 66 <sup>s</sup> , 37 <sup>z</sup>
<b>Platinmetalle</b>		45 <sup>u</sup> , 14 <sup>v</sup> , 50 <sup>w</sup>	35 <sup>z</sup>
Iridium	> 80	15-20	20-30
Osmium	< 1 <sup>x</sup>	< 1 <sup>x</sup>	< 1 <sup>x</sup>
Palladium	> 80	50	60-70
Platin	> 80, 58 <sup>y</sup>	50, 16 <sup>y</sup>	60-70, 76 <sup>y</sup>
Rhodium	> 80	40	50-60
Ruthenium	< 20	50-60	5-15
<b>Seltenerdmetalle</b>			1 <sup>z</sup>
Cer, Dysprosium, Gadolinium, Lanthan, Neodym, Praseodym		1-10	< 1
Erbium, Europium, Holmium, Lutetium, Samarium, Terbium, Thulium		< 1	< 1
Promethium			
Scandium			< 1
Yttrium	0	0	0

---

**Legende**

\* Hier ist metallisches Titan gemeint, keine Ti-Legierung oder Ti-Oxid.

a	[Carlin 2006], (USGS)
b	[Roskill 2007] zitiert nach [UNEP 2011]
c	[Grund et al. 2000], (Europa)
d	[Cunningham 2006a], (USGS)
e	[Civic 2009, zitiert nach UNEP 2011]
f	[Bertau et al. 2013]
g	[Jorgenson 2006], (USGS)
h	[Kammer 2012]
i	[Shedd 2004], (USGS)
k	[BMW 2010], (Deutschland)
m	Konsens der UNEP-Arbeitsgruppe
n	[Blossom 2004], (USGS)
o	[Cunningham 2006b], (USGS)
p	[Haas und Schnitter 2006]
q	[TIC 2013]
r	[Goonan 2006], (USGS)
s	[Shedd 2005], (USGS)
t	[Gille 2006]
u	[DERA 2011c], (Deutschland)
v	[OECD 2010a]
w	[Wäger und Lang 2010]
x	[van Oss 2009, zitiert von UNEP 2011]
y	[Hilliard 2006], (USGS)
z	[EC 2010], (Europa)

---

In einem zweiten Schritt erfolgte eine globale Patentrecherche. Als geeignete Datenbanken für Patente erwiesen sich DEPATISnet des Deutschen Patent- und Markenamts [DPMA 2013] sowie der Global Patent Index (GPI), zur Verfügung gestellt durch das Europäische Patentamt [EPA 2014].

Diese Statusanalyse wurde durch eine Bewertung des Entwicklungsstands der jeweiligen Technologien ergänzt. Hierbei wurden die derzeit bestehenden Technologien im Rahmen einer Defizitanalyse in drei Kategorien eingeteilt: »Konzept«, »Entwicklung« und »Marktreife«. Diese sind vergleichbar mit dem Technology Readiness Level-Ansatz [Mankins 1995]. Als Grundlage für die Bewertung und anschließende Zuordnung in eine der drei Kategorien dient der Entwicklungsstand der jeweiligen Technik (siehe Tabelle 34).

**Tabelle 34:**  
 Status- und  
 Defizitanalyse der  
 Sekundärgewinnung.

Name der Technologie	
Zuordnung hinsichtlich	
Entwicklungsstand der Technik	»Konzept« »Entwicklung« »Marktreife«
Potenzielle Ausbringungsmenge	»zentral« vs. »dezentral«

Als »Konzept« werden solche Verfahren bezeichnet, die als Idee oder Patente zur Verfügung stehen, deren Realisierbarkeit in der Praxis jedoch erst noch geprüft werden muss. »Entwicklung« umfasst solche Technologien, deren Anwendung bereits im Versuch getestet wird. Dem technologischen Stadium »Marktreife« werden solche Verfahren zugeordnet, die bereits marktfähig sind und von Unternehmen eingesetzt werden. Schließlich wurden die Recyclingverfahren hinsichtlich ihrer (potenziellen) Ausbringungsmenge in die zwei logistischen Kategorien »zentral« und »dezentral« zugeordnet. Als Kriterium für die Einordnung als »dezentrales« Verfahren wird die Größe der kleinsten Einheit (Land oder Unternehmen) zur Primärgewinnung gewählt. Folglich gelten solche Recyclingtechnologien mit kleineren Ausbringungsmengen als die der kleinsten Minen als »dezentrale« Verfahren und Anlagen mit größeren Kapazitäten als »zentral«. Die jeweiligen Grenzwerte sind Tabelle 35 zu entnehmen. Aufgrund der zahlreichen Bergbauaktivitäten, erhebt diese Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit und die dargestellten Werte sind als Näherungen zu verstehen.

**Tabelle 35:**  
 Minen mit den geringsten jährlichen Kapazitäten zur Rohstoffförderung.

<b>Antimon:</b> 120 t Erz und Konzentrat/a Unternehmen: Doe Run Peru [Schwarz-Schampera 2014]	<b>Platinmetalle:</b> 2,2 t Pt, 2,3 t Pd, 0,63 t Ru, 0,46 t Rh, 0,18 t Ir Mine: Marula Mine at Bothashoek, Südafrika Unternehmen: N.N. [Yager 2011c]
<b>Beryllium:</b> 57,8 t Beryll/a Mozambique [Yager 2011b]	<b>Seltene Erden:</b> 3 t/a Seltene Erden Mine: Jiangsu, Jiangyin Unternehmen: Jiangyin Jiahua Advanced Material Resources Co. Ltd. [Tse 2011]
<b>Germanium:</b> 3,0 t/a USA [USGS 2011a]	<b>Tantal:</b> 140 t Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /a Mine: Marropino Unternehmen: Noventa Ltd., Mozambique [Yager 2011b]
<b>Kobalt:</b> 1 000 t/a Unternehmen: Société Minière du Sud Pacifique Minen: Boakaine, Ouco, Poum und Poya, Neukaledonien [Wacaster 2011]	<b>Titan:</b> 4 200 t Titanerze/a Mine: Mataraca, Paraiba Unternehmen: Rutilo e Ilmenita do Brasil S.S. (RIBSA), Brasilien [Gurmendi 2011]
<b>Molybdän:</b> 250 t/a Kirgisistan [USGS 2011a]	<b>Wolfram:</b> 4 <sup>e</sup> t W-Inhalt/a Bergwerk: Tsagaan Davaa Unternehmen: Monwolfram, Mongolei [DERA 2014a]

Tabelle 36 liefert einen Überblick über die Ergebnisse der Technologierecherche. Für sämtliche Rohstoffe finden sich detailliertere Beschreibungen der Recyclingverfahren in Anlage 8.

**Tabelle 36:**  
 Recyclingverfahren  
 der Top-10-  
 Rohstoffe im  
 Überblick.

	Bezeichnung des Recyclingverfahrens	Entwicklungsstand der Technik	Potenzielle Ausbringungsmenge
Antimon	Antimon-Recycling aus Bleiakкумуляtoren aus Fahrzeugen	»Marktreife«	k. A.
	Antimon-Recycling aus Flammenschutzadditiven	»Konzept«	k. A.
	Antimon-Recycling aus Anodenschlamm	»Konzept«	k. A.
Beryllium	Beryllium-Recycling aus Legierungen	»Marktreife«	k. A.
	Recycling von Ammoniumfluoroberyllat	»Konzept«	k. A.
	Recycling von Beryllium-Oxiden	»Konzept«	k. A.
Germanium	Konventionelles Germaniumrecycling	»Marktreife«	k. A.
	Germaniumgewinnung aus Flugasche aus Kohlekraftwerken	»Marktreife«	k. A.
	Germanium-Recycling im Bereich Optik	»Marktreife«	k. A.
	Germanium-Recycling aus Polyethylenterephthalat (PET)	»Marktreife«	k. A.
	Germanium-Recycling durch Flüssig-Ionen-Austauschverfahren	»Entwicklung«	k. A.
Kobalt	Kobalt-Recycling aus verbrauchten Katalysatoren	»Marktreife«	k. A.
	Kobalt-Recycling aus Batterien und Akkumulatoren	»Marktreife«	>950 t/a
	Kobalt-Recycling aus industriellen Legierungen	»Marktreife«	k. A.
	Kobalt-Recycling aus Schmelzofenschlacke	»Marktreife«	3 400 t Kobaltmetall/a (Chambishi Metals plc, Sambia) [Mobbs 2011] 5 000 t Kobalt/a (Big Hill, DRC) [Yager 2011a]
	Kobalt-Recycling aus Kupfererzen	»Marktreife«	La Générale des Carrières et des Mines (Gécamines): 2.500 <sup>e</sup> t Kobalt/a [Yager 2011a] Chambishi Metals plc.: 3.400 t Kobaltmetall/a [Mobbs 2011] Mopani Copper Mines plc., Nkana cobalt plant: 2.400 t Kobaltmetall/a [Mobbs 2011]

**Tabelle 36:**  
 Fortsetzung.

	Bezeichnung des Recyclingverfahrens	Entwicklungsstand der Technik	Potenzielle Ausbringungsmenge
	Kobalt-Recycling mithilfe von Biomining	»Marktreife«	Kasese, Uganda: 1.100 t Co/a [DERA 2011b] Talvivaara/Tuhkakylä, Finnland: 1.800 t Co/a [DERA 2011b; Talvivaara 2012]
<b>Molybdän</b>	Recycling von elementarem Molybdän aus Legierungen	»Marktreife«	k. A.
	Recycling von Molybdän aus verbrauchten Katalysatoren	»Marktreife«	INMETCO, Ellwood City und Pittsburgh, USA 264 t Molybdän [Blossom 2004]
<b>Platinmetalle</b>	Platinmetall-Recycling aus Auto-Abgaskatalysatoren und petrochemischen Katalysatoren	»Marktreife«	Kapazität Hoboken-Anlage, Antwerpen, Belgien (Betreiber: Umicore): 18 t Platin/a, 24 t Palladium/a, 5 t Rhodium/a [UNEP 2009a] Jahresleistung: 12 t Platin (2007) [Oakdene Hollins 2011]
	Platinmetall-Recycling Elektroaltgeräten	»Marktreife«	Kapazität Hoboken-Anlage, Antwerpen, Belgien (Betreiber: Umicore): 18 t Platin/a, 24 t Palladium/a, 5 t Rhodium/a [UNEP 2009a] Jahresleistung: 12 t Platin (2007) [Oakdene Hollins 2011]
	Biometallurgische Verfahren zur PGM-Sekundärgewinnung	»Entwicklung«	k. A.
<b>Seltenerdmetalle</b>	Recycling von Seltenen Erden aus Magneten	»Entwicklung«	k. A.
	Recycling von Seltenen Erden aus Batterien	»Marktreife«	Hoboken, Belgien (Umicore): k.A. La Rochelle, Frankreich (Rhodia): k.A.
	Recycling von Seltenen Erden aus Leuchtstoffen	»Marktreife«	La Rochelle, Frankreich (Rhodia): k.A. Sain-Fons, Frankreich (Rhodia) (geplant)
	Biosorption zur Sekundärgewinnung von Seltenerdmetallen	»Entwicklung«	k. A.
	Recycling von Seltenen Erden aus Flachbildschirmen	»Idee«	k. A.

**Tabelle 36:**  
 Fortsetzung.

	<b>Bezeichnung des Recyclingverfahrens</b>	<b>Entwicklungs- stand der Technik</b>	<b>Potenzielle Ausbringungsmenge</b>
<b>Tantal</b>	Tantal-Recycling aus Kondensatoren	»Marktreife«	k. A.
	Tantal-Sekundärgewinnung aus Schlacken der Zinnverhüttung	»Marktreife«	k. A.
<b>Titan</b>	Titan-Recycling im Flugzeugbau	»Marktreife«	k. A.
	TiO <sub>2</sub> -Recycling	k. A.	k. A.
<b>Wolfram</b>	Wolfram-Hartmetall-Recycling im Zink-Prozess	»Marktreife«	k. A.
	Chemisches Wolfram-Recycling und gemeinsame Weiterverarbeitung mit Primärerzen	»Marktreife«	k. A.
	Recycling von Wolframcarbid-Kobalt-Legierungen	»Marktreife«	k. A.
	Wolfram-Katalysator-Rückgewinnung	»Marktreife«	k. A.

## 7 Identifikation und Auswahl möglicher Effizienzmaßnahmen

### 7.1 Allgemeine Aspekte und Steuerungsansätze für Ressourceneffizienz

Für den Begriff der Ressourceneffizienz gibt es derzeit noch keine allgemeingültige Definition, jedoch existiert parallel eine Vielzahl von Begriffsverständnissen [Nippa 2013]. Eine der bisher gebräuchlichen Definitionen besagt, dass Ressourceneffizienz das »Verhältnis der im fertigen Produkt enthaltenen Ressourcen zu der zur Herstellung benötigten Menge an Energie, Material und Zeit« beschreibt [Gäckle 2012]. Ein Vorteil wird dadurch erreicht, dass es zu einer Reduktion der eingesetzten Menge an Ressourcen kommt, wobei der Output gleich bleibt. Eine andere Möglichkeit ist, dass der Output erhöht wird, während gleich viele Ressourcen wie zuvor eingesetzt werden [Gäckle 2012]. Eine weitere Definition stellt die Ressourceneffizienz als »Quotient aus Nutzen und dem dafür notwendigen Ressourceneinsatz« [Reinhart et al. 2012] dar. Den Nutzen stellt dabei entweder ein Produkt oder eine leistungsfähigere Wertschöpfungskette dar. Die Ressourceneffizienz bezieht hierbei sowohl die eingesetzte Energie mit ein als auch sämtliche natürlichen Ressourcen, und zwar die Materialien, die zur Produktion nötig sind als auch die Ressourcen, welche an die Umwelt zurückgegeben werden [Reinhart et al. 2012]. Eine weitere klassische Beschreibung der Ressourceneffizienz ist das »Verhältnis von ökonomischer Wertschöpfung (meistens BIP) in EUR und dem Rohstoffinput in Tonnen« [Woidasky und Hirth 2012]. Diese Begriffsbestimmung trifft im Grunde die gleiche Aussage wie die vorherige, nur bezieht sich diese direkt auf die Messbarkeit der Effizienz in Geldwerten und hat somit einen rein ökonomischen Nutzen. Mit dem Rohstoffinput ist gemäß [Schmidt 2013] das abiotische Primärmaterial gemeint, welches im Inland der Natur entnommen wurde, sowie die importierten abiotischen Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren. Land- und forstwirtschaftliche Produkte sind hiervon ausgenommen.

Neben der bisher nicht vorhandenen Festlegung einer allgemeingültigen Definition gibt es bisher auch keine »allgemein anerkannte Methode zur Messung der Ressourceneffizienz«, welche verallgemeinernd angewandt werden könnte [Woidasky und Hirth 2012]. An eine derartige Methode bestehen gewisse Anforderungen wie eine gute Handhabbarkeit, die Berücksichtigung von ökologischen Gesichtspunkten während des Lebenszyklus, sowie ökonomische Kriterien wie beispielsweise Knappheit und soziale Aspekte wie die Arbeitsbedingungen beim Rohstoffabbau [Woidasky & Hirth 2012]. Jedoch existieren bereits einige Ansätze, wie die Ressourceneffizienz je nach Anwendungsgebiet gemessen und bewertet werden kann. Darüber hinaus liefert die im Juli 2014 in einer Entwurfsfassung erschienene VDI-Richtlinie 4800 erstmalig abgestimmte Definitionen und methodische Grundlagen und Prinzipien zur Ressourceneffizienzbewertung [VDI 2014].

Um den Einsatz von Ressourceneffizienzmaßnahmen besser nachvollziehen zu können, ist es wichtig zu wissen, dass es hierbei unterschiedliche Betrachtungsebenen gibt. Dies können Produkte, Prozesse, Unternehmen, Branchen, Städte aber auch Regionen, Staaten und der gesamte Globus sein [Engelmann et al. 2012]. Zudem ist es notwendig, wenn Produkte – welche die kleinste Betrachtungsebene darstellen – entlang des gesamten Lebenszyklus analysiert werden [Engelmann et al. et al. 2012]. Hierzu ist es hilfreich, die sogenannte materielle Wertschöpfungskette ganzheitlich zu betrachten [Müller und Faulstich 2012]. Diese ist unabhängig vom Produkt oder der Branche und somit allgemeingültig. Die fünf wichtigsten Stufen der Wertschöpfungskette gemäß [Müller und Faulstich 2012] werden in Tabelle 37 dargestellt.

**Tabelle 37:**  
Die fünf Hauptstufen der Wertschöpfungskette nach [Müller und Faulstich 2012].

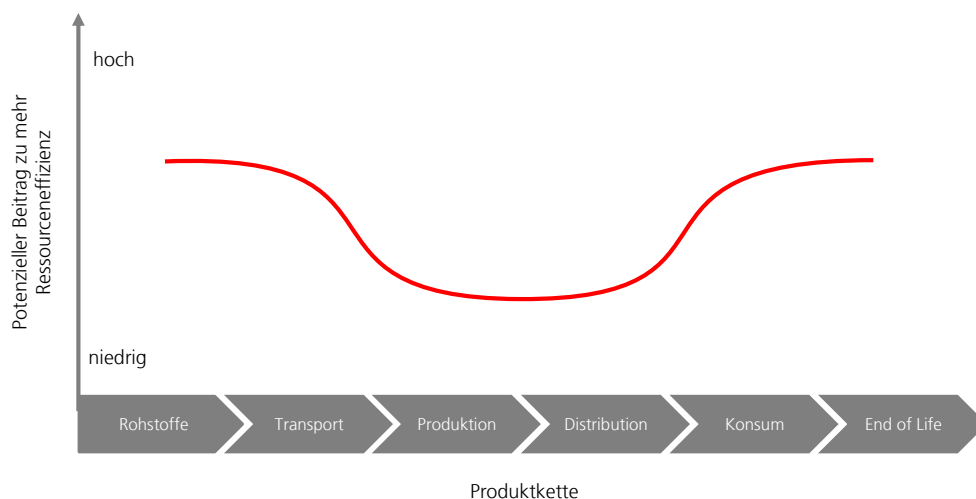
1. Stufe	Rohstoffabbau
2. Stufe	Grundstoffproduktion
3. Stufe	Güterproduktion
4. Stufe	Güternutzung
5. Stufe	Recycling

Wenn die Effizienz auf nur einer Wertschöpfungsstufe gesteigert wird, reicht diese partielle Optimierung häufig nicht für eine nachhaltige Ressourceneffizienzsteigerung aus [Müller und Faulstich 2012]. Daher ist es sinnvoll, mehrere Wertschöpfungsketten unterschiedlicher Abstufung zu verknüpfen und in den verschiedenen Stufen Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz zu treffen. Hierbei sollte insbesondere der Hauptrohstoff betrachtet werden, welcher die Wertschöpfungskette in allen Stufen durchläuft, also von der Rohstoffaufbereitung bis zum Recycling [Müller und Faulstich 2012].

Eine vergleichbare Art der Lebenszyklusbetrachtung wird in [UNEP CSCP 2009] dargestellt. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht, wie groß der potenzielle Beitrag zu mehr Ressourceneffizienz in den jeweiligen Stufen der hier als Produktkette bezeichneten Wertschöpfungskette (qualitativ) einzuschätzen ist.



**Abbildung 27:**  
Potenzieller Beitrag der einzelnen Stufen einer Produktkette zu mehr Ressourceneffizienz nach [UNEP CSCP 2009].



Nach Einschätzungen des [UNEP CSCP 2009] sind die Effizienzpotenziale insbesondere beim Rohstoffabbau und dem Transport, sowie in den letzten Stufen der Produktkette, also im Bereich des Konsums und des Recyclings und der Verwertung, am höchsten einzuschätzen, wohingegen im Bereich der Produktion und Distribution vergleichsweise geringer Spielraum besteht.

Da nach [UNEP CSCP 2009] die bisherigen Initiativen zu einer Erhöhung der Ressourceneffizienz vorwiegend an den Aktionsbereich der Produktion adressieren und in den ersten und letzten Stufen nur sporadisch Maßnahmen ergriffen werden, bleiben die am höchsten einzuschätzenden Effizienzpotenziale weitgehend ungenutzt. So fokussieren rund 80 Prozent der derzeitigen Aktivitäten zur Verbesserung der Ressourcenproduktivität auf etwa 20 Prozent der Chancen, während in den anderen Bereichen die weit größeren Verbesserungspotenziale liegen könnten. Die Innovationsmöglichkeiten am Anfang und Ende der Produktkette sollten daher zukünftig besser ausgeschöpft werden [UNEP CSCP 2009].

Nachfolgend werden einige grundsätzliche Steuerungsinstrumente dargestellt, die zur Erhöhung der Ressourceneffizienz beitragen können, tabellarisch dargestellt. Diese basieren auf den im Rahmen des Umweltgutachten 2012 von Seiten des Sachverständigenrates für Umweltfragen formulierten Handlungsansätzen, Instrumenten und Anwendungsbeispielen zur Erreichung der Entkopplungsziele von Rohstoffverbrauch und Wohlfahrt [SRU 2012].

**Tabelle 38:**  
Handlungsansätze,  
Instrumente und  
Anwendungsbeispiele  
zur Erreichung der  
Entkopplungsziele von  
Rohstoffverbrauch und  
Wohlfahrt [SRU 2010].

Ziel	Handlungsansätze	Instrumente	Anwendungsbeispiele
<b>Entkopplung Rohstoffverbrauch und Wohlfahrt</b> (Reduzierung der Rohstoffmenge je Wirtschaftsleistung)	Reduzierung Material-einsatz, Miniaturisierung	Materialinputsteuer	Massenmetalle, Seltene Erden
		Entnahmesteuer	Mineralische Baustoffe
		Emissionshandel	Zementindustrie
		Ökodesign-Richtlinie 2005/32/EG	Elektrogeräte, Haushaltsgeräte
		Innovations- und Forschungsförderung, Technologietransfer, Beratung	ReTech (Exportinitiative Recycling- und Effizienztechnik)
	Nutzungsdauer-verlängerung	Produktstandards	Elektrogeräte, Haushaltsgeräte
		Innovations- und Forschungsförderung, Technologietransfer, Beratung	Reparaturfähigkeit, Demontagefähigkeit
		Grüne öffentliche Beschaffung	Förderprogramm »Nachhaltiges Wirtschaften: Möglichkeiten von neuen Nutzungsstrategien«
	Kreislauf-führung	Abfallrecht	PC-Wiedergebrauch, Möbelpool
		Mindest-Recycling-Anteile	Abfallhierarchie
		Produktverantwortung	Beton
		Pfandsysteme	Altauto-Richtlinie 200/53/EG
		Stoffflusskataster / Erfassung Rohstoffbestand in Deutschland	Mobiltelefone, Elektrogeräte, Autobatterie
		Subventionierung	Seltene Erden
	Produkt-substitution	Innovations- und Forschungsförderung, Technologietransfer	Sekundärrohstoffe
		Produkt-Sharing, Dienstleistung statt Produkt-erwerb	Rückgewinnung Seltener Erden in Elektrogeräten, PV-Modulen
	Veränderung Konsum	Öko-Sonderabgabe auf ökologisch schädliche Stoffe	Autos, Fahrräder, Baumarktgeräte
		Bewusstseins-schaffung, Informationspolitik	»Rohstoffengel«
		Mehrwertsteuer	Senkung für Produkte mit »Rohstoffengel«
		Öko-Sonderabgabe auf rohstoffintensive Produkte	
Subventionierung rohstoffärmerer Produkte			
Grüne öffentliche Beschaffung	Green IT, Bauwesen		

Tabelle 38 verdeutlicht, dass bereits zahlreiche, sich gegenseitig ergänzende ordnungsrechtliche, ökonomische, und informatorische Instrumente zur Verfügung stehen, um die Rohstoffproduktivität zu erhöhen und Umweltauswirkungen zu reduzieren [SRU 2012]. An welchen Punkten genau das Land Baden-Württemberg auf verschiedenen Handlungsebenen gezielt ansetzen kann wird in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

## 7.2 Akteursplattform Ressourceneffizienz

Die laut Vorhabensbeschreibung geplanten Branchendialoge haben in Einvernehmen mit dem Auftraggeber nicht in der vorgesehenen Art und Weise stattgefunden, da während der Projektlaufzeit vom Ministerium im Rahmen der Landesstrategie Ressourceneffizienz eine andere Veranstaltungsreihe zu dem Thema initiiert wurde. Mit dem 1. Stakeholder-Workshop am 27. Mai 2014 hat Herr Minister Franz Untersteller die »Akteursplattform Ressourceneffizienz Baden-Württemberg« in Stuttgart eröffnet. Die Akteursplattform ist eine Initiative der Landesregierung unter Federführung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und Mitwirkung des Staatsministeriums, Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft und Ministeriums für Wissenschaft und Kunst. Ziel der Initiative ist es, mit Akteuren aus Unternehmen, Wissenschaft, Banken, Versicherungen, Nichtregierungsorganisationen, Verbänden und Netzwerken, Sozialpartnern, Verwaltung und Politik in fünf Arbeitskreisen Schwerpunktthemen zu erarbeiten, die in Handlungsempfehlungen für das Land Baden-Württemberg resultieren sollen. Innerhalb von zwei Jahren soll im Fahrplan Ressourceneffizienz beschrieben werden, wie die langfristigen Ziele der Landesstrategie Ressourceneffizienz erreicht werden können. Das sogenannte »Board«, die Repräsentanten der Akteure, informiert die Öffentlichkeit über die Fortschritte und Ergebnisse der Arbeitskreise.

Da die Branchendialoge ähnliche oder teilweise die gleichen Vertreter aus Unternehmen und Verbänden hätten ansprechen sollen, wurde es als wenig zielführend erachtet, eine Konkurrenzveranstaltung entstehen zu lassen. Es sollte vermieden werden, inhaltlich verwandte Themen parallel auf mehreren Ebenen unabhängig voneinander zu diskutieren. Stattdessen verständigte man sich darauf, die Ideen der Akteure in einer Veranstaltungsreihe zu bündeln, wobei sich die Auftragnehmer aktiv beim Ideeninput in die Arbeitskreise beteiligen. Zudem wurden die in der vorliegenden Studie bis dato erlangten Erkenntnisse beim ersten Stakeholder-Workshop vorgestellt und die Fact-Sheets zu den kritischen Rohstoffen und eine Kurzzusammenfassung der Projektergebnisse für die Teilnehmer bereitgestellt. Nach der Auftaktveranstaltung im Mai 2014, bei der das erste Treffen der einzelnen Arbeitskreise stattgefunden hat, gab es bis zum Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress im September, auf dem die ersten Ergebnisse der Arbeitskreise präsentiert werden, ein bis zwei weitere Treffen der Arbeitskreise.

Im Folgenden werden für die fünf Arbeitskreise einige der diskutierten Themen knapp dargestellt. Im Arbeitskreis 1 »Innovation und Technologieentwicklung« sah man neben technologischen Themen wie der intelligenten und ganzheitlichen Steuerung von Prozessen und Technologien, besonders die Verbesserung des branchenübergreifenden Wissensaustauschs als wichtig zur Erreichung von mehr Ressourceneffizienz an. Im Arbeitskreis 2 »Material- und Energieeffizienz in Unter-

nehmen« wurden Produktionsprozesse inklusive Energieprozesse, die betriebliche Organisation für Ressourceneffizienz, sowie die Förderung und Finanzierung als Handlungsfelder identifiziert, wobei einige Vertreter bemängelten, dass es zwar eine Vielzahl an Angeboten und Initiativen gäbe, der Überblick darüber den Unternehmen allerdings oft fehlte. Der Arbeitskreis 3 »Indikatoren, Messgrößen und Ziele« suchte in seiner ersten Sitzung zuerst konkrete Definitionen und verständigte sich darauf, dass das Recycling bei der Festlegung von Messgrößen zur Ressourceneffizienz sowohl auf Landes- als auch Betriebsebene berücksichtigt werden muss und dass in einer weiteren Sitzung das Statistikamt einbezogen werden sollte, um die mögliche Bereitstellung von Daten abzuklären. Der Arbeitskreis 4 »Ressourceneffiziente Rohstoffgewinnung und Rohstoffversorgung der Wirtschaft« sah die nachhaltige Standortplanung und Neuerschließung heimischer Rohstoffquellen, wie auch auf nationaler, europäischer und globaler Ebene die Vernetzung durch Rohstoffpartnerschaften und das Rohstoffmapping als wichtige Handlungsfelder. Der Arbeitskreis 5 »Kreislaufwirtschaft und Produktdesign« erörterte, dass zur Erreichung eines effizienteren Recyclings insbesondere wirtschaftsstrategischer Rohstoffe das Festlegen Element- oder modul-/baugruppenspezifischer Recycling- und Substitutionsraten notwendig sind. Zudem wären Investitionsanreize für Recycling- und Substitutionstechnologien notwendig. Für die Rückführung von Phosphor sollte das P-Recycling aus Aschen in den Fahrplan Ressourceneffizienz mit aufgenommen werden. In mehreren Arbeitskreisen wurden Bereiche aufgezeigt, für die eine Vertiefung durch wissenschaftliche Kurzstudien sinnvoll und notwendig ist (beispielsweise Rohstoffe in Abfallströmen, Findung »einfacher« Indikatoren).

Nach der Vorstellung der ersten Ergebnisse auf dem Ende September 2014 in Karlsruhe stattfindenden Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress, sollen bis zum nächsten Stakeholder-Workshop im Mai 2015 und auch im Anschluss daran weitere Arbeitskreistreffen stattfinden. Im September 2015 wird beim nächsten Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress schließlich der Fahrplan Ressourceneffizienz präsentiert und die Umsetzung der Maßnahmen soll beginnen.

### **7.3 Leuchtturmprojekte für BW**

Auf Basis der im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber fünf ambitionierte Leuchtturmprojekte definiert. Diese adressieren vorwiegend thematische Schwerpunkte, die zum einen große Potenziale erwarten lassen und berücksichtigen andererseits in welchen Bereichen das Land über ausgeprägte Kompetenzen verfügt. Als Ausgangspunkt dienen neben den im Rahmen der Studie gewonnenen Erkenntnisse, die Not-

wendigkeit übergeordneter Themen und die bisher in den Arbeitskreisen als besonders wichtig erachteten Aspekte.

Die ausgewählten Projektvorschläge richten sich dabei nur bedingt an den Bereich der Produktion sondern setzen vorwiegend an den Stufen der Wertschöpfungskette an, bei der die höchsten Potenziale zu erwarten sind (vgl. Abbildung 27). Die einzelnen Leuchtturmprojekte werden in den nachfolgenden Kapiteln einzeln vorgestellt.

### **7.3.1 Gründung eines Think Tanks für Industrie- und Ressourcenpolitik**

#### ***Hintergrund und Problemstellung***

Die Definition und Verfolgung industriepolitischer Ziele stellt ein wichtiges Kernthema einer erfolgreichen Volkswirtschaft dar. Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Industriegesellschaft ist allerdings auch eine auf umweltpolitischen Gesichtspunkten beruhende Ressourcenpolitik essenziell, was für Industrie und Politik in gleichem Maße Chance und Herausforderung darstellt. So erfordern sich dynamisch verändernde globale und regionale Rahmenbedingungen politischer, gesellschaftlicher oder technologischer Natur fortwährend Anpassungsprozesse, die auf verschiedenen Handlungsebenen analysiert, validiert und in zielgerichtete Maßnahmen überführt werden müssen. Eine erfolgreiche Industrie- und Ressourcenpolitik bildet wiederum die Basis für langfristige Wettbewerbsvorteile.

Die zu ergreifenden Handlungsfelder und Maßnahmen sollten einerseits sektoralen Charakter haben um die strukturellen Gegebenheiten einer Branche (vorwiegend mittelständisch oder großindustriell geprägt) ausreichend zu berücksichtigen, andererseits sollten hinsichtlich strategischer Maßnahmen und Entwicklungen auch branchenübergreifende und interdisziplinäre Aspekte einbezogen werden. Am Ende eines solchen Anpassungsprozesses sollte grundsätzlich ein verträglicher aber zielgerichteter Einsatz industrie- und ressourcenpolitischer Ziele unter Einbeziehung volkswirtschaftlicher, wirtschaftspolitischer, technologischer, rohstoffspezifischer und gesellschaftspolitischer Anforderungen stehen.

Um auf den verschiedenen Handlungsebenen die Weichen hierfür richtig stellen zu können und dabei sowohl kurzfristig erforderlichen Maßnahmen ebenso gerecht zu werden wie langfristig ausgerichteten strategischen Entscheidungen, ist eine fundierte Daten- und Wissensbasis notwendig.

### ***Empfohlene Handlungsansätze***

Die Gründung eines Think Tanks für Industrie- und Ressourcenpolitik, der von mehreren Partnern getragen und sowohl aus Mitteln der öffentlichen Hand als auch der Industrie (VDMA, VCI, usw.) finanziert wird, soll dazu beitragen, gesellschaftspolitische und volkswirtschaftliche Interessen sowie industrie- und ressourcenpolitische Ziele zusammenzuführen. So könnte der Think Tank in Form einer außeruniversitären Forschungseinrichtung als übergeordnetes und interdisziplinäres Netzwerk agieren. Unter Einbindung bereits bestehender und renommierter Institutionen und Forschungseinrichtungen sollen derzeitige und zukünftige, konzertierte Maßnahmen, Aktivitäten und Initiativen im Bereich der volkswirtschaftlich wirksamen Industrie- und Ressourcenpolitik fungieren und Industrie und Politik strategisch beraten.

Die dafür notwendige wissenschaftliche Basis sollte dabei durch eine sektorale Ausrichtung einzelner Fachabteilungen gelegt werden, die im Rahmen ihrer Arbeit die Interessen und Bedürfnisse von KMU (Mittelstandsbezug) bzw. der Großindustrie der jeweiligen Branchen berücksichtigen. Zu möglichen Aufgabefeldern dieser Abteilungen können beispielsweise Themen wie branchenspezifisches Stoffstrommanagement relevanter (strategisch wichtiger) Rohstoffe, die Analyse internationaler Wertschöpfungsketten, die Betrachtung von Zukunftsszenarien oder auch Technologiebewertungen zählen. Darüber hinaus können auf Basis eines regelmäßigen Screenings des notwendigen Handlungs- und Forschungsbedarfs im Bereich der Industrie- und Ressourcenpolitik weitere Forschungsschwerpunkte identifiziert und konkrete Forschungsthemen definiert werden, die im Rahmen von Forschungsverbänden oder industriellen Initiativen ausgearbeitet und koordiniert werden.

Ein weiteres wichtiges Aufgabengebiet des Think Tanks sollte im Bereich der Information und Bildung liegen. So könnten von Seiten des Think Tanks Weiterbildungsmaßnahmen zum Thema Industrie- und Ressourcenpolitik angeboten werden, um die maßgeblichen Akteure auf interdisziplinärer, wissenschaftlicher Basis bei politischen oder unternehmerischen Entscheidungen zu unterstützen. Als möglicher Standort für den beschriebenen Think Tank ist derzeit Baden-Baden im Gespräch.

Um darüber hinaus die Themenschwerpunkte und Leitideen des Think Tanks prominent nach außen zu repräsentieren, ist die Einführung einer wissenschaftlichen Zeitschrift durch den Springer Verlag angedacht. In diesem Forum sollen einerseits themenspezifische Informationen sowie industrie- und ressourcenpolitische Leitgedanken der verschiedenen Branchen im Fokus stehen. Andererseits soll auch diskutiert werden, welche Handlungsansätze und Ziele im Ausland im Bereich der Industrie- und Ressourcenpolitik verfolgt werden.

### 7.3.2 Forschungs- und Entwicklungsverbund Ressourceneffizienz

#### ***Hintergrund und Problemstellung***

Durch die Veröffentlichung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) im Februar 2012 wurden die wichtigen Themen der Ressourceneffizienz und die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen auch von Seiten des BMU und der Bundesregierung erneut in den Fokus von Industrie und Politik gerückt. Mit den Fördermaßnahmen »r<sup>2</sup> - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Rohstoffintensive Produktionsprozesse« und »r<sup>3</sup> - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien« wurde die Forschung auf der Rohstoff-Nachfrageseite bereits erheblich verstärkt und umfangreiche Einspar- und Recyclingpotenziale entwickelt [BMBF 2013]. Auch die BMBF-Fördermaßnahme »r<sup>4</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe«, die sich derzeit in der Bewilligungsphase, respektive der zweiten Antragsphase befindet, widmet sich explizit diesem Themenfeld. Dieses verstärkte Maß an Aufmerksamkeit stellt für Politik, Industrie und Wissenschaft eine gute Möglichkeit dar, Ressourceneffizienz bezogene aber auch recyclingspezifische Themen aufzugreifen, zumal Rohstoffpreise weiterhin volatil sind und der Aspekt einer drohenden Rohstoffverknappung nach wie vor aktuell ist.

Aufgrund seiner Wirtschaftsstruktur mit zahlreichen global agierenden Industrie- und Wirtschaftsunternehmen, einem starken Mittelstand sowie renommierten und fachlich breit gefächerten Forschungs- und Wissenschaftseinrichtungen bieten sich für Baden-Württemberg im Vergleich zu anderen Bundesländern weitreichende Chancen für eine branchenübergreifende und interdisziplinäre Zusammenarbeit im Bereich der Ressourceneffizienz. Mit dem ersten Stakeholder-Workshop, der am 27. Mai 2014 stattfand und gleichzeitig den Start der neu initiierten Akteursplattform Ressourceneffizienz Baden-Württemberg bildete, hat das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft einen wichtigen Grundstein für eine langfristige Verankerung dieses Themas in der Landespolitik gelegt. Das Ziel der teilnehmenden Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft ist es dabei, in den kommenden zwei Jahren in verschiedenen Arbeitskreisen (vgl. Kapitel 7.2) einen Fahrplan zur Verbesserung der Ressourceneffizienz in Baden-Württemberg zu erarbeiten und damit die Landesstrategie Ressourceneffizienz zu konkretisieren und weiterzuentwickeln. Dabei zeigten die Ergebnisse der ersten Arbeitskreistreffen, dass die Identifikation von Ressourceneffizienzpotenzialen mitunter sehr produkt- bzw. produktionsbezogen und somit auch sehr branchenspezifisch ist. Dennoch beinhalten die innerhalb der einzelnen Unternehmen oder Branchen verfolgten Ideen und Ansätze auch zahlreiche Aspekte, die ebenfalls für andere Industriebereiche von Interesse und Nutzen sein können.



### ***Empfohlene Handlungsansätze***

Zur Verfolgung und Umsetzung verschiedener Handlungsansätze wäre deshalb die Initiierung eines baden-württembergischen »Forschungs- und Entwicklungsverbundes Ressourceneffizienz« (erster Vorschlag: FORRes) denkbar, der sich mit Aspekten der Rohstoff- und Ressourceneffizienz befasst. Ein solcher Forschungsverbund ermöglicht eine Betrachtung unterschiedlicher Themengebiete (branchenspezifisch, gesellschaftspolitisch, u. a.) und kann sowohl fachspezifische Fragestellungen berücksichtigen als auch auf übergeordneter Ebene interdisziplinäre Aspekte würdigen und Synergieeffekte generieren. Grundsätzlich könnten die Forschungsinhalte dabei auf die in den Arbeitskreisen der Akteursplattform Ressourceneffizienz identifizierten thematischen Schwerpunkte ausgerichtet sein. Vor dem Hintergrund, dass sich auf Bundesebene themenverwandte Fördermaßnahmen im Auswahlverfahren bzw. in der zweiten Antragsphase befinden (z.B. r<sup>4</sup>), erscheint es sinnvoll im Vorfeld der Initiierung eines Forschungsverbundes eine Status-Quo-Analyse der derzeitigen Forschungsaktivitäten durchzuführen. Hiermit können potenzielle Themenüberschneidungen vermieden werden.

Um per se eine nachhaltige wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung der Forschungsverbundergebnisse zu gewährleisten, sollte die Ausschreibung sehr wirtschaftsnah orientiert (Verbundprojekte zwischen Industrie und FuE-Einrichtungen) und in Form eines Ideenwettbewerbes gestaltet sein. Um im Rahmen des Forschungsverbundes verschiedene Forschungsthemen in ausreichender Tiefe betrachten zu können und auch die Errichtung von Versuchs- und Pilotanlagen zu ermöglichen, sollte das Fördervolumen etwa sechs Millionen Euro betragen (ca. 20 Teilprojekte, Volumen der Einzelprojekte etwa 300 000 Euro), wobei nicht zwangsläufig für jeden thematischen Schwerpunkt (Cluster) gleich viele Projekte vorgesehen werden müssen. Für die Durchführung der jeweiligen Teilprojekte sollte eine Laufzeit von drei Jahren vorgesehen werden.

Zur Koordinierung des Forschungs- und Entwicklungsverbundes wäre darüber hinaus eine Geschäftsstelle vorzusehen, die als Ansprechpartner und Schnittstelle für den Fördermittelgeber und alle Verbundpartner fungiert. Diese Koordinierungsstelle wäre ebenfalls für die Organisation von Verbundtreffen und wiederkehrenden Begutachtungszyklen (Zwischen- und Abschlussbegutachtung) der Teilprojekte sowie die Gewährleistung eines einheitlichen Öffentlichkeitsauftritts der Teilprojekte und der themenspezifischen Cluster verantwortlich. Grundsätzlich erscheinen eine Ansiedlung der Geschäftsstelle und die Bestellung eines projektbegleitenden Gutachterkreises bei o.g. Think Tank sinnvoll.

Zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Land wird zusätzlich die Einrichtung eines Forschungsverbundbegleitenden Graduiertenkollegs vorgeschlagen, das sich aus Doktoranden der jeweiligen Teilprojekte zusammensetzt und ebenfalls durch die Koordinierungsstelle und dem projektbegleitenden Gutachterkreis betreut werden könnte. Zwischen- und Abschlussergebnisse



könnten wiederum in speziellen Foren im Rahmen des Ressourceneffizienz-kongresses präsentiert und somit einem breiten Fachpublikum vorgestellt werden.

### **7.3.3 Zentrale Phosphor-Recyclinganlage**

#### ***Hintergrund und Problemstellung***

Phosphor ist ein essenzieller Rohstoff, der in seinen hauptsächlichen Anwendungen nicht substituierbar ist. Hinsichtlich des weltweiten Phosphor-Endverbrauchs zeigt sich, dass für die Produktion von Lebensmitteln über 90 Prozent des primär aus Rohphosphaten gewonnenen Phosphors verwendet werden. Davon werden 82 Prozent für die Produktion von landwirtschaftlichen Düngern benötigt, weitere 7 Prozent für Additive in Futtermitteln und etwa 3 Prozent für Nahrungsmittelzusätze. Die restlichen 8 Prozent werden als Grundstoffe für die Erzeugung industrieller Produkte wie Reinigungs- und Waschmittel, Pharmazeutika oder Gusslegierungen verwendet. In Deutschland liegt eine etwas veränderte Verbrauchsstruktur vor, wobei den industriellen Anwendungen naturgemäß eine höhere Bedeutung zukommt [LAGA 2012]. Die Verfügbarkeit von Phosphor ist in jedem Fall für die heutigen und kommenden Generationen von entscheidender Bedeutung. Er steht in natürlichen abbauwürdigen Vorräten nur begrenzt zur Verfügung. Die heute bekannten Reserven verteilen sich zu über 91 Prozent auf Risikoländer wie Marokko, Irak, China, Algerien, Syrien, Südafrika und Jordanien. Dabei handelt es sich überwiegend um Sedimente, die zunehmend mit Cadmium und Uran belastet sind. Leicht zugängliche und schadstoffarme Vorräte könnten jedoch schon in etwa 50 Jahren erschöpft sein [Gilbert 2009].

Eine Entkoppelung von dieser Entwicklung kann durch die Rückgewinnung von Phosphor aus sekundären Quellen gelingen. Auch von politischer Seite werden die Weichen in Richtung Phosphor-Recycling gestellt. So soll gemäß Koalitionsvertrag der Parteien der aktuellen Bundesregierung die landwirtschaftliche Verbringung von Klärschlamm zu Dünge Zwecken auf Agrarflächen zukünftig gesetzlich verboten und eine Rückgewinnung von Phosphor und anderen Nährstoffen forciert werden. Eine »Phosphorrecyclingverordnung« (AbfPhosV), die u.a. ein Mitverbrennungsverbot von Klärschlämmen vorsieht, deren Phosphatgehalt einen festgelegten Wert übersteigt, ist auf langfristige Sicht (derzeit besteht hierüber noch kein Konsens) in Vorbereitung. In Übereinstimmung mit der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) plant das BMU die Einführung eines Nährstoffrückgewinnungsgebotes ab einem Phosphorgehalt von mindestens 12 Gramm je Kilogramm Trockenmasse (TM) bzw. einem Phosphatgehalt von 30 Gramm pro Kilogramm Klärschlamm-TM.

Steigende Marktpreise für mineralischen P-Dünger führten in der Vergangenheit zur Entwicklung einer Vielzahl von Phosphorrückgewinnungsverfahren, insbesondere aus den Stoffströmen der Abwasserbehandlung. Geeignete

phosphorhaltige Stoffströme zur P-Rückgewinnung sind neben der Abwasserbehandlung (Abwasser, Klärschlamm, Faulschlamm, Klärschlammasche) auch Rückstände aus der Lebensmittelindustrie und tierische Nebenprodukte (Tiermehl). Obwohl insbesondere für Abwasser, Klärschlamm und Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung vielversprechende Verfahren entwickelt wurden, sind die so gewonnenen Produkte aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Vergleich zur Phosphorgewinnung aus Rohphosphat noch nicht konkurrenzfähig. Dies kann sich schnell ändern, wenn, wie zu erwarten, der weltweite Düngerverbrauch und damit auch die Rohphosphatpreise in den nächsten Jahren wieder deutlich ansteigen werden.

### ***Empfohlene Handlungsansätze***

Von der Errichtung einer zentralen Phosphor-Recyclinganlage könnte das Land Baden-Württemberg in vielerlei Hinsicht profitieren. Neben einer Senkung der Importabhängigkeit und Sicherung der Rohstoffversorgung ermöglicht die großtechnische Umsetzung eines geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahrens in einer zentralen Großanlage die Nutzung von Skaleneffekten. Das bisher bestehende Problem der mangelnden Wirtschaftlichkeit könnte so behoben und der zurückgewonnene Phosphor zu markt- und konkurrenzfähigen Preisen angeboten werden. Darüber hinaus könnte das Land Baden-Württemberg im Hinblick auf die von politischer Ebene geplanten Maßnahmen proaktiv agieren, eine Vorreiterrolle im Bereich des Phosphor-Recyclings einnehmen und sich zusätzlich einen erheblichen Know-how-Vorsprung erarbeiten.

In der Planungsphase sollte zunächst ein Assessment zur Auswahl geeigneter Technologien erfolgen. Die Auswahl der P-Rückgewinnungsverfahren könnte sich dabei vorwiegend an Verfahren für Klärschlamm und Klärschlammaschen orientieren, da diese neben der Möglichkeit auch andere phosphorhaltige Abfallströme, wie z.B. Tiermehl mitverarbeiten zu können, die höchsten Phosphorkonzentrationen und Verfahrenswirkungsgrade aufweisen. Zudem befindet sich der Entwicklungsstand dieser Verfahren auch kurz vor der praktischen Anwendung (Demoanlagen). Des Weiteren sollten bei der Auswahl der Technologien die bereits in Baden-Württemberg gewonnenen Erkenntnisse aus Pilot- und Forschungsprojekten (z.B.: Verbandskläranlage Abwasserzweckverband Offenburg; Interkommunales Pilotprojekt zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm) Berücksichtigung finden. Die aus der Vorauswahl resultierenden bevorzugten Verfahrensvarianten können dann in einem weiteren Schritt vorab im Pilotmaßstab getestet werden, um final ein Verfahren für die großtechnische Umsetzung auszuwählen.

Darüber hinaus erscheint es sinnvoll neben der Errichtung einer großtechnischen Anlage zur P-Rückgewinnung am Standort auch die Einrichtung eines Technikums

vorzusehen, in dem parallel zum laufenden Betrieb der Großanlage kontinuierlich alternative Technologien erprobt und auch der Einsatz weiterer relevanter Stoffströme (z.B. Tiermehl, Biomasseaschen, Rückstände aus der Phosphatierung) hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit getestet werden können. Vielversprechende Ansätze scheitern oft an diesem Punkt der Umsetzung, da potenzielle Betreiber aufgrund der unsicheren Marktpreisentwicklung nicht in Vorleistung treten und Weiterentwicklung der Verfahren notwendigen Erfahrungen aus einem längeren Praxisbetrieb fehlen.

Zusätzlich sollten sämtlich am Standort realisierten Verfahren (Großanlage und Technikumsverfahren) einer Nachhaltigkeitsbetrachtung unterzogen werden. Hierfür müsste für die Rückgewinnungsverfahren eine ganzheitliche Bilanzierung des Energie- und Ressourcenaufwandes durchgeführt werden, die abschließend mit den Bilanzdaten von Mineraldüngern verglichen werden.

### **7.3.4 Demontagefabrik im urbanen Raum**

#### ***Hintergrund und Problemstellung***

Während Recycling bei Massenmetallen bereits einen wesentlichen Beitrag zur globalen Versorgung liefert, liegen die Recyclingraten für Hochtechnologiemetalle zumeist bei weniger als einem Prozent. Elektro- und Elektronikaltgeräte stellen eine sehr heterogene und komplex zusammengesetzte Abfallgruppe dar. Gerätearten wie Waschmaschinen, Fernseher, und Kühlschränke zählen ebenso dazu wie Notebooks, Tablet-PCs oder Smartphones. Dabei bergen insbesondere die kleinformatischeren Geräte und Bauteile wie Smartphones, Tablets und Leiterplatten aufgrund ihrer hohen Wertstoffdichte ein erhebliches Potenzial an Massenrohstoffen aber auch die zu eingangs erwähnten und als potenziell versorgungskritisch eingeschätzten Hochtechnologiemetalle. Wie groß das Potenzial ist, wird deutlich, wenn man vergleicht wie viel abbauwürdiges Erz bzw. wie viele Tonnen Elektroschrott notwendig wären um jeweils eine Tonne eines bestimmten Rohstoffes zu gewinnen. So wären beispielsweise sowohl zwei Tonnen Erz als auch zwei Tonnen Elektroschrott nötig, um eine Tonne Eisen zu gewinnen. Für die Gewinnung einer Tonne Kupfer läge der Bedarf bei 200 Tonnen Erz, jedoch nur bei 14 Tonnen Elektroschrott und für eine Tonne Gold müssten 200 000 Tonnen Erz im Vergleich zu 70 000 Tonnen Elektroschrott verwendet werden [Fröhlich 2010].

Diese Potenziale werden derzeit jedoch nur bedingt ausgeschöpft. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und auf allen Ebenen der Verwertungskette anzusiedeln. An erster Stelle steht dabei eine unzureichende Erfassungsrate für ausgediente Elektro- und Elektronikaltgeräte. So gehen Schätzungen davon aus, dass jährlich etwa ein bis zwei Kilogramm Elektroschrott pro Einwohner unsachgemäß über

den Restmüll entsorgt werden. Aber auch die illegale Verbringung von nicht mehr verwendbaren Altgeräten ins ost- oder nichteuropäische Ausland führen zu erheblichen Mengenabflüssen. Aber selbst, wenn die Geräte in die für sie vorgesehenen Verwertungswege gelangen, garantiert dies nicht zwangsläufig auch eine optimale Ausbeute der in den Geräten enthaltenen Wertstoffe. So gehen derzeit noch viele Hightechmetalle während des Aufbereitungsprozesses verloren.

Letztendlich besteht auch in Bezug auf die der Aufbereitung angeschlossenen Recyclingprozesse noch Optimierungsbedarf. So findet faktisch für bestimmte als potenziell versorgungskritisch eingestufte Metalle wie Tantal, Indium oder Gallium in Deutschland noch kein Recycling statt, was sowohl in ökonomischer als auch ökologischer Hinsicht bedenklich ist.

### ***Empfohlene Handlungsansätze***

Der Re-Industrialisierung des urbanen Raumes wird eine große Bedeutung beigemessen. Sie wird als Industrietrend und wichtiger Bestandteil der Stadtplanung und -entwicklung moderner Städte angesehen. Die Errichtung einer Demontagefabrik für Elektro- und Elektronikaltgeräte im urbanen Raum würde zum einen diesem Trend gerecht werden und entgeht zum anderen den Problemen, die vergleichbare Einrichtungen im ländlichen Raum oder außerhalb der Stadt gelegene Industriegebiete haben (z.B. Versorgungslogistik).

Darüber hinaus ermöglicht die auf einen festgelegten Raum beschränkte Betrachtungsweise des Themas der Elektroaltgeräteverwertung eine gezielte Optimierung der einzelnen, zuvor als defizitär beschriebenen, Prozessschritte der Erfassung und Aufbereitung. So könnten innovative – auf die in der Demontageanlage zu behandelnden Sammelgruppen und Gerätekategorien ausgerichtete – Sammelsysteme erprobt und hinsichtlich einer Erhöhung der Erfassungsquote bewertet und optimiert werden. Etwa 70 Prozent der Bevölkerung lebt in urbanen Räumen. Dies führt dazu, dass gerade hier auch ein Großteil des werthaltigen Hightech-Abfalls anfällt. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass im urbanen Raum Rücknahmekampagnen und Sammelaktionen für spezielle Stoffströme zu einer verbesserten Abschöpfung wertstoffhaltiger Sammelgruppen führen. Einen weiteren Vorteil bilden die kurzen Wege im innerstädtischen Bereich, was zu optimierten Logistikketten im Hinblick auf die Erfassung und Verbringung zur Demontageanlage führt. Um der zuvor beschriebenen Problematik der Verluste kritischer Rohstoffe durch unzureichende Aufbereitung entgegenzuwirken, sollte darüber hinaus die Entwicklung und Erprobung automatisierter Erkennungs- und Entstückungsverfahren weiter vorangetrieben werden. Letztendlich können iterativ immer wieder einzelne Prozessschritte der Erfassung und Aufbereitung optimiert, erprobt und bewertet werden. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse und Technologien können dann wiederum auf andere Stoffgruppen oder auch neu zu errichtende Standorte übertragen werden.

Während in der Vergangenheit die Lärm- und Emissionsintensität der Industrie zu einer Standortverlagerung in Außenbereiche der Städte führte, ermöglichen heutzutage neue emissionsarme Technologien und bauliche Maßnahmen eine neuerliche Ansiedlung bzw. Rückverlagerung industrieller Anlagen in den städtischen Bereich. Um den individuellen Voraussetzungen des Landes gerecht zu werden, erscheint es sinnvoll sich in einem ersten Schritt auf die Separierung und Rückgewinnung von mindestens drei Rohstoffen der Top-10-Liste zu beschränken. Dies könnten beispielsweise Tantal oder Magnetwerkstoffe sein, für die unter Berücksichtigung des urbanen Einzugsgebietes auch rohstoff- bzw. baugruppen-spezifische Recyclingziele definiert und verfolgt werden können.

### **7.3.5 Effizienteste Rohstoff-Mine der Welt**

#### ***Hintergrund und Problemstellung***

Die Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen ist mit erheblichen ökologischen und sozialen Auswirkungen verbunden. Wie groß diese Auswirkungen tatsächlich sind ergibt sich zum einen aus dem zu fördernden Rohstoff selbst und den zur Aufbereitung dieses Rohstoffs notwendigen Technologien und Verfahren. Zum anderen hängen die Folgen der Rohstoffförderung aber auch in starkem Maße von dem Land oder Region ab, in der der Abbau erfolgt. Ein rasant steigender Rohstoffbedarf führt zwangsläufig zu einem ebenso dynamischen Anstieg der mit Rohstoffgewinnung verbundenen negativen Folgen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass Erzqualitäten und die in den Erzen enthaltenen Metallgehalte perspektivisch stetig sinken und ein immer größerer Aufwand für deren Gewinnung und Aufbereitung betrieben werden muss.

Betrachtet man die durch die Primärrohstoffgewinnung verursachten, teils immensen, Umweltauswirkungen wie den kumulierten Rohstoff- und Energieaufwand oder den Wasserverbrauch wird deutlich, dass hier noch enorme Effizienzpotenziale schlummern. Hierauf verweist auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen in seinem Umweltgutachten aus dem Jahr 2012. Diese resultieren vorwiegend aus technologischen Gegebenheiten bzw. ökonomischen Erwägungen. So konzentrieren sich globale Bergbauaktivitäten derzeit überwiegend auf die Gewinnung von Hauptmetallen wie Kupfer, Nickel oder Blei. Ein großer Teil der potenziell versorgungskritischen und wirtschaftsstrategischen Rohstoffe wird jedoch als Neben- oder gar Koppelprodukt gewonnen, die nur über eine limitierte oder mangelhafte Produktionsinfrastruktur verfügen und deren Gewinnung häufig unwirtschaftlich ist. Des Weiteren geht eine Vielzahl bedeutender Elemente als Reststoff in Form von Aufbereitungsabgängen oder Emissionen bei den Primärgewinnungsprozessen verloren.

Die Notwendigkeit einer effizienteren Rohstoffgewinnung wurde inzwischen auch in den Förderländern erkannt. So streben beispielsweise Länder wie Australien, Brasilien oder China eine Ausweitung der Forschungsförderung mit Fokus auf

einer effizienten und ressourcenschonenden Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen sowie die Durchführung von Demonstrationsprojekte mit der Industrie an [TU Clausthal und BGR 2013].

Auch das BMBF hat bezüglich der Erhöhung der Ressourceneffizienz im Bereich der Primärrohstoffgewinnung im Rahmen seiner Fördermaßnahme »r<sup>4</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe« einen thematischen Schwerpunkt gesetzt, was verdeutlicht, dass das Thema auch für Deutschland zukünftig verstärkt von Bedeutung sein wird.

### ***Empfohlene Handlungsansätze***

Die Gewinnung, Aufbereitung und Veredelung von Rohstoffen beruht auf komplexen verfahrenstechnischen Prozessketten und erfordert unter anderen fundierte Detailkenntnisse im Bereich der Geologie/Geotechnik, des Maschinenbaus, chemischer Prozesse oder auch der Umwelttechnik. Ein profundes branchenspezifisches Wissen führt jedoch im Bereich der Rohstoffgewinnung erst dann zum Erfolg, sprich zufriedenstellenden Ausbeuten, wenn die von den einzelnen Disziplinen zur Verfügung gestellten Technologien oder Kenntnisse aufeinander abgestimmt sind und sich ideal in eine Prozesskette einfügen lassen.

Gerade im Bereich des Maschinenbaus, der chemischen Industrie und der Umwelttechnik ist das Land Baden-Württemberg gut aufgestellt, und beheimatet zahlreiche, auch global agierende Unternehmen, die über entsprechendes Know-how und Technologien verfügen. Auch wenn die primäre Gewinnung der im Rahmen der Studie betrachteten Rohstoffe nicht in Baden-Württemberg stattfindet, stellt die Optimierung dieser Prozesse ein erhebliches Marktpotenzial für Unternehmen des Landes an internationalen Märkten bzw. Minenstandorten dar. Vor diesem Hintergrund wäre eine Gemeinschaftsinitiative von VMDA, VCI, Umwelttechnik BW und verschiedenen Forschungseinrichtungen und Hochschulen denkbar, die eine möglichst effiziente Rohstoffgewinnung zum Ziel ihrer Arbeiten macht (effizienteste Rohstoff-Mine der Welt mit Know-how und Technologie aus Baden-Württemberg).

Dabei könnten zunächst in Form eines Planspiels branchenübergreifend einzelne Prozessschritte der primären Rohstoffgewinnung eines bestimmten Rohstoffes analysiert und der notwendige Entwicklungsbedarf abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse könnten dann wiederum genutzt werden um Technologien zur Primärrohstoffgewinnung gezielt (weiter) zu entwickeln. Um einen besonderen Nutzen für Baden-Württemberg zu generieren, sollten dabei zunächst einzelne Rohstoffe der Top-10-Liste im Fokus der Aktivitäten stehen.

Hier könnte zudem berücksichtigt werden, welcher der Top-10-Rohstoffe in einem Land gefördert wird, mit dem bereits wirtschaftsstrategische Partnerschaften

bestehen und mit dem eine Kooperation im Bereich der Primärrohstoffgewinnung vorstellbar wäre. Aufgrund der bestehenden spezifischen Forschungskompetenz im Land könnten im Rahmen der Gemeinschaftsinitiative neben den konventionellen Ansätzen zur Primärrohstoffgewinnung auch alternative Ansätze wie Bio-mining überprüft werden.

## **7.4 Weitere Maßnahmen und Roadmap**

Während die in Kapitel 7.3 beschriebenen Leuchtturmprojekte die inhaltlichen Schwerpunkte der künftigen Aktivitäten auf Landesebene darstellen, sind darüber hinaus weitere Handlungsansätze und Maßnahmen von Bedeutung, die in diesem Kapitel näher erläutert werden sollen. Diese werden zunächst kurz im Text inhaltlich dargestellt. Die wichtigsten Aspekte werden abschließend in einer Graphik zusammengefasst und verschiedenen Handlungsebenen (flankierend, politisch, technologisch) zugeordnet.

### **7.4.1 Lenkungswirkung rohstoffpolitischer Steuerungsinstrumente**

Die in Kapitel 7.1 dargestellte Tabelle benennt mehrere Instrumente ordnungsrechtlicher Art bzw. ökonomisch-fiskalische Anreizmechanismen, die zur Erreichung der Entkopplungsziele von Rohstoffverbrauch und Wohlfahrt Anwendung finden können. Hierunter fallen beispielsweise Regulierungsinstrumente wie die Einführung einer Materialinput- oder Rohstoffentnahmesteuer oder auch Öko-Sonderabgaben auf rohstoffintensive Produkte oder die Subventionierung rohstoffarmer Produkte. Um diese Instrumente sinnvoll und auch glaubwürdig implementieren zu können, ist es zwingend erforderlich, vorab deren Lenkungswirkung kritisch zu hinterfragen und eine wirkungsorientierte Folgenabschätzung durchzuführen, um eine belastbare Informationsgrundlage hinsichtlich Zielen, Maßnahmen und Auswirkungen der jeweiligen Regulierungsinstrumente zu schaffen. Dies könnte in einem ersten Schritt für zwei bis drei ausgewählte Steuerungsinstrumente unter Berücksichtigung der im Rahmen der Studie gewonnenen Erkenntnisse für das Land Baden-Württemberg dezidiert untersucht werden.

### **7.4.2 Ausweitung der Datenerhebung zu gewerblichen Abfällen unter Berücksichtigung / Anpassung des Abfallrechts**

Bei der Untersuchung der Wertstoffgehalte in gewerblichen Abfällen wurde deutlich, dass hier in einigen Abfallarten erhebliche Potenziale stecken. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Wertstoffgehalte der gewerblichen Abfälle die in Kapitel 6.1.2 angegebenen Werte übersteigen. Dies liegt zum einen daran, dass auf Basis der Erhebungssystematik zu gewerblichen Abfällen nicht die tatsächliche Gesamtmenge an Abfällen erfasst wird und für die einzelnen Branchen unterschiedliche Repräsentationsgrade vorliegen. Zusätzlich wird nicht ausgewiesen, in welchem Umfang die anfallenden Mengen innerhalb der Betriebe



bereits wieder in den Produktionsprozess eingeschleust werden. Dass dies der Fall ist, belegt allerdings die Tatsache, dass eine erhebliche Diskrepanz zwischen im Land erzeugter und im Land entsorgter Abfallmenge besteht. Zum anderen verhindert die teils lückenhafte und fast ausschließlich auf die Identifikation von Schadstoffen ausgerichtete Praxis der Abfallanalytik eine genauere Quantifizierung der tatsächlich in den Abfallströmen enthaltenen Potenziale. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Ausweitung der Datenerhebung angeraten. Dies gilt sowohl im Hinblick auf eine Verbesserung der Datenbasis der gewerblichen Abfallstatistik (höhere Repräsentationsgrade, Anteil der innerbetrieblich wieder eingesetzten Abfälle) als auch in besonderem Maße für eine Ausweitung von Abfallanalysen. Diese sollten nicht weiter nur auf die Identifikation enthaltener Schadstoffe ausgerichtet sein, sondern um den Aspekt potenziell enthaltener Wertstoffgehalte erweitert werden. Erst dann sind eine umfassende Potenzialbewertung und eine Ableitung von Substitutionspotenzialen möglich. Vor diesem Hintergrund sollte eine entsprechende Anpassung des Abfallrechts erwogen werden, die den zuvor genannten Aspekten Rechnung trägt.

### **7.4.3 Erkennung und Vermeidung dissipativer Verluste**

Die Umweltökonomische Gesamtrechnung weist Daten zum dissipativen Gebrauch von Produkten aus. Diese Daten sind jedoch nur punktuell erfasst und wenig bis gar nicht differenziert. Wie groß der Verlust wertvoller Rohstoffe durch dissipative Anwendungen tatsächlich ist, wurde bisher nur im Rahmen einiger weniger Einzelbetrachtungen untersucht. So wurden entsprechende Zusammenhänge am Beispiel der Rohstoffe Kupfer, Aluminium und Silber in so genannten RFID-Tags in einem vom Umweltbundesamt geförderten Vorhaben des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) beleuchtet. Während sich diese dissipative Verwendungsform der Elemente im Jahr 2007 noch auf wenige Tonnen beschränkte, könnte die in die Abfallwirtschaft eingetragene Menge unter bestimmten Annahmen bis 2022 auf nahezu 3 000 Tonnen ansteigen. Insbesondere für Silber könnte demnach die dissipative Verwendung in RFID-Tags spürbar zur Erhöhung der Verfügbarkeitsrisiken führen [UBA 2009]. Auch korrosionsbedingte (Wert-)Verluste sind erheblich und belaufen sich in der Wirtschaft Deutschlands trotz bereits durchgeführter Korrosionsschutzmaßnahmen auf ca. drei bis vier Prozent des Bruttoinlandsprodukts und erreichen damit einen Betrag von ca. 100 Mrd € im Jahr [AiF 2011]. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, Rahmenbedingungen in Form einer umfassenden Datenbasis zu schaffen, um dissipative Systemverluste perspektivisch auf ein notwendiges Minimum begrenzen zu können und damit Rohstoffverlusten vorzubeugen. Darüber hinaus könnten auf Basis dieser Daten und Informationen Innovationspotenziale identifiziert werden, die sich aus dem Ziel der Vermeidung dissipativer Verluste ergeben. Hierzu zählen beispielsweise Konzepte zur Rückgewinnung, Vermeidung oder Substitution von Rohstoffen in bestimmten Anwendungen und Produkten.



#### **7.4.4 Einschleusung von Sekundärrohstoffen in Primärprozesse**

Bisherige Verfahren zur Rückgewinnung zahlreicher Rohstoffe zielen darauf ab, gesonderte Prozess- und Produktionsketten für einzelne Stoffströme zu entwickeln (vgl. Kapitel 6.2). Die stoffliche Komplexität der zu verarbeitenden Stoffströme und die oftmals dissipative Verteilung relevanter Elemente in den Stoffströmen erfordern dabei sehr aufwendige und vielstufige Prozesse. Anstelle der Entwicklung neuer Verfahren zur Rückgewinnung versorgungskritischer Rohstoffe sollten vermehrt bewährte und vor allem auch wirtschaftliche Technologien des Primärsektors adaptiert und genutzt werden, um diese Rohstoffe über den primären Produktionsprozess zu gewinnen (Beispiel Wolfram). Auf Basis definierter Anforderungsparameter an Inputströme könnte vorab eine Aufbereitung bzw. Konfektionierung von Stoffströmen erfolgen, die dann wiederum an definierten Schnittstellen eingeschleust werden, um den primären Produktionsprozess zu durchlaufen. Durch die Einschleusung von Sekundärrohstoffen in den Primärprozess könnten im Vergleich zu den bisher zum Einsatz kommenden komplexen und aufwendigen Aufbereitungssträngen und Rückgewinnungsverfahren, Prozessschritte eingespart und so die die Recyclingverfahren ökonomischer gestaltet werden. Dabei soll durch die beschriebene Vorgehensweise nicht nur eine Optimierung des Recyclings erfolgen. Darüber hinaus kann über eine systematische Konfektionierung der einzuschleusenden Stoffströme eine gezielte Anreicherung primärer Rohstoffquellen erfolgen, was eine Aufwertung der Primärlagerstätte bedeuten würde.

#### **7.4.5 Konzentration auf wertstoffhaltige Abfallfraktionen**

Bei der Untersuchung der gewerblichen Abfälle wurde deutlich, dass insbesondere Abfallarten wie Schlacken, Aschen, Stäube und Schlämme über erhebliche Wertstoffpotenziale verfügen. Da die Analysedaten, auf denen die Potenzialabschätzungen beruhen, teilweise sehr lückenhaft sind und insbesondere für kritische Rohstoffe gar nicht ausgewiesen werden, kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Wertstoffgehalte noch deutlich höher liegen könnten. Hier wäre es in einem ersten Schritt notwendig für die relevanten Abfallströme umfangreiche Analysen durchzuführen, um die Potenziale verlässlich quantifizieren zu können. Darüber hinaus müssen geeignete Verfahren entwickelt und erprobt werden, die es ermöglichen, die Wertstoffe aus den Abfallströmen zurück zu gewinnen (Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren). Hierfür können entweder bestehende Verfahren zum Einsatz kommen, oder neue Verfahren entwickelt werden.

#### **7.4.6 Weitere Priorisierung der Rohstoffe**

Grundsätzlich ist es zweckmäßig zukünftige Maßnahmen auf die im Rahmen der Studie identifizierten Top-10- Rohstoffe zu fokussieren, wobei eine weitere Priorisierung innerhalb der Top-10-Rohstoffe, die sich an relevanten rohstoff-

spezifischen Aspekten orientiert, sinnvoll erscheint. So sind die in der Top-10 geführten Rohstoffe der roten Gruppe zwar per se für Baden-Württemberg von besonderer Bedeutung, allerdings können bei der Betrachtung noch weitere Merkmale Berücksichtigung finden, die eine besondere Relevanz begründen. So könnten beispielsweise Antimon (bzw. auch Molybdän und Wolfram) aufgrund ihrer geringen Reichweite oder die Platinmetalle in Folge der mit ihrer Förderung verbundenen negativen Umweltwirkungen und ihrer hohen Human- und Ökotoxizität besonders in den Fokus der weiteren Betrachtungen gerückt werden. Maßnahmen die gezielt auf diese Rohstoffe abzielen, sei es im Hinblick auf deren Einsparung, Substitution oder einer Verbesserung der Primärgewinnung oder des Recyclings, verfügen über eine große Hebelwirkung.

#### **7.4.7 Verbesserung der Datenlage**

Während der Ausarbeitung der Studie wurde deutlich, dass sich die Datenlage auf nahezu allen Betrachtungsebenen als mehr oder weniger lückenhaft darstellt. Dies gilt in gleichem Maße für wirtschaftsstatistische Daten wie für rohstoffspezifische Informationen. Dabei wären insbesondere Informationen zu Umsatz bzw. Bruttowertschöpfung von (Teil-)Branchen, Produktionsstatistiken, Außenhandelsstatistiken oder Daten zum Rohstoffverbrauch der Industrie essenziell, wenn es um die Ermittlung der Bedeutung eines Rohstoffs für das Land Baden-Württemberg geht. Auch eine Ableitung der Rohstoffproduktivität des Landes, die als wichtige Orientierungsgröße dient um zu überprüfen, wie effizient abiotische Primärrohstoffe eingesetzt werden, um das jeweilige Bruttoinlandsprodukt zu erwirtschaften, ist auf der vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Aber auch die zuvor erwähnten rohstoffspezifischen Daten wie Informationen zu Reserven, Ressourcen bzw. ökobilanzielle Parameter sind teilweise ungenügend, was eine finale Bewertung der Kritikalität der Rohstoffe erschwert. Vor diesem Hintergrund erscheint eine gezielte Ausweitung der Datenerfassung und eine verbesserte Datenaufbereitung auf Landesebene angeraten, wobei Aspekten wie Geheimhaltungsbelangen oder strategischen Gesichtspunkten ausreichend Sorge getragen werden muss.

#### **7.4.8 Erweiterung der Fact-Sheets auf weitere Rohstoffe oder Stoffströme**

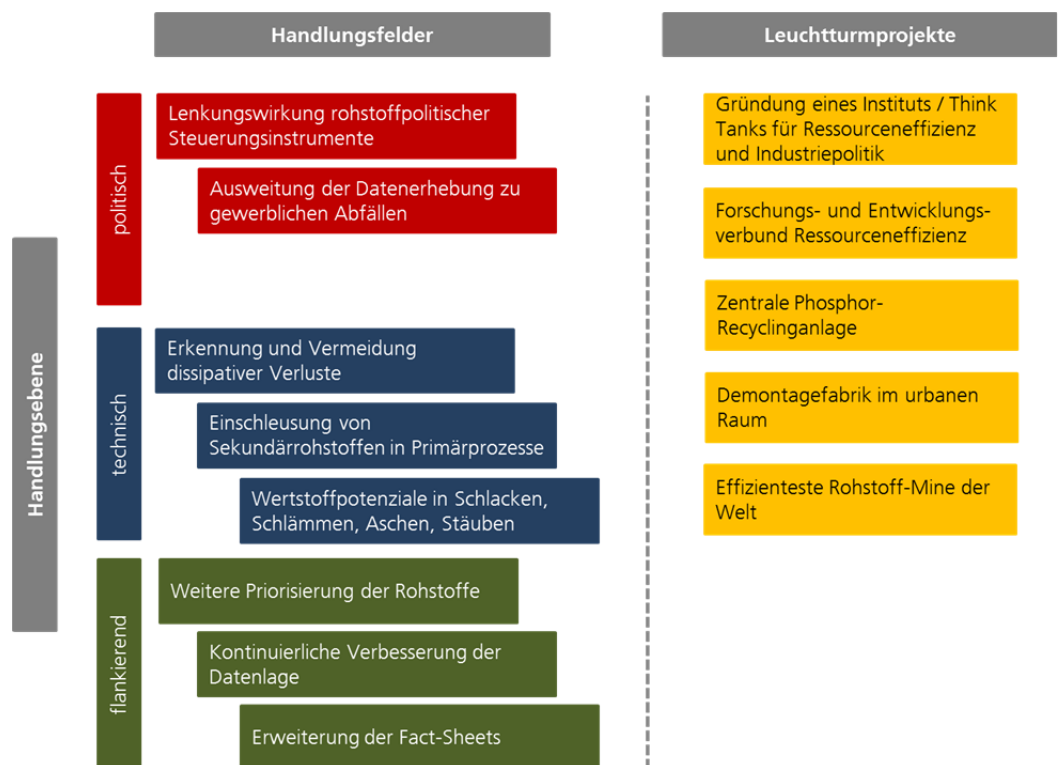
Die große Resonanz im Nachgang zum 1. Stakeholder-Workshop machte deutlich, dass die in der Anlage 1 dargestellten Fact-Sheets aufgrund ihres umfassenden Informationsgehaltes sowohl von Vertretern der Industrie, von Verbänden und auch der Politik als wertvolle Informationsquelle angesehen werden. Die darin enthaltenen Daten können dazu beitragen, Entscheidungsträger bei politischen oder flankierenden Maßnahmen sowie bei unternehmerischen Planungen und Entscheidungen zu unterstützen. Im Rahmen des Projektes beschränkte sich die Ausarbeitung dieser Fact-Sheets ausschließlich auf die identifizierten Top-10-Rohstoffe. Aufgrund der beschriebenen Vorzüge dieser Datenaufbereitung sollte eine Erweiterung der Fact-Sheets auf die übrigen Rohstoffe des Rohstoff-Pools

(gelbe und grüne Kategorie), auf Massenrohstoffe (Kupfer oder Eisen) oder auch relevante Stoffströme (Klärschlamm, mineralische Baustoffe) überdacht werden. Hierdurch würde auch der Tatsache Rechnung getragen, dass im Zuge der Arbeitskreistreffen gerade auch diese Rohstoffe und Stoffströme als relevant erachtet wurden.

### 7.4.9 Zusammenfassende Übersicht

Abschließend sind die in diesem Kapitel dargestellten Handlungsansätze gemeinsam mit den in Kapitel 7.3 beschriebenen Leuchtturmprojekten in nachfolgender Graphik zusammenfassend dargestellt und verschiedenen Handlungsebenen zugeordnet.

**Abbildung 28:**  
Handlungsfelder und Leuchtturmprojekte.



## Quellen

- Abfallbilanz 2010      Abfallbilanz 2010: (Hrsg.) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. 2010.
- Achzet 2012      Achzet, B.: Empirische Analyse von preis- und verfügbarkeitsbeeinflussenden Indikatoren unter Berücksichtigung der Kritikalität von Rohstoffen: disserta Verlag. Hamburg 2012.
- adelphi und UBA 2011      adelphi; UBA: Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Konfliktrisiken bei Zugang und Nutzen von Rohstoffen (Teilbericht 1). Unter Mitarbeit von Dennis Tänzler, Meike Westerkamp und adelphi. Hg. v. adelphi und Umweltbundesamt (UBA). Dessau 2011.
- adelphi und UBA 2014      adelphi; UBA: Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Risikoreiche Zukunftsrrohstoffe? Fallstudie und Szenarien zu China und seltene Erden (Teilbericht 3.4). Unter Mitarbeit von Lukas Rüttinger und Moira Feil. Hg. v. adelphi und Umweltbundesamt (UBA). Dessau 2010.
- AGLV 2013      Arbeitsgemeinschaft Lampen-Verwertung: Verwertbare Bestandteile von Altlampen (Infografik). Online verfügbar unter [http://www.lightcycle.de/fileadmin/user\\_upload/Bilder\\_neu/Infografiken\\_Ansichtsbilder/LC\\_IG\\_Verwertungsgrafik\\_Ansicht.jpg](http://www.lightcycle.de/fileadmin/user_upload/Bilder_neu/Infografiken_Ansichtsbilder/LC_IG_Verwertungsgrafik_Ansicht.jpg), zuletzt geprüft am 13.10.2014.
- AiF 2011      Allianz Industrie Forschung (AiF), Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA): Effizienter Korrosionsschutz durch Nanopartikel, Projektflyer. Köln 2011.
- AK VGRdL 2014      Arbeitskreis »Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder«: Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland 1991 bis 2013. Reihe 1, Band 1. Im Auftrag der Statistischen Ämter der 16 Bundesländer, des Statistischen Bundesamtes und des Bürgeramtes, Statistik und Wahlen. Frankfurt a. M. 2014.
- Albrecht et al. 2000      Albrecht, S.; Cymorek, C.; Andersson, K.; Reichert, K.; Wolf, R.: Tantalum and Tantalum Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.

- Anderson 2011 Anderson, S. T.: Germany. The Mineral Industry of Germany. In: Minerals Yearbook – 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- Anderson et al. 2012 Anderson, Corby G.: The metallurgy of antimony. In: Chemie der Erde - Geochemistry 72, S. 3–8. 2012.
- Antrekowitsch et al. 2009 Antrekowitsch, H.; Schnideritsch, H.; Konetschnik, S.: Metallurgisches Recycling von metallhaltigen Reststoffen und Schrotten - eine verfahrenstechnische und rohstoffpolitische Herausforderung. In: Recycling und Rohstoffe. Band 2. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK Verlag. Neuruppin 2009.
- Arumugavelu 2011 Arumugavelu, J.: A process for recycling of tungsten carbide alloy. Angemeldet durch Arumugavelu, Jayakannan am 07. Dezember 2010. Anmeldenr: IB 2010055620. Veröffentlichungsnr: WO 2011083376 A1. 2011.
- AVV 2001 Abfallverzeichnis – Verordnung Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis. Bundesrepublik Deutschland: Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 22 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.
- Awuah-Offei und Adekpedjou 2011 Awuah-Offei, K.; Adekpedjou, A.: Application of life cycle assessment in the mining industry. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 16 (1). 2011.
- Bao et al. 2010 Bao, Z.; Qian, L.; Chunli, P.; Jiafeng, Z.; Xuan, C.: Method for separating and recycling valuable metal from pressure leached high sulphur slag. Angemeldet durch Central South University am 24. März 2009. Anmeldenr: CN 200910042942. Veröffentlichungsnr: CN 101503761 B. 2010.
- Baraniej und Bohomaz 2008 Baraniej, V. M.; Bohomaz, A. V.; Davydov, S. I.; Riabets, M. I.; Stavytskyi, Y. L.; Teslevych, S. M. et al.: Method for Germanium recovery from fly ash. Angemeldet durch Zaporzhye Titanium and Magnesium Combine am 10. Dezember 2007. Anmeldenr: 2007013865. Veröffentlichungsnr: UA 31484 U. 2008.

- Bedinger 2012      Bedinger, G. M.: Titanium [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Bertau et al. 2013      Bertau, M.; Müller, A.; Fröhlich, P.; Katzberg, M.: Industrielle Anorganische Chemie. 4. Aufl. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2013.
- BeST 2014      BeST: Recycling of Beryllium. Hg. v. Beryllium Science & Technology Association (BeST). Brüssel, 2014. Online verfügbar unter <http://beryllium.eu/about-beryllium-and-beryllium-alloys/facts-and-figures/recycling-of-beryllium/>, zuletzt geprüft am 09.09.2014.
- BGR 2007a      Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Hannover 2007.
- BGR 2007b      Wagner, M.; Franken, G.; Martin, N.; Melcher, Frank, Vasters, Jürgen; Westphale, E.: Zertifizierte Handelsketten im Bereich mineralischer Rohstoffe. Projektstudie. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2007.
- BGR 2013      BGR: Energiestudie 2013. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen (17). Hannover 2013.
- BGS 2009a      BGS: Cobalt. Unter Mitarbeit von Sarah Hannis und Tom Bide. Hg. v. British Geological Survey (BGS). 2009.
- BGS 2011a      BGS: Niobium-tantalum. Unter Mitarbeit von Richard Shaw, Kathryn Goodenough, Gus Gunn, Teresa Brown und Debbie Rayner. Hg. v. British Geological Survey (BGS). 2011.
- BGS 2011b      BGS: Rare Earth Elements. Unter Mitarbeit von Abigail Walters, Paul Lusty und Amanda Hill. Hg. v. British Geological Survey (BGS). 2011.
- BGS 2011c      Tungsten. Unter Mitarbeit von Peter Pitfield, Teresa Brown, Gus Gunn und Debbie Rayner. Hg. v. British Geological Survey (BGS). 2011.
- Binnemans et al. 2013      Binnemans, K.; Jones, P. T.; Blanpain, B.; van Gerven, T.; Yang, Y.; Walton, A.; Buchert, M.: Recycling of rare earths: a critical review. In: Journal of Cleaner Production 51. 2013, S. 1–22.

- BiPRO 2013 Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen (BiPRO): Entwurf des Abfallwirtschaftsplans Baden-Württemberg – Teilplan Siedlungsabfälle. 2013.
- Blaser 2012 Blaser, F., Castelanelli, S., Wäger, P. und Widmer, R.: Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. Seltene Metalle in Elektro- und Elektronikgeräten. Vorkommen und Rückgewinnungstechnologien. Bundesamt für Umwelt. Bern 2012.
- Bleymüller et al. 1996 Bleymüller, J.; Gehlert, G.; Gülicher, H.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. 10. überarb. Aufl. München 1996.
- Blossom 2004 Blossom, J. W.: Molybdenum recycling in the United States in 1998. In: Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1196-A-Z-AA. Hg. v. Sibley, S. F. Reston 2004.
- BMBF 2013 BMBF Bekanntmachung des Bundesministeriums zur Fördermaßnahme »r<sup>4</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung und Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe« für Bildung und Forschung. Bonn 2013.
- BMU 2010 BMU: Wasser, Abfall, Boden – Abfallwirtschaft – Statistiken. Elektro- und Elektronikaltgeräte - Statistik 2009 und 2010. Online verfügbar unter [http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektro\\_daten\\_2010\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektro_daten_2010_bf.pdf), zuletzt geprüft am 02.12.2013.
- BMWFJ 2013 Reichl, C.; Schatz, M.; Zsak, G.: World Mining Data 2013. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (BMWFJ). 2013.
- BMWi 2010 BMWi: Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). 2010.
- Boland und Kropshot 2011 Boland, M. A.; Kropshot, S. J.: Cobalt – For Strength and Color. Hg. v. U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.

- Burgos et al. 2005      Burgos, S.; Querol, X.; Font Piqueras, O.; Lopez Soler, A.; Plana Llevat, F.; Espiell Alvarez, F. et al.: Verfahren zur Rückgewinnung von Germanium und anderen Metallen aus Flugaschen von einem Kraftwerk der Art mit integrierter Kohlevergasung und kombiniertem Zyklus (IGCC). Angemeldet durch ELCOGAS S.A. am 06. Juni 2002. Anmeldenr: 60201840. Veröffentlichungsnr: DE 60201840 T2. 2005.
- Burt 2010      Burt, R.: Tantalum - A Rare Metal in Abundance? T.I.C. Bulletin N° 141. Hg. v. Tantalum-Niobium International Study Center (T.I.C.). 2010.
- BW-I 2013a      Baden-Württemberg International: Automobilindustrie in Baden-Württemberg. Stuttgart. 2013. Online verfügbar unter <http://www.bw-fairs.de/besucheraussteller/messen-nachbranchen/mobilitaet/automobil/automobilindustrie-in-baden-wuerttemberg/>, zuletzt geprüft am 01.10.2013.
- BW-I 2013b      Baden-Württemberg International: Maschinenbau in Baden-Württemberg. Stuttgart. 2013. Online verfügbar unter <http://www.bw-invest.de/home/marktueberblick/branchen/technik/maschinenanlagenbau/maschinen-anlagenbau/maschinenbau-in-baden-wuerttemberg.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2013.
- BW-I 2013c      Baden-Württemberg International: Elektroindustrie in Baden-Württemberg. Stuttgart. 2013. Online verfügbar unter <http://www.bw-invest.de/home/marktueberblick/branchen/mobilitaet/elektronikelektrotechnik/elektroindustrie-in-baden-wuerttemberg.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2013.
- BW-I 2013d      Baden-Württemberg International: Metallbe- und verarbeitung - Position und Potential. Stuttgart. 2013. Online verfügbar unter <http://www.bw-invest.de/home/marktueberblick/branchen/technik/metallbe-und-verarbeitung.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2013.
- BW-I 2013e      Baden-Württemberg International: Unternehmen in der Branche »Pharmazie«. Stuttgart. 2013. Online verfügbar unter <http://www.bw-invest.de/home/marktueberblick/branchen/gesundheitswirtschaft/pharmazie/pharmazie-unternehmen.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2013.



- BY 2011                      Abschlussbericht: Initialstudie – Ressourcenstrategie für Bayern unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen. Im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit. München, Straubing, Sulzbach-Rosenberg. Dezember 2011.
- Carlin 2006                    Carlin, J. F.: Antimony Recycling in the United States in 2000. In: Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1196-A-Z-AA. Hg. v. Sibley, S. F. Reston 2006.
- Carlin 2012                    Carlin, J. F.: Antimony [Advance release]. In: Minerals Yearbook - 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- CDI 2013                      CDI: Cobalt Facts. Cobalt Supply & Demand 2012. Hg. v. The Cobalt Development Institute (CDI). 2013.
- Chancerel et al. 2009      Chancerel, P., Rotter, S.: Edelmetallrückgewinnung aus Elektro- und Elektronikaltgeräten durch Aufbereitung. In: Müll und Abfall – Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Nr. 2. 2009, S. 78-82.
- Chen et al. 2010             Chen, G.; Gao, Y.; Li, C.; Xu, L.: Method for recycling molybdenum of molybdenum-contained waste catalyst. Angemeldet durch China Petroleum & Chemical; SINOPEC Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals am 29. Oktober 2008. Anmeldenr: CN 200810228402. Veröffentlichungsnr: CN 101724758 A. 2010.
- Civic 2009                    Civic, T.: Private communication. 2009.
- Crocket et al. 1993         Crocket, R. N.; Sutphin, D. M.: International Strategic Minerals Inventory Summary Report - Niobium (Columbium) and Tantalum. U.S. Geological Survey Circular 930-M. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Denver 1993.
- Cunningham 2006a         Cunningham, L. D.: Beryllium Recycling in the United States in 2000. In: Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1196-A-Z-AA. Hg. v. Sibley, S. F. Reston 2006.
- Cunningham 2006b         Cunningham, L. D.: Columbium (Niobium) Recycling in the United States. In: Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1196-A-Z-AA. Hg. v. Sibley, S. F. Reston 2006.

- DERA 2010                      Elsner, H.; Läufer, A.; Vasters, J.: DERA Rohstoffinformationen. Das mineralische Rohstoffpotenzial Grönlands. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2010.
- DERA 2011a                     Elsner, H.: Commodity Top News Nr. 36. Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden – Entwicklung »Grüner Technologien« gefährdet? Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA). Hannover 2011.
- DERA 2011b                     Schippers, A.; Vasters, J.; Drobe, M.: Commodity Top News Nr. 39. Biomining - Entwicklung der Metallgewinnung mittels Mikroorganismen im Bergbau. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2011.
- DERA 2011c                     Babies, H.-G.; Buchholz, P.; Homberg-Heumann, D.; Huy, D.; Messner, J.; Neumann, W. et al.: DERA Rohstoffinformationen. Deutschland Rohstoffsituation 2010. Unter Mitarbeit von Karin Borchers und Bernard Wehenpohl. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2011.
- DERA 2012a                     Buchholz, P.; Huy, D.; Sievers, H.: DERA Rohstoffinformationen 10. DERA-Rohstoffliste 2012. Angebotskonzentration bei Metallen und Industriemineralen – Potenzielle Preis- und Lieferrisiken. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2012.
- DERA 2012b                     Elsner, Harald: Grönlands Seltene Erden decken Weltbedarf für 150 Jahre. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2012.
- DERA 2013                      Schmidt, M.: DERA Rohstoffinformationen 18. Rohstoffrisikobewertung – Antimon. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin 2013.
- DERA 2014a                     Liedtke, M.; Schmidt, M.; Dorner, U.; Huy, D.; Franken, G.: DERA Rohstoffinformationen 19. Rohstoffrisikobewertung - Wolfram. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin 2014.

DERA 2014b	Elsner, H.; Sievers, H.; Szurlies, M.; Wilken, H.: Commodity Top News Nr. 41. Das Mineralische Rohstoffpotenzial der Arktis. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover 2014.
Dodd-Frank Act 2010	Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act, Public Law 111-203 des 111. Kongress vom 21. Juli 2010. Washington D.C. 2010.
DPMA 2013	DPMA: DEPATISnet. Datenbank des elektronischen Dokumentarchivs DEPATIS (Deutsches Patentinformationssystem). 2013.
Druyts 2005	Druyts, F.: Challenges in the radwaste management and recycling of beryllium. Studiecentrum voor Kernenergie (SCK); Centre d'études de l'énergie nucléaire (CEN). 2005.
EAR 2014	Stiftung Elektro-Altgeräte-Register: Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen. 2014. Online verfügbar unter <a href="http://www.stiftung-ear.de/service_und_aktuelles/kennzahlen/zusammensetzung_gemischer_sammelgruppen">http://www.stiftung-ear.de/service_und_aktuelles/kennzahlen/zusammensetzung_gemischer_sammelgruppen</a> , zuletzt geprüft am 01.08.2014.
EC 2006	European Commission (EC): Directive 2006/11/EE of the European Parliament and of the Council of 15 February 2006 on pollution caused by certain dangerous substances discharged into the aquatic environment of the Community. In: Official Journal of the European Union (64). Brüssel 2006.
EC 2010	European Commission (EC): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials und Annex V to the Report. Hg. v. European Commission (EC). Brüssel 2010.
EC-JRC 2010	Law, R.; Hanke, G.; Angelidis, M.; Batty, J.; Bignert, A.; Dachs, J. et al.: Marine Strategy Framework Directive - Task Group 8 Report: Contaminants and Pollution Effects. JRC Scientific and Technical Reports. Hg. v. Joint Research Centre (JRC), European Commission (EC) und International Council for the Exploration of the Sea (ICES). 2010.
ecoinvent 2009	ecoinvent: Life Cycle Inventories of Metals ecoinvent database v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Unter Mitarbeit von Mischa Classen, Althaus Hans-Jörg, Silvio Blaser und Wolfram Scharnhorst. Hg. v. Althaus Hans-Jörg. EMPA Dübendorf; Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf 2009.

- EITI 2014 EITI: Seeing results from natural resources. EITI Countries. Hg. v. Extractive Industries Transparency Initiative (EITI). Oslo 2014. Online verfügbar unter <http://eiti.org/countries>, zuletzt geprüft am 05.09.2014.
- ElektroG 2005 Elektro- und Elektronikgerätegesetz. Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten. Bundesrepublik Deutschland: Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 16. März 2005 (BGBl. I S. 762), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.
- Elwert 2013 Elwert, T.: Rückgewinnung von Seltenen Erden aus NdFeB-Magneten. In: Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft. Bd. 111. Hg. v. Kranert, M. und Sihler, H. Deutscher Industrieverlag. München 2013.
- Elwert und Goldmann 2013 Elwert, T.; Goldmann, D.: Rückgewinnung von Seltenen Erden aus NdFeB-Magneten. Ergebnisse aus dem Projekt MORE. In: Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft. Bd. 111. Hg. v. Kranert, M. und Sihler, H. Deutscher Industrieverlag. München 2013.
- EMPA 2009 EMPA: Weigth of selected electric and electronic equipment. 2009. Online verfügbar unter <http://ewasteguide.info/node/4065>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.
- Eneh 2011 Eneh, C.: Recyclability potentials of beryllium oxide from E-Waste Items in Nigeria. In: Journal of Applied Sciences 11 (2). 2011. S. 397-400.
- Engelmann et al 2012 Engelmann, T.; Merten, T.; Rohn, H.: Ressourceneffizienz – Arbeitspapier im Arbeitspaket 1.2 des Verbundprojekts Strategische Allianz »Demografiemanagement, Innovationsfähigkeit und Ressourceneffizienz am Beispiel der Region Augsburg (ADMIRE A3)«. 2012.
- EPA 2014 EPA: Patent information services for experts. Global Patent Index. 2014.
- Erdmann und Graedel 2011 Erdmann, L.; Graedel, T. E.: Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. In: Environmental Science & Technology (45). 2011. S. 7620–7630.

- Erren und Wittmer 2011 Erren, M.; Wittmer, D.: Palladium. In: Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts »Materialeffizienz und Ressourcenschonung« (MaRes). Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Hg. von Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal 2011.
- Filella et al. 2012 Filella, M.; Belzile, N.; Chen, Y.-W.: Antimony in the environment: a review focused on natural waters. In: Earth-Science Reviews 57 (1-2), 2002, S. 125–176.
- Fraunhofer ISI 2009 Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marvede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. ISI-Schriftenreihe »Innovationspotenziale«. Fraunhofer-IRB-Verlag. Stuttgart 2009.
- Fröhlich 2010 Fröhlich, G.: Sekundärrohstoff Elektroaltgerät. Vortrag beim Tag der Metallurgie 3.-5.03.2010. Goslar 2010.
- Fu et al. 2010 Fu, Z.; Wu, F.; Amarasiriwardena, D.; Mo, C.; Liu, B.; Zhu, J. et al.: Antimony, arsenic and mercury in the aquatic environment and fish in a large antimony mining area in Hunan, China. In: Science of The Total Environment 408 (16). 2010. S. 3403–3410.
- Gäckle 2012 Gäckle, T.; Ressourceneffizienz von Produkten unter rohstoffpolitischen Aspekten, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, in: Herausforderung Ressourceneffizienz – Meinungen, Beispiele und Management-Instrumente, Econsense-Forum nachhaltige Entwicklung der Deutschen Wirtschaft (Hrsg.). Berlin 2012.
- Gambogi 2012 Gambogi, J.: Rare Earths [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS) Reston 2012.
- GCMC 2013 Gulf Chemical & Metallurgical Corporation: Refining refiners spent catalysts. Catalyst recycling: a sustainable solution for oil refiners 14.11.2013.

- Gebel 1997                      Gebel, T.: Arsenic and antimony: comparative approach on mechanistic toxicology. In: *Chemico-Biological Interactions* 107 (3). 1997. S. 131–144.
- Georgi-Maschler et al. 2012                      Georgi-Maschler, T.; Friedrich, B.; Weyhe, R.; Heegn, H.; Rutz, M.: Development of a recycling process for Li-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 207. 2012. S. 173–182.
- Gilbert 2009                      Gilbert, N.: The Disappearing Nutrient. In: *Nature* 461. 2009, S. 716–718.
- Gille 2006                      Gille, G.: Wolfram. In: *Chemische Technik. Prozesse und Produkte*. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Kuchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 62–76.
- Gille und Meier 2012                      Gille, G.; Meier, A.: Recycling von Refraktärmetallen. In: *Recycling und Rohstoffe*. Band 5. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK Verlag. Neuruppin 2012, S. 537–560.
- Goldmann und Rasenak 2013                      Goldmann, D.; Rasenak, K.: Recycling – Säule zur Rohstoffsicherung. In: *Recycling und Rohstoffe*. Band 6. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. Neuruppin 2013, S. 5–15.
- Goonan 2006                      Goonan, T. G.: Titanium Recycling in the United States in 2004. In: *Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States*. U.S. Geological Survey Circular 1196-A-Z-AA. Hg. v. Sibley, S. F. Reston 2006.
- Graedel et al. 2011                      Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K. et al.: What Do We Know About Metal Recycling Rates? In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (3). 2011, S. 355–366.
- GRS 2011                      Gemeinsames Rücknahmesystem: Jahresbericht 2010 mit Erfolgskontrolle nach Batteriegelgesetz. Hamburg. 2011. Online verfügbar unter [http://www.greentech-germany.com/res/articlefiles/25225\\_77d7e71ad3386e583109b6f829d7521a.pdf](http://www.greentech-germany.com/res/articlefiles/25225_77d7e71ad3386e583109b6f829d7521a.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- Grund et al. 2000                      Grund, S. C.; Hanusch, K.; Breunig, H. J.; Wolf, H. U.: Antimony and Antimony Compounds. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, 2000.

- Guberman 2012 Guberman, D. E.: Germanium [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Guinée et al. 2002 Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Unter Mitarbeit von Marieke Gorrée, Reinout Heijungs, Gjal Huppes, René Kleijn, Arjan de Koning, Laurant van Oers et al. Hg. v. Guinée, J. B.. Dordrecht/Boston, 2002.
- Gullet et al. 2007 Gullet, B. K.; Linak, W. P.; Touati, A.; Wasson, S. J.; Gatica, S.; King, C. J.: Characterization of air emissions and residual ash from open burning of electronic wastes during simulated rudimentary recycling operations. In: Journal of Material Cycles and Waste Management (9), 2007, S. 69–79.
- Gunn 2014 Gunn, G.: Critical Metals Handbook. Wiley-Blackwell. 2014.
- Guowen et al. 2012 Guowen, Y.; Shikun, P.; Wendong, B.; Zhiguo, Z.: Method for recycling gallium and germanium from residual liquid of process that germanium is extracted from coal dust containing germanium. Angemeldet durch Yunnan Lincang Xinyuan Germanium Industrial Co. Ltd. am 09. Juli 2012. Anmeldenr: 201210235357. Veröffentlichungsnr: CN 102703717A. 2012.
- Gurmendi 2011 Gurmendi, A. C.: Brazil. In: Minerals Yearbook - 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- Gutknecht 2006: Gutknecht, W.: Molybdän. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006. S. 77–84.
- Haas und Schnitter 2006 Haas, H.; Schnitter, C.: Niob und Tantal. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH. Weinheim 2006, S. 50–61.
- Hagelüken 2008 Hagelüken, C.: Personal communication Christian Hagelüken (Umicore Precious Metals Refining). 2008.
- Hagelüken und Kleinwächter 2006 Hagelüken, C.; Kleinwächter, I.: Platingruppenmetalle (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Os). In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl.

8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 236–260.

- Hawkins 2006 Hawkins, M.: Cobalt. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 738–752.
- HE 2011 Abschlussbericht: Initialstudie – Ressourcenstrategie für Hessen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen. Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Wiesbaden, Straubing, Sulzbach-Rosenberg. August 2011.
- Hennebel et al. 2013 Hennebel, T.; Boon, N.; Maes, S.; Lenz, M.: Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R&D priorities and future perspectives. In: New Biotechnology. 2013, S. 1871-6784.
- Hilliard 2006 Hilliard, H. E.: Platinum Recycling in the United States in 1998. In: Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1196-A-Z-AA. Hg. v. Sibley, S. F. Reston 2006.
- Holmstrup et al. 2010 Holmstrup, M.; Bindsbøl, A.-M.; Oostingh, G. J.; Duschl, A.; Scheil, V.; Köhler, H.-R. et al.: Interactions between effects of environmental chemicals and natural stressors: A review. In: Science of The Total Environment 408 (18). 2010, S. 3746–3762.
- Homma et al. 2010 Homma, T.; Ubusawa, T.; Furuyama, T.; Morikaku, A.; Tanaka, K.: Method of Recycling Useful Metal. Angemeldet durch Shibaura Institute of Technology am 25. Dezember 2008. Anmeldenr: EP20080870074. Veröffentlichungsnr: EP 2241381 A1. 2010.
- IARC und WHO 1989 IARC; WHO: IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Some Organic Solvents, Resin Monomers and Related Compounds, Pigments and Occupational Exposures in Paint Manufacture and Painting. Volume 47. Hg. von International Agency for Research on Cancer (IARC); World Health Organization (WHO). Lyon 1989.
- IAW 2013 Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung: IAW- Datengerüst zur Branchenanalyse im Rahmen des Projekts



- »Ressourcenökonomische Herausforderungen für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg«. Unter Mitarbeit von R. Krumm. Tübingen 2013
- IAW 2014 Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung (IAW); Krumm, R.: Nicht-energetische Rohstoffe: Datenlage in Deutschland und Baden-Württemberg sowie rohstoffökonomische Überlegungen zur Schließung von Datenlücken, IAW Policy Reports Nr. 11. Tübingen. 2014.
- ILO 1999 International Labour Organization (ILO): Social and labour issues in small-scale mines. Report TMSSM/1999. Hg. v. International Labour Organization (ILO). 1999.
- Innocenzi 2013 Innocenzi, V., De Michelis, I., Ferella, F., & Vegliò, F.: Recovery of yttrium from cathode ray tubes and lamps fluorescent powders: experimental results and economic simulation. Waste Management. 33. 2013, S. 2390–2396.
- IPA 2013 IPA – Informations-Portal-Abfallbewertung: Abfallstreckbriefe nach Abfallschlüssel, Informationen zu Herkunft und charakteristischer Zusammensetzung sowie zu Schadstoffen und gefährlichen Eigenschaften, Online verfügbar unter <http://www.abfallbewertung.org>, zuletzt geprüft am 11.09.2014.
- IPCC 2007 IPCC: IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change. Synthesis Report. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007.
- ISA 2011 ISA: Environmental Management Needs for Exploration and Exploitation of Deep Sea Minerals. ISA Technical Study No. 10. Hg. v. International Seabed Authority (ISA). Kingston 2011.
- ISA 2013 ISA: Towards the Development of a Regulatory Framework for Polymetallic Nodule Exploitation in the Area. ISA Technical Study No. 11. Hg. v. International Seabed Authority (ISA). Kingston 2013.
- ISO 2006a ISO: EN ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Hg. v. International Standardization Organization (ISO) (EN ISO 14040). Geneva 2006.
- ISO 2006b ISO: EN ISO 14044. Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Hg. v. International Standardization Organization (ISO) (EN ISO 14044). Geneva 2006.

- ITAD 2014 <https://www.itad.de/ITAD/mitglieder>
- IW 2011 Institut der deutschen Wirtschaft (IW) Köln: Rohstoffsituation Bayern - keine Zukunft ohne Rohstoffe. Strategien und Handlungsoptionen. Ein aktualisierter Bericht der IW Consult GmbH Köln unter Mitwirkung von Prof. Reller (WZU Augsburg) im Auftrag der vbw - Vereinigung der bayerischen Wirtschaft e.V. München 2011.
- IZT 2011 Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung/adelphi: Kritische Rohstoffe für Deutschland - Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Im Auftrag der KfW Bankengruppe. Berlin 2011.
- Jacquemin et al. 2012 Jacquemin, L.; Pontalier, P.-Y.; Sablayrolles, C.: Life cycle assessment (LCA) applied to the process in-dustry: a review. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 17 (8). 2012, S. 1028–1041.
- Jaskula 2012 Jaskula, B. W.: Beryllium [Advance release]. In: Minerals Yearbook - 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Johansson 2013 Inge Johansson, Eskil Sahlin, Bo von Bahr, Johanna Björkmalm, Jelena Todorovic Olsson: Kritiska metaller i svenska avfallsaskor. The content of critical elements in residues from Swedish waste-to-energy plants. WASTE REFINERY ISSN 1654-4706, 2013
- Jordens et al. 2013 Jordens, A.; Cheng, Y. P.; Waters, K. E.: A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. In: Minerals Engineering 41, S. 97–114. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.10.017. 2013
- Jüstel 2012a Jüstel, T.: Kapitel 5: Niederdruckentladungslampen. Inkohärente Lichtquellen. FH Münster. 2012. Online verfügbar unter <https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/juestel/juestel/5-Inkohaerentelichtquellen-Niederdruckentladungslampen.pdf>, zuletzt geprüft am 16.06.2014.
- Jüstel 2012b Jüstel, T.: Kapitel 7: Leuchtstoffe. Inkohärente Lichtquellen. FH Münster. 2012. Online verfügbar unter <https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/juestel/juestel/7->

- Inkohaerentelichtquellen-Leuchtstoffe.pdf, zuletzt geprüft am 16.06.2014.
- Kammer 2006a Kammer, U.: Antimon. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 141–145.
- Kammer 2006b Kammer, U.: Germanium. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 115–118.
- Kammer 2009 Kammer, U.: Recycling von seltenen Metallen und deren Verbindungen. In: Recycling und Rohstoffe. Band 2. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK Verlag. Neuruppin 2009, S. 647–656.
- Kammer 2012 Kammer, U.: Recycling von Gallium, Germanium und Indium. Deutscher Rohstoffeffizienz-Preis 2012, 29.11.2012. Online verfügbar unter [http://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DREP\\_2012\\_Kammer.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DREP_2012_Kammer.pdf?__blob=publicationFile&v=3), zuletzt geprüft am 15.01.2014.
- Kar et al. 2005 Kar, B.; Murthy, B.; Misra, V.: Extraction of molybdenum from spent catalyst by salt-roasting. In: International Journal of Mineral Processing 76 (3). 2005, S.143–147.
- Kawamura et al. 1997 Kawamura, H.; Tadenuma, K.; Hasegawa, Y.; Takeuchi, T.; Sakamoto, N.: Method for recycling activated beryllium. Angemeldet durch Japan Atomic Energy Res Inst; Kaken KK; NGK Insulators Ltd. am 05. März 1996. Anmeldenr: JP 7818196 A. Veröffentlichungsnr: JP H09243798 A. 1997.
- Kawamura et al. 2009 Kawamura, H.; Tsuchiya, K.; Hanawa, Y.; Watabiki, S.; Tadenuma, K.; Omori, H.: Method and device for separating and recovering beryllium resource from beryllium containing impurity and recovered high-purity metal beryllium. Angemeldet durch Japan Atomic Energy Agency; Kaken KK am 14. März 2008. Anmeldenr: JP 20080065838. Veröffentlichungsnr: JP 2009222494. 2009.
- Kern 2006 Strukturanalytische Untersuchungen und Bewertung schadstoffhaltiger Abfälle im Hausmüll. Dissertation. Kassel 2006

- Koutsospyros 2006 Koutsospyros, A.; Braida, W.; Christodoulatos, C.; Dermatas, D.; Strigul, N.: A review of tungsten: From environmental obscurity to scrutiny. In: Journal of Hazardous Materials 136 (1). 2006, S. 1–19.
- KR 2012 N.N.: A method for recycling metal from waste tungsten catalysts. Angemeldet durch N.N. am 06. Juli 2011. Anmeldenr: KR 20110066838 A. Veröffentlichungsnr: KR 20120125133 A. 2012.
- Krausmann et al. 2009 Krausmann, F.; Gingrich, S.; Eisenmenger, N.; Erb, K.-H.; Haberl, H.; Fischer-Kowalski, M.: Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. In: Ecological Economics 68 (10). 2009, S. 2696–2705.
- Kümmerer 2001 Kümmerer, K.: Drugs in the environment: emission of drugs, diagnostic aids and disinfectants into wastewater by hospitals in relation to other sources – a review. In: Chemosphere 45 (6-7). 2001, S. 957–969.
- Kwak et al. 2013 Kwak, I. S.; Won, S. W.; Chung, Y. S.; Yun, Y.-S.: Ruthenium recovery from acetic acid waste water through sorption with bacterial biosorbent fibers. In: Bioresource Technology 128. 2013, S. 30–35.
- LAGA 2012 Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven. 2012
- LANUV 2012 LANUV: Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38. Hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. 2012.
- Lassner et al. 2000 Lassner, E.; Schubert, W.-D.; Lüderitz, E.; Wolf, H. U.: Tungsten, Tungsten Alloys, and Tungsten Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.
- Lassner et al. 2000 Lassner, E.; Schubert, W.-D.; Lüderitz, E.; Wolf, H. U.: Tungsten, Tungsten Alloys, and Tungsten Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.
- Lee 2002 Lee, C. K.; Rhee, K.-I.: Preparation of LiCoO<sub>2</sub> from spent lithium-ion batteries. In: Journal of Power Sources. 109. 2002, S. 17–21.

- Lenz et al. 2007 Lenz, K.; Koellensperger, G.; Hann, S.; Weissenbacher, N.; Mahnik, S. N.; Fuerhacker, M.: Fate of cancerostatic platinum compounds in biological wastewater treatment of hospital effluents. In: Chemosphere 69 (11). 2007, S. 1765–1774.
- Liu et al. 2013 Liu, J.; Wu, W.; Wang, Z.; Su, Z.; Liu, S.; Mao, P.: Method for recycling valuable metals from lead anode slime. Angemeldet durch Hunan Rare Earth Metal Research Institute am 22. November 2012. Anmeldenr: CN 201210479038. Veröffentlichungsnr: CN 102925703 A. 2013.
- Loferski 2012 Loferski, P. J.: Platinum-Group Metals [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Luidold et al. 2013 Luidold, S.; Poscher, A.; Kaindl, M.: Recycling von Seltenen Erden aus Sekundärrohstoffen. In: Recycling und Rohstoffe. Band 6. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK Verlag. Neuruppin 2013, S. 533–544.
- Lupton 2006 Lupton, D. F.: Beryllium. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 90–98.
- Mankins 1995 Mankins, J. C.: Technology Readiness Levels. A White Paper. Hg. v. National Aeronautics and Space Administration (NASA). 1995.
- Martens 2011 Martens, H.: Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis. Spektrum. Heidelberg 2011.
- Matjasova et al. 2013 Matjasova, V. E.; Kotsar, M. L.; Nikonow, V. I.; Borsuk, A. N.: Method of recycling wastes of metallic beryllium and special ceramics based on beryllium oxide. Angemeldet durch Otkrytoe aktsionernoje obshchestvo »Vedushchij naucho-issledovatel'skij institut khimicheskij tekhnologii« am 16. Mai 2012. Veröffentlichungsnr: RU 2493101 C1. 2013.
- Matsuzaki et al. 2013 Matsuzaki, K.; Ishii, R.; Yoshida, M.; Aoki, T.: Verfahren zur Rückgewinnung von Tantal. Angemeldet durch Mitsui Mining & Smelting Co., Ltd am 24. März 2011. Anmeldenr: DE201111101153. Veröffentlichungsnr: DE112011101153 T5. 2013.

- McGill 2000 McGill, I.: Rare Earth Elements. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.
- Meadows et al. 2006 Meadows, D. H.; Randers, J.; Meadows, D. L.: Grenzen des Wachstums: das 30-Jahre-Update. Stuttgart 2006.
- Melcher und Buchholz 2014 Melcher, F.; Buchholz, P.: Germanium. In: Critical Metals Handbook. Hg. v. Gunn, G. Wiley-Blackwell. 2014, S. 177–203.
- Melcher und Wilken 2013 Melcher, F.; Wilken, H.: Die Verfügbarkeit von Hochtechnologie-Rohstoffen. In: Chemie in unserer Zeit 47 (1). 2013, S. 32–49.
- Mestre et al. 2014 Mestre, N. C.; Calado, R.; Soares, A.: Exploitation of deep-sea resources: The urgent need to understand the role of high pressure in the toxicity of chemical pollutants to deep-sea organisms. In: Environmental Pollution 185. 2014, S. 369–371.
- Mining Journal 2013 Mining Journal: Greenland ends »zero tolerance« on uranium and rare earths. Production and Markets. 25.10.2013.
- Mishra et al. 2012 Mishra, B.; Anderson, C. D.; Taylor, P.; Anderson, C. G.; Apelian, D.; Blanpain, B.: CR3 Update: Recycling of Strategic Metals. In: JOM 64 (4). 2012, S. 441–443.
- Mobbs 2011 Mobbs, P. M.: Zambia. The Mineral Industry of Zambia. In: Minerals Yearbook - 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- Morin und D'Hugues 2010 Morin, D. H.; D'Hugues, P.: Bioleaching of a Cobalt-Containing Pyrite in Stirred Reactors: A Case Study from Laboratory Scale to Industrial Application. In: Biomining. Hg. v. Rawlings, D. E. und Johnson, B. D. Springer. Berlin/New York 2010, S. 35–56.
- Moriwaki und Yamamoto 2013 Moriwaki, H.; Yamamoto, H.: Interactions of microorganisms with rare earth ions and their utilization for separation and environmental technology. In: Applied Microbiology and Biotechnology 97 (1). 2013, S. 1–8.
- Moskalyk 2004 Moskalyk, R. R.: Review of germanium processing worldwide. In: Minerals Engineering 17 (3). 2004, S. 393–402.

- Müller und Faulstich 2012 Müller, J., Faulstich, M.: Branchen- und technologieübergreifende Ansätze im Strategiebereich Ressourceneffizienz. In: Chemie, Ingenieur, Technik, 84 (10). 2012.
- Nanjo und Satou 1989 Nanjo, M.; Satou, N.: Recovering method for tantalum from scrap tantalum. Angemeldet durch Tosoh Corp am 18. September 1987. Anmeldenr: JP 19870232678. Veröffentlichungsnr: JPS6475632 A. 1989.
- Nippa 2013 Nippa, M.: Herausforderung der Bewertung von Ressourceneffizienz, Vortrag im Rahmen der r<sup>3</sup> Kick-Off Veranstaltung am 17./18.04.2013 am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie. 2013.
- Nordsieck et al. 2013 Nordsieck, H.; Hertel, M.; Rommel, W.: Wertstoffpotenzial und Abschöpfungsmöglichkeiten für Restmüll aus Haushalten in Bayern. bifa-Text Nr. 52. Hg. v. bifa Umweltinstitut GmbH. 2013.
- Norgate und Haque 2010 Norgate, T. E.; Haque, N.: Energy and green-house gas impacts of mining and mineral processing operations. In: Journal of Cleaner Production 18 (3). 2010, S. 266–274.
- NRC 2008 National Research Council: Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. National Academies Press. Washington D.C. 2008.
- Oakdene Hollins 2008 Oakdene Hollins: Material security. Ensuring resource availability for the UK economy. Strategic report produced by the Resource Efficiency Knowledge Transfer Network. Chester: C-Tech Innovation Ltd. 2008.
- Oakdene Hollins 2010 Oakdene Hollins: Lanthanide Resources and Alternatives. Sustainable products and services - Clean technologies - Resource efficiency. A report for Department for Transport and Department for Business, Innovation and Skills. 2010.
- Oakdene Hollins 2011 Oakdene Hollins: Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England. Final report. Hg. v. European Pathway to Zero Waste und Environment Agency. 2011.
- OCETA 1996 OCETA: Metal separation by liquid ion exchange – Environmental technology profile. Hg. v. The Ontario Centre for environmental Technology Advancement (OCETA). 1996.

- OECD 2010a OECD: Critical Metals and Mobile Devices. Working Document. Hg. v. OECD Environment Directorate. Mechelen 2010.
- OECD 2010b OECD: Critical Metals and Mobile Devices ANNEXES. Working Document. Hg. v. OECD Environment Directorate. Mechelen 2010.
- OECD 2013 OECD: OECD due diligence guidance for responsible supply chains of minerals from conflict-affected and high-risk areas. 2. Aufl. OECD Publishing. Paris 2013.
- Okajima et al. 2010 Okajima, M. K.; Nakamura, M.; Mitsumata, T.; Kaneko, T.: Cyanobacterial Polysaccharide Gels with Efficient Rare-Earth-Metal Sorption. In: Biomacromolecules 11 (7). 2010, S. 1773–1778.
- Öko-Institut 2011 Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C.: Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for the Greens/EFA Group. Hg. v. Öko-Institut e.V. Darmstadt 2011.
- OSRAM 2011/2012 OSRAM AG: OSRAM DULUX® – Elektronische Energiesparlampen. Technische Fibel. München 2011/2012.
- Papp 2012 Papp, J. F.: Niobium and Tantalum [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Park et al. 2006 Park, K. H.; Reddy, B. R.; Mohapatra, D.; Nam, C.-W.: Hydrometallurgical processing and recovery of molybdenum trioxide from spent catalyst. In: International Journal of Mineral Processing 80 (2-4). 2006, S. 261–265.
- Pee et al. 2011 Pee, J. H.; Kim, S. M.; Lee, J. J.; Coi, J. C.: Recycling method of tungsten carbide from waste cemented carbide. Angemeldet durch Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology; Recytech Korea Co., Ltd. am 15. September 2009. Anmeldenr: KR 20090087210 A. Veröffentlichungsnr: KR 20110029509 A. 2011.
- Pee et al. 2012 Pee, J. H.; Yun, J. S.; Cho, W. S.; Kim, K. J.; Seong, N. E.: Recycling method of tungsten carbide from waste cemented carbide using pressure zinc melt. Angemeldet durch Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology am 15. September 2010. Anmeldenr: KR 20100090347 A. 2012.



- Polyak 2012 Polyak, D. E.: Molybdenum [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Rabah 2008 Rabah, M. A.: Recyclables recovery of europium and yttrium metals and some salts from spent fluorescent lamps. Waste Management. 28 (2). 2008, S. 318–325
- Rankin 2011 Rankin, W. J.: Minerals, metals and sustainability. Meeting future material needs. CRC Press. Collingwood/Leiden 2011.
- Reinhart et al. 2012 Reinhart, G.; Reisen, K.; Reinhardt, T.; Irrenhauser, T.: Ressourceneffizienzbewertung von RFID. Ein Ansatz zum Bewerten der Ressourceneffizienz RFID-gesteuerter Wertschöpfungsketten. Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. 2012.
- Reisener und Schuler 1957 Reisener, H.; Schuler, H.: A method for recovering germanium from coal ash. Angemeldet durch Starck Hermann am 8. Dezember 1950. Anmeldenr: DE 1954ST007895. Veröffentlichungsnr: DE 976889 C. 1957.
- Renner et. Al 2000 Renner, H.; Schlamp, G.; Kleinwächter, I.; Drost, E.; Lüscho, H. M.; Tews, P. et al.: Platinum Group Metals and Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.
- Reuter et al. 2005 Reuter, M. A.; Boin, U. M. J.; van Schaik, A.; Verhoef, E. V.; Heiskanen, K.; Yang, Y.; Georgalli, G.: The metrics of material and metal ecology, harmonizing the resource, technology and environmental cycles.: Elsevier (Developments in mineral processing). Amsterdam 2005.
- Rhodia und Umicore 2011 Rhodia; Umicore. Narcisse, Lamia; Alcon, Maria; Bruneau, Benjamin; Raskin, Geoffroy; Goovaerts, Evelien; Weekes, Tim: Umicore and Rhodia develop unique rare earth recycling process for rechargeable batteries. Paris 2011.
- Richter und Schermanz 2006 Richter, H.; Schermanz, K.: Seltene Erden. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 149–202.

- Ritthoff 2011                      Ritthoff, M.: Titan. In: Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts »Materialeffizienz und Ressourcenschonung« (MaRes). Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Hg. von Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal 2011.
- RM 2009                              Europas größter Titan-Gießofen. In: RECYCLING magazin (2). 2009, S 8.
- RM 2011                              Rhodia treibt Recycling von Seltenen Erden voran. In: RECYCLING magazin (20). 2011, S. 8.
- RM 2013                              Projekt für das Recycling von Titan gestartet. In: RECYCLING magazin (18). 2013, S. 24.
- Rombach 2011                      Rombach, G.: Rohstoffversorgung durch Aluminiumrecycling. - Der Europäische Ansatz und die globale Realität. In: Recycling und Rohstoffe. Band 4. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK Verlag. Neuruppin 2011, S. 235–245.
- Rommel et al. 2011                Rommel, W., Hertel, M., Nordsieck, H.: Wertstoffpotenziale im Restabfall in Bayern, VKS-Jahresfachtagung 30.06.2011 im Kloster Irsee. 2011.
- Ronglin 2012                      Ronglin, Z.: Method for recycling high-purity tungsten carbide from tungsten-cobalt type waste hard alloy. Angemeldet durch Zigong Guolin Hard Material Co. Ltd. am 30. August 2012. Anmeldenr: CN 201210312958. Veröffentlichungsnr: CN 102795625 A. 2012.
- Roskill 2007                        Roskill Information Services: Antimony. London 2007.
- Sattelberger 2006                Sattelberger, S.: Titan. In: Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. 8 Bände. Band 6b. Hg. v. Winnacker, K.; Dittmeyer, R.; Küchler, L. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2006, S. 754–773.
- Schmidt 2013                      Schmidt, M.: Einordnung in das Forschungsfeld Ressourceneffizienz in: Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen. Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Fördermaßnahme »r<sup>2</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Fraunhofer Verlag. Stuttgart 2013.

- Schmitz und Sievers 2013 Schmitz, M.; Sievers, H.: Entwicklungen auf den Märkten für mineralische Rohstoffe. In: Recycling und Rohstoffe. Band 6. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK Verlag. Neuruppin 2013, S. 129–139.
- Schütte et al. 2012 Schütte, P.; Franken, G.; Gebauer, H. P.; Dorner, U.; Hagemann, A.; Steinbach, V.: Rohstoff-Zertifizierung vor dem Hintergrund der Sorgfaltspflichten von Unternehmen in den Lieferketten von Konfliktmineralien. In: Recycling und Rohstoffe. Band 5. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK-Verlag. Neuruppin 2012, S. 213–220.
- Schwarz-Schampera 2014 Schwarz-Schampera, U.: Antimony. In: Critical Metals Handbook. Hg. v. Gunn, G. Wiley-Blackwell. 2014, S. 70–98.
- Scoyer et al. 2000 Scoyer, J.; Guislain, H.; Wolf, H. U.: Germanium and Germanium Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.
- SERI 2009 SERI: Ohne Maß und Ziel? Über unseren Umgang mit den natürlichen Ressourcen der Erde. Hg. v. Sustainable Europe Research Institute (SERI). Wien 2009.
- Shedd 2004 Shedd, K. B.: Cobalt recycling in the United States in 1998. In: Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1196-A-Z-AA. Hg. v. Sibley, S. F. Reston 2004.
- Shedd 2005 Shedd, K. B.: Tungsten Recycling in the United States in 2000. Open-File Report 2005-1028. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2005.
- Shedd 2012a Shedd, K. B.: Cobalt [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Shedd 2012b Shedd, K. B.: Tungsten [Advance release]. In: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
- Sheppard und Witten 2003 Sheppard, P.; Witten, M.: Dendrochemistry of urban trees in an environmental exposure analysis of childhood leukemia cluster areas. Abstract B 2003. In: EOS Transactions American Geophysical Union (AGU) 84 (46). 2003, S. 12.

- Shirayama und Okabe 2009  
Shirayama, S.; Okabe, T.: Selective extraction of Nd and Dy from rare earth magnet scrap into molten salt. Processing materials for Properties. In: The Minerals, Metals & Materials Society. 2009.
- Sibum et al. 2000  
Sibum, H.; Güther, V.; Roidl, O.; Habashi, F.; Wolf, H. U.: Titanium, Titanium Alloys, and Titanium Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.
- Song et al. 2012  
Song, X.; Wei, C.; Liu, X.; Nie, Z.; Wang, Y.; Fu, J.: Industrial method for recycling waste wolfram carbide-cobalt (WC-Co) hard alloy. Angemeldet durch Beijing University of Technology am 14. Mai 2012. Anmelden: CN 201210148978. Veröffentlichungsnr: CN 102808085 A. 2012.
- SRU 2012  
Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt. Berlin 2012.
- StaLa BW 2011  
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: 125 Jahre Automobil. Bedeutung der Automobilindustrie für die Wirtschaft Baden-Württembergs im Spiegel der Umsatzsteuerstatistik. Unter Mitarbeit von Hawlitschek, A. (Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg, 10/2011).
- StaLa BW 2012a  
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Forschung und Entwicklung in Baden-Württemberg. Im Fokus: der Wirtschaftssektor. Unter Mitarbeit von Einwiller, R. (Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg, 5/2012).
- StaLa BW 2012b  
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Abfallaufkommen in Industrie und Gewerbe in Baden-Württemberg – Diskrepanz zwischen erzeugter und im Land entsorgter Abfallmenge. Unter Mitarbeit von König, K. (Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg, 06/2012).
- StaLa BW 2013a  
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Schriftliche Auskunft zum Außenhandel Baden-Württembergs und Deutschlands 2010 nach ausgewählten Rohstoffen und Warennummern vom 31.07.2013.
- StaLa BW 2013b  
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Erzeugte Abfälle in Baden-Württemberg 2010 und relative Verteilung der Betriebe, Beschäftigten und Abfallmengen je Wirtschaftszweig, schriftliche Auskunft vom 10.09.2013.

- StaLa BW 2014a Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Kommunales Aufkommen an Elektro-/Elektronikgeräten sowie Gasentladungslampen. Stuttgart. 2014. Online verfügbar unter <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten/a2b07.asp>, zuletzt geprüft am 01.08.2014.
- StaLa BW 2014b Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Ausstattung privater Haushalte mit Geräten der Unterhaltungselektronik in Baden-Württemberg 2006 bis 2012. Stuttgart. 2014. Online verfügbar unter [http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/volkswpreise/Haushalte/LWR\\_Ausstatt.asp?BiTo](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/volkswpreise/Haushalte/LWR_Ausstatt.asp?BiTo), zuletzt geprüft am 04.08.2014.
- StaLa BW 2014c Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Ausstattung privater Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik in Baden-Württemberg 2006 bis 2012. Stuttgart. 2014. Online verfügbar unter [http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/volkswpreise/Haushalte/LWR\\_Ausstatt.asp?IKT](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/volkswpreise/Haushalte/LWR_Ausstatt.asp?IKT), zuletzt geprüft am 04.08.2014.
- StaLa BW 2014d Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Privathaushalte nach Anzahl der Personen im Haushalt. Online verfügbar unter <http://www.statistik-portal.de/BevoelkGebiet/Landesdaten/LRt0116.asp>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.
- Strigul et al. 2005 Strigul, N.; Koutsospyros, A.; Arienti, P.; Christodoulatos, C.; Dermatas, D.; Braidia, W.: Effects of tungsten on environmental systems. In: *Chemosphere* 61 (2), 2005, S. 248–258.
- Svilar et al. 2000 Svilar, Mark; Schuster, Gary; Civic, Terence; Sabey, Phillip; Vidal, Edgar; Freeman, Stephen et al.: Beryllium and Beryllium Compounds. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2000.
- Talvivaara 2012 Talvivaara; Miltton Oy: A Controlled Revival. Annual Report 2012. Hg. v. Talvivaara Mining Company Plc. 2012.
- Texier et al. 2002 Texier, A.; Andrès, Y.; Faur-Brasquet, C.; Le Cloirec, P.: Fixed-bed study for lanthanide (La, Eu, Yb) ions removal from aqueous solutions by immobilized *Pseudomonas aeruginosa*. In: *Chemosphere* 47 (3). 2002, S. 333–342.

- TIC 2013 T.I.C.: Tantalum - Raw Materials and Processing. Hg. v. Tantalum-Niobium International Study Center (T.I.C.) 2014. Online verfügbar unter <http://tanb.org/tantalum>, zuletzt geprüft am 26.02.2014.
- Truemean und Sabey 2014 Trueman, D. L.; Sabey, P.: Beryllium. In: Critical Metals Handbook. Hg. v. Gunn, G. Wiley-Blackwell. 2014, S. 99–121.
- Tse 2011 Tse, P.-K.: China. In: Minerals Yearbook - 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- TU Clausthal und BGR 2013 TU Clausthal; BGR: ENTIRE. Entwicklung der internationalen Diskussion zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Hg. v. Technische Universität Clausthal und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin/Clausthal-Zellerfeld/Hannover 2013.
- U.S. DOE 2011 U.S. Department of Energy: Critical Materials Strategy. Washington D.C. 2011.
- U.S. DOJ 2010 U.S. Department of Justice; Federal Trade Commission: Horizontal Merger Guidelines 2010.
- UBA 2009 UBA Umweltbundesamt: Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung – Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung. Dessau-Roßlau 2009.
- UBA und Öko-Institut 2013 UBA Umweltbundesamt; Öko-Institut: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas). Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) und Öko-Institut e.V. 2013. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>, zuletzt geprüft am 05.09.2014.
- UBA 2012 Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J.: Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. 01/2012. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). 2012.
- Umicore 2011 Umicore: Inauguration of battery recycling facility in Hoboken. 07.09.2011.

- Umicore 2014 Umicore: Battery recycling - Process. Hg. v. Umicore 2014. Online verfügbar unter <http://www.batteryrecycling.umicore.com/UBR/process/>, zuletzt geprüft am 11.09.2014.
- UN 2009 UN: Final report of the Group of Experts on the Democratic Republic of the Congo. S/2009/603. Hg. v. United Nations (UN). New York 2009.
- UNEP 2009a Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D.: Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Hg. v. Öko-Institut e.V. im Auftrag von United Nations Environment Programme & United Nations University. Berlin 2009.
- UNEP 2009b UNEP: From conflict to peacebuilding. The role of natural resources and the environment (Policy paper). Nairobi 2009.
- UNEP 2009c Schluep, M.; Hagelüken, C.; Kühr, R.; Magalini, F.; Maurer, C.; Meskers, C. et al.: Recycling – From E-Waste to Resources. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. Hg. v. United Nations Environment Programme (UNEP) und StEP Nairobi 2009.
- UNEP 2011 UNEP: Recycling rates of metals. A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel. Unter Mitarbeit von Thomas E. Graedel, Julian Allwood, Jean-Pierre Birat, Matthias Buchert, Christian Hagelüken, Barbara K. Reck et al. Hg. v. United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi 2011.
- UNEP 2013a UNEP: Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Unter Mitarbeit von van der Voet, E., R. Salminen, M. Eckelman, G. Mudd, Terry E. Norgate und R. Hirsch. Hg. v. United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi 2013.
- UNEP 2013b UNEP: Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Unter Mitarbeit von Markus Reuter, Christian Hudson, Antoinette van Schaik, Kari Heiskanen, Christina Meskers und Christian Hagelüken. Hg. v. United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi 2013.

UNEP CSCP 2009	UNEP/Wuppertal Institute Collaborating Centre on Sustainable Consumption and Production: Partnerships for Sustainable Consumption. Wuppertal 2009.
USEPA 1979	USEPA: Water related fate of the 129 priority pollutants. vol. 1. Hg. v. Environmental Protection Agency of the United States (USEPA). Washington DC 1979.
USGS 2010a	USGS: Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells. Circular 1365. Unter Mitarbeit von Bleiwas, D. I. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2010.
USGS 2010b	USGS: Mineral Commodity Summaries 2010. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). 2010.
USGS 2011a	USGS: Mineral Commodity Summaries 2011. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). 2011.
USGS 2011b	USGS: Minerals Yearbook – 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
USGS 2012a	USGS: Mineral Commodity Summaries 2012. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). 2012.
USGS 2012b	USGS: Minerals Yearbook – 2011. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2012.
USGS 2013	USGS: Mineral Commodity Summaries 2013. Hg. v. U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey (USGS). 2013.
USGS 2014	USGS: Mineral Commodity Summaries 2014. Hg. v. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). 2014.
van Oss 2009	van Oss, H.: Private communication 2009.
VDA 2011	Verband der Automobilindustrie: Baden-Württemberg bleibt Autoland. Elektromobilität ist Teil der Fächerstrategie. Ludwigsburg/Berlin 2011.
VDA 2013	Verband der Automobilindustrie: Jahresbericht 2013. Berlin 2013.



- VDI 2014 Verein Deutscher Ingenieure, VDI: VDI Richtlinie 4800, Blatt1 (Entwurf) Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Düsseldorf 2014.
- VDMA 2013 Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.: Forschung & Innovation. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://www.vdma.org/forschung-innovation>, zuletzt geprüft am 01.10.2013.
- Vest 2010 Vest, M.; Weyhe, R.; Georgi-Maschler, T.; Friedrich, B.: Rückgewinnung von Wertmetallen aus Batterieschrott. in Chemie Ingenieur Technik. 82. 2010, S. 1985–1990.
- Wacaster 2011 Wacaster, S.: New Caledonia. In: Minerals Yearbook – 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- Wäger et al. 2012 Wäger, P. A.; Lang, D. J.; Wittmer, D.; Bleischwitz, R.; Hagelüken, C.: Towards a More Sustainable Use of Scarce Metals. A Review of Intervention Options along the Metals Life Cycle. In: GAIA Ecological Perspectives for Science and Society 4 (21). 2012, S. 300–309.
- Wäger und Lang 2010 Wäger, P.; Lang, D. J.: Seltene Metalle. Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Unter Mitarbeit von Raimund Bleischwitz, Christian Hagelüken, Simon Meissner, Armin Reller und Dominic Wittmer. Hg. v. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) (SATW-Schrift, 41). Zürich 2010.
- Wagner 2014 Wagner, J.; Günther, M.: Untersuchungen zur Optimierung der Sammlung elektronischer Kleingeräte. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) (Hrsg.). Recklinghausen. 2014. Online verfügbar unter [www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe52/fabe52.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe52/fabe52.pdf), zuletzt geprüft am 01.08.2014.
- Walsdorff et al. 2013 Walsdorff, C.; Schubert, M.; Altwasser, S.; Buch, S.: Method for the material recycling of catalysts containing iron, cerium, molybdenum, and potassium. Angemeldet durch BASF SE; Walsdorff, Christian; Schubert, Markus; Altwasser, Stefan; Buch, Steffen; BASF China Co. Ltd. am 29. Oktober 2012. Anmeldenr: IB 2012055961. Veröffentlichungsnr: WO 2013080066 A1. Prioritätsdaten: EP 11187218 A 20111031. 2013.

- Wang 2006 Wang, S.: Cobalt - Its Recovery, Recycling, and Application. In: JOM. 2006, S. 47–50.
- Wang et al. 2009a Wang, M.; Ling, F.; Zhang, X.; Sun, W.: Method for recycling high purity molybdenum from molybdenum-containing spent catalyst. Angemeldet durch China Petrochemical Corporation am 15. November 2007. Anmelden: DN 200710158357 A. Veröffentlichungsnr: CN 101435027 A. Prioritätsdaten: CN 200710158357 A. 2009.
- Wang et al. 2009b Wang, X.; Peng, J.; Yiqiang, W.; Lili, W.; Junxia, L.: Method for recycling wolfram from oxidation reaction solution containing wolfram catalyst. Angemeldet durch Zhengzhou University am 28. April 2009. Anmelden: CN 200910064744 A. Veröffentlichungsnr: CN 101532089 A. 2009.
- Wang et al. 2013 Wang, Q.; Guo, M.; Yan, L.; Su Taogui: Processing method of flame retardant plastic containing halide and antimony oxide. Angemeldet durch Jingmen Green Eco Manufacture New Material Co Ltd am 13. Dezember 2011. Anmelden: CN 201110414821. Veröffentlichungsnr: CN 103159978. 2013.
- Weyhe 2010 Weyhe, R.: Stoffliche Verwertung moderner Batteriesysteme. In: Recycling und Rohstoffe. Band 3. Hg. v. Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. TK Verlag. Neuruppin 2010, S. 663-674.
- Wiedicke-Hombach und Reichert 2013 Wiedicke-Hombach, M.; Reichert, C.: Tiefseebergbau. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). 2013.
- Wilson und Pyatt 2006 Wilson, B.; Pyatt, F. B. : Bio-availability of tungsten in the vicinity of an abandoned mine in the English Lake District and some potential health implications. In: Science of The Total Environment 370 (2-3). 2006, S. 401–408.
- Woidasky und Hirth 2012 Woidasky, J.; Hirth, T.: Ressourceneffizienz von heute bis übermorgen – Übersichtsbeitrag, in Chemie Ingenieur Technik, Volume 84, Issue 7, 2012
- Wojtalewicz- Kasprzak 2007 Wojtalewicz-Kasprzak, A.: Erzeugung von synthetischen Selten-Erd-Konzentraten aus Leuchtstoffabfällen. Dissertation. Clausthal 2007.

- World Bank Group 2010 Kaufmann, D.; Kraay, A.; Mastruzzi, M.: The World-wide Governance indicators: A Summary of Methodology, Data and Analytical Issues (World Bank Policy Research Working Paper, No. 5430) 2010.
- World Bank Group 2013 World Bank Group: The Worldwide Governance Indicators (WGI) project. Unter Mitarbeit von Kaufmann, D.; Kraay, A.; Mastruzzi, M. Hg. v. World Bank Group 2013.
- Wu 2014 Wu, Y., Yin, X., Zhang, Q., Wang, W., & Mu, Z.: The recycling of rare earths from waste tricolor phosphors in fluorescent lamps: A review of processes and technologies. Resources, Conservation and Recycling. 88. 2014, S. 21–31.
- Wu et al. 2011 Wu, F.; Fu, Z.; Liu, B.; Mo, C.; Chen, B.; Corns, W.; Laio, H.: Health risk associated with dietary co-exposure to high levels of antimony and arsenic in the world's largest antimony mine area. In: Science of The Total Environment (409). 2011, S. 3344–3351.
- Wuppertal Institut 2011a Ritthoff, M.: Titan. In: Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts »Materialeffizienz und Ressourcenschonung« (MaRes). Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal 2011.
- Wuppertal Institut 2011b Lucas, R.; Wilts, H.; Sokolova, I.: Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM). Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.2 des Projekts »Materialeffizienz und Ressourcenschonung« (MaRes). Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal 2011.
- Wuppertal-Institut 2011c Wittmer, D.; Scharp, M.; Bringezu, S.; Ritthoff, M.; Erren, M.; Lauwigi, C.; Giegrich, J.: Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilenstein des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts »Materialeffizienz und Ressourcenschonung« (MaRes). Teil 1: Abschlussbericht. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal 2011.
- Yager 2011a Yager, T. R.: Congo (Kinshasa). The Mineral Industry of Congo (Kinshasa). In: Minerals Yearbook - 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.

- Yager 2011b Yager, T. R.: Mozambique. In: Minerals Yearbook – 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- Yager 2011c Yager, T. R.: South Africa. In: Minerals Yearbook – 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- Yager et al. 2011 Yager, T. R.; Bermúdez-Lugo, O.; Mobbs, P. M.; Newman, H. R.; Taib, M.; Wallace, G. J.; Wilburn, D. R.: Africa. The Mineral Industries of Africa. In: Minerals Yearbook – 2010. Hg. v. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS). Reston 2011.
- YCELP 2012 Emerson, J. W.; Hsu, A.; Levy, M. A.; Sherbinin de, A.; Mara, V.; Esty, D. C.; Jaiteh, M.: 2012 Environmental Performance Index and Pilot Trend Environmental Performance index. Hg. v. Yale Center for Environmental Law and Policy (YCELP). New Haven 2012.
- Yumoto 2009 Yumoto, T.: Method for recovering tantalum from electronic substrates. Angemeldet durch Dowa Eco System Co. Ltd. am 14. März 2008. Anmelden: JP 2008065834 A. Veröffentlichungsnr: JP 2009221514 A. 2009.
- Zhang et al. 2011 Zhang, Wensheng; Zhu, Zhaowu; Cheng, Chu Yong: A literature review of titanium metallurgical processes. In: Hydrometallurgy 108 (3-4). 2011, S. 177–188.
- Zhong et al. 2010 Zhong, X.; Song, N.; Gong, B.: Preparation of Mn-Zn Ferrites Powdered by Waste from Recycling the NdFeB Magnet Scrap. In: Journal of Mianyang Normal University. 2010.

## Abkürzungsverzeichnis

### *Abkürzungen und Akronyme*

a	Jahr
ABANDA	Abfallanalysendatenbank
AGLV	Arbeitsgemeinschaft Lampen-Verwertung
AiF	Allianz Industrie Forschung
BeST	Beryllium Science & Technology Association
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	British Geological Survey
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWFJ	österr. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BW	Baden-Württemberg
CCFL	Cold Cathode Fluorescent Lamp (dt. Kaltkathodenröhre)
CDI	Cobalt Development Institute
CML	Centrums voor Milieukunde der Universiteit Leiden
Coltan	Columbit- und Tantalit-Mineralien
DEPATIS	Deutsches Patentinformationssystem
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DOE	U.S. Department of Energy (dt. Energieministerium der Vereinigten Staaten)
DPMA	Deutsches Patent- und Markenamt
DR Kongo	Demokratische Republik Kongo (Hauptstadt: Kinshasa)
DSD	Duales System Deutschland
E	Einwohner
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräte
EAV	Europäisches Abfallartenverzeichnis
EC	European Commission (dt. Europäische Kommission)

EoL-RR	End of Life Recyclingrate (engl. end-of-life recycling rate)
EPA	Europäisches Patentamt
EPI	Environmental Performance Index
EU	Europäische Union
FEM	Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie
FuE	Forschung und Entwicklung
GJ	Gigajoule
GPI	Global Patent Index
GRS Batterien	Gemeinsames Rücknahme System Batterien
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten
HHI	Herfindahl-Hirschman-Index
IARC	International Agency for Research on Cancer (dt. Internationale Agentur für Krebsforschung)
IAW	Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung e. V.
i.B.	in Bearbeitung
ILO	International Labour Organization (dt. Internationale Arbeitsorganisation)
IPA	Informations-Portal-Abfallbewertung
ISO	International Organization for Standardization (dt. Internationale Organisation für Normung)
ISWA	Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft
ITAD	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland e. V.
IZT	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
k.A.	keine Angaben/Daten vorhanden
KEA	Kumulierter Energieaufwand
kg	Kilogramm
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
kt	Kilotonne
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall

LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LCA	Life Cycle Assessment (dt. Lebenszyklusanalyse, Ökobilanz)
LCD	Liquid Crystal Displays
LED	Light-Emitting Diode (dt. Leuchtdiode)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (dt. Folgenabschätzung von Umweltwirkungen)
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MBA	mechanisch-biologische Behandlung
Mg	Milligramm
MHKW	Müllheizkraftwerke
Mio	Million
MJ	Megajoule
Mrd	Milliarde
MW	Megawatt
NASA	National Aeronautics and Space Administration
n.b.	nicht bestimmbar
NGO	Nichtregierungsorganisation (engl. Non-Governmental Organization)
NMVOC	Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (engl. non methane volatile organic compounds)
OCETA	Ontario Centre for environmental Technology Advancement
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development (dt. Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
örE	öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger
OSR	Schrottanteil (engl. old scrap ratio)
PET	Polyethylenterephthalat
ppm	parts per million
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente

ProgRes	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
RA	Recyclinganteil (engl. recycling content)
SERI	Sustainable Europe Research Institute
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
t	Tonne
TM	Trockenmasse
UBA	Umweltbundesamt
UEBEL	Umwelteinwirkungsbelastung
UN	United Nations (dt. Vereinte Nationen)
UNEP	United Nations Environment Programme (dt. Umweltprogramm der Vereinten Nationen)
USEPA	Environmental Protection Agency of the United States (dt. U.S. Umweltschutzbehörde)
USGS	U.S. Geological Survey
VCI	Verband der Chemischen Industrie
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VR China	Volksrepublik China
WA	Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik
WGI	Worldwide Governance Indicators
WHO	World Health Organization (dt. Weltgesundheitsorganisation)
WZ	Wirtschaftszweig (gemäß Klassifikation Destatis)
YCELP	Yale Center for Environmental Law and Policy



**Abkürzungsverzeichnis chemischer Elemente und Begriffe**

1,4-DCB	1,4-Dichlorbenzol (auch: Paradichlorbenzol)
AgO	Silberoxid
Al	Aluminium
AlMn	Alkalimangan
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
APT	Ammoniumparawolframat (NH <sub>4</sub> ) <sub>10</sub> (H <sub>2</sub> W <sub>12</sub> O <sub>42</sub> )•4 H <sub>2</sub> O
B	Bor
Ba	Barium
BaO	Bariumoxid
BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Bariumsilikat
Be	Beryllium
Ca	Kalzium (auch: Calcium)
CaO	Kalziumoxid
CAT	Cermagnesiumaluminat
CBT	Cergadoliniummagnesiumborat
Cd	Cadmium
Ce	Cer (SEM)
Co	Kobalt (auch: Cobalt)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
Dy	Dysprosium (SEM)
Eu	Europium (SEM)
Fe	Eisen
FeMo	Ferromolybdän
Gd	Gadolinium (SEM)
Ge	Germanium
HCl	Chlorwasserstoff
Hg	Quecksilber
Ho	Holmium (SEM)

H <sub>2</sub> O	Wasser
Ir	Iridium (PGM)
La	Lanthan (SEM)
LaPO <sub>4</sub>	Lanthanphosphat
Li	Lithium
LiCoO <sub>2</sub>	Lithium-Cobaltdioxid
Lu	Lutetium (SEM)
Mg	Magnesium
MgO	Magnesiumoxid
Mo	Molybdän
MoO <sub>3</sub>	Molybdäntrioxid
MoS <sub>2</sub>	Molybdän(IV)-sulfid
NaCl	Natriumchlorid (Kochsalz)
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Natriumcarbonat
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	Natriummolybdat
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Natriumsulfat
Nb	Niob
Nd	Neodym (SEM)
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
Ni	Nickel
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
Os	Osmium (PGM)
Pb	Blei
Pd	Palladium (PGM)
PGM	Platingruppenmetalle (Gruppe chemischer Elemente)
Pm	Promethium (SEM)
PO <sub>4</sub>	Phosphat
Pr	Praseodym (SEM)

Pt	Platin (PGM)
Rh	Rhodium (PGM)
Ru	Ruthenium (PGM)
Sb	Antimon
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Stibnit (auch: Antimonit)
Sc	Scandium (SEM)
SEM	Metalle der Seltenen Erden, Seltenerdmetalle (Gruppe chemischer Elemente)
SEO	Seltenerdoxid
Sm	Samarium (SEM)
Sn	Zinn
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
Sr	Strontium
SrO	Strontiumoxid
Ta	Tantal
Tb	Terbium (SEM)
Ti	Titan
TiO <sub>2</sub>	Titandioxid
Tm	Thulium (SEM)
W	Wolfram (auch: Tungsten)
WC	Wolframcarbid
Y	Yttrium (SEM)
Yb	Ytterbium (SEM)
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yttriumoxid
YOE	Yttriumeuropiumoxid
Zn	Zink
ZnC	Zink-Kohle

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Arbeitsinhalte und Zielsetzungen der Landesstrategie.....	11
Abbildung 2:	Bruttowertschöpfung (in jeweiligen Preisen) der Bereiche und Branchen in Baden-Württemberg in Mrd € im Jahr 2010 [AK VGRdL 2014].....	16
Abbildung 3:	Bruttowertschöpfung, Umsatz und Beschäftigte in den sechs Leitindustrien Baden-Württembergs im Jahr 2010 [AK VGRdL 2014, IAW 2013]. ....	17
Abbildung 4:	Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Automobilbranche Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].....	18
Abbildung 5:	Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Maschinenbaubranche Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].....	19
Abbildung 6:	Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].....	21
Abbildung 7:	Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Metallindustrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013]. ....	22
Abbildung 8:	Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der chemischen Industrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].....	23
Abbildung 9:	Prozentualer Anteil der Bruttowertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Papier- und Druckindustrie Baden-Württembergs an Gesamtdeutschland im Jahr 2010. Eigene Darstellung nach [IAW 2013].....	25
Abbildung 10:	Wirtschaftlicher Gewichtungindex – Ergebnis der Rohstoffbewertung [Eigene Berechnungen]. ....	31
Abbildung 11:	Mengenindex – Ergebnis der Rohstoffbewertung [Eigene Berechnungen]. ....	33
Abbildung 12:	Rohstoff-Risiko-Index – Ergebnis der Rohstoffbewertung [IW 2011; IZT 2011; Eigene Berechnungen]. ....	37
Abbildung 13:	Grafische Darstellung der Systematik der Rohstoffbewertung.....	38
Abbildung 14:	Bedeutung der untersuchten Rohstoffe für Baden-Württemberg. Endergebnis der Rohstoffbewertung [Eigene Berechnungen]. ....	40
Abbildung 15:	Bedeutung der untersuchten Rohstoffe für Baden-Württemberg und mögliche Nachfrageerhöhung durch Wirtschaftswachstum (markiert durch rote Pfeile). ....	45
Abbildung 16:	Die Indikatoren zur Analyse relevanter Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos der Primärgewinnung. Eigene Darstellung. Methodik u.a. basierend auf den Rohstoffrisikobewertungen der DERA [DERA 2013]. ....	47
Abbildung 17:	Die statischen Reichweiten der Reserven und Ressourcen. Die Berechnungen basieren auf den Informationen zur Jahresproduktion 2010 (siehe Tabelle 7), den Daten zu Reserven	

	für die meisten Rohstoffe [USGS 2010b] und für Tantal [BGS 2011a] sowie den Daten zu Ressourcen für Antimon [Grund et al. 2000], Beryllium [Svilar et al. 2000], Germanium [Scoyer et al. 2000], Kobalt [CDI 2013] Seltenerdelemente [Melcher und Wilken 2013], Tantal [BGS 2011a] und [Burt 2010] die restlichen Rohstoffe [USGS 2010b].	50
Abbildung 18:	Marktkonzentration der Produktion und der Reserven nach dem Herfindahl-Hirschman-Index. Berechnungen basierend auf [USGS 2010b; USGS 2011b; U.S. Department of Justice 2010; Melcher und Wilken 2013].	54
Abbildung 19:	Das Metallrad [Reuter et al. 2005], leicht verändert nach [Melcher und Wilken 2013].	57
Abbildung 20:	Untersuchte Kategorien hinsichtlich Umweltwirkung des Bergbaus: Material-, Energie- und Wasserverbrauch und aggregierter Index zur Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL).	59
Abbildung 21:	Die Ressourcenindikatoren Energie-, Material- und Wasserverbrauch je Tonne Rohstoff im Vergleich. Die Platinmetalle sind mit einem Stern, die Seltenerdoxide mit zwei Sternen gekennzeichnet. Darstellung in logarithmischer Skalierung. Rohstoff-Datensätze und LCIA-Methoden basierend auf [ecoinvent 2009; UBA und Öko-Institut 2013; UBA 2012].	62
Abbildung 22:	Die Ressourcenindikatoren Energie-, Material- und Wasserverbrauch der Weltjahresproduktion der Rohstoffe im Vergleich. Die Platinmetalle sind mit einem Stern, die Seltenerdoxide mit zwei Sternen gekennzeichnet. Darstellung in logarithmischer Skalierung. Rohstoff-Datensätze und LCIA-Methoden basierend auf [ecoinvent 2009; UBA und Öko-Institut 2013; UBA 2012].	63
Abbildung 23:	Vergleich der Ökotoxizität und Humantoxizität je Tonne Rohstoff. Darstellung in logarithmischer Skalierung, Berechnungen basierend auf der LCIA-Methode CML 2001 [ecoinvent 2009; Guinée 2002].	65
Abbildung 24:	Vergleich der Ökotoxizität und Humantoxizität (in kt 1,4-DCB-Äquivalenten) des globalen Produktionsvolumens (in t) 2010. Darstellung in logarithmischer Skalierung, Berechnungen basierend auf der LCIA-Methode CML 2001 [ecoinvent 2009; Guinée 2002].	66
Abbildung 25:	In Baden-Württemberg erzeugte Abfallmenge in Industrie und Gewerbe 2010 (insgesamt 7,4 Mio Tonnen) [StLa BW 2013b].	81
Abbildung 26:	Systematik zur Auswahl relevanter Datensätze / Abfallarten für die Wertstoffpotenzialermittlung am Beispiel der Automobilindustrie.	84
Abbildung 27:	Potenzieller Beitrag der einzelnen Stufen einer Produktkette zu mehr Ressourceneffizienz nach [UNEP CSCP 2009].	105
Abbildung 28:	Handlungsfelder und Leuchtturmprojekte.	123
Abbildung 29:	Antimongewinnung. Darstellung verändert nach [Kammer 2006a].	207
Abbildung 30:	Fließbild der Berylliumgewinnung aus Bertrandit- und Beryll-Erzen. Eigene Darstellung basierend auf [Lupton 2006].	212
Abbildung 31:	Überblick über die Germaniumherstellung. Leicht verändert nach [Kammer 2006b].	216
Abbildung 32:	Herstellung von Kobalt. Leicht verändert nach [Bertau et al. 2013].	218
Abbildung 33:	Schema der Herstellung von Molybdän. Verändert nach [Bertau et al. 2013].	222
Abbildung 34:	Gewinnung von Platinmetallen aus sulfidischen Erzen. Basierend auf [Renner et al. 2000].	226

Abbildung 35: Prinzipieller Verfahrensablauf bei der Verarbeitung von PGM-Konzentraten. Aus [Bertau et al. 2013], leicht verändert. ....	227
Abbildung 36: Erzaufschluss und Tantal-Herstellung. Verändert nach [Haas und Schnitter 2006].....	234
Abbildung 37: Typische Wertschöpfungskette von Coltan aus der DR Kongo. Darstellung basierend auf [BGS 2011a]. ....	236
Abbildung 38: Herstellung von Titan im Kroll Prozess. Basierend auf [Sattelberger 2006]. ....	238
Abbildung 39: Übersicht der Wolfram-Herstellung. Darstellung verändert nach [Gille 2006; Lassner et al. 2000; BGS 2011c; Gille und Meier 2012].....	242

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gesamtheit aller 65 betrachteten Rohstoffe mit Kennzeichnung der für den Rohstoffpool ausgewählten Rohstoffe (blau markiert).....	27
Tabelle 2:	Zuordnung der Verwendungsgebiete eines Rohstoffes zu den Abteilungen nach WZ 2008 am Beispiel Lithium. ....	28
Tabelle 3:	Berechnung des Wirtschaftlichen Gewichtungindex für Seltenerdmetalle.....	30
Tabelle 4:	Indikatoren und Gewichtung des Rohstoff-Risiko-Index des IW [IW 2011]. ....	35
Tabelle 5:	Indikatoren-Set für das Kritikalitäts-Screening des IZT [IZT 2011]. ....	35
Tabelle 6:	Gegenüberstellung der 10 Rohstoffe mit der höchsten Bedeutung für die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Hessen [BY 2011, HE 2011]. ....	42
Tabelle 7:	Übersicht über die Primärgewinnung von 2010-2013. Eigene Darstellung basierend auf [USGS 2012a; USGS 2013; USGS 2014].....	49
Tabelle 8:	Geographische Konzentration der Produktion und der Reserven. Die Bedeutung der farblichen Hinterlegungen sind der Legende zu entnehmen. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Wuppertal-Institut 2011c]. ....	52
Tabelle 9:	Bewertungsskala des Herfindahl-Hirschman-Index. Eigene Darstellung nach [U.S. Department of Justice 2010]. ....	53
Tabelle 10:	Kategorisierung der Rohstoffproduktion hinsichtlich der Regierungsführung der Produktionsländer. Berechnungen basierend auf [World Bank Group 2013]. ....	55
Tabelle 11:	Kategorisierung der Rohstoffproduktion anhand der Umweltleistung 2010. Eigene Darstellung. Berechnungen basierend auf [USGS 2011; YCELP 2012]. ....	56
Tabelle 12:	Überwiegende Gewinnungsart der Rohstoffe und Hauptprodukte der Koppelproduktion. ....	58
Tabelle 13:	Übersicht über Teilindikatoren basierend auf Umweltzielen und den hieraus abgeleiteten Umrechnungsfaktoren. Eigene Darstellung basierend auf [UBA 2012]. ....	61
Tabelle 14:	Theoretisches Wertstoffpotenzial für Abfallschlüssel 19 01 12 erfasste Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen [IPA 2013; ITAD 2014; Eigene Berechnungen]. ....	70
Tabelle 15:	Kommunales Aufkommen an Elektro- und Elektronikaltgeräten in Baden-Württemberg 2010 nach Kategorien [nach StaLa BW 2014a; EAR 2014 und BiPRO 2013]. ....	71
Tabelle 16:	Theoretisches Potenzial an wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in Leiterplatten der Elektrogeräte PC, Laptop, Digitalkamera, Mobiltelefon, DVD-Spieler und Videokamera in baden-württembergischen Haushalten 2010 [nach Blaser 2012, EMPA 2009, StaLa BW 2014b, StaLa BW 2014c, StaLa BW 2014d]. ....	73
Tabelle 17:	Theoretisches Potenzial an wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in Laptops in baden-württembergischen Haushalten 2010 [nach StaLa BW 2014c, StaLa BW 2014d, LANUV 2012].....	74
Tabelle 18:	Masse an durch das GRS in Baden-Württemberg zurückgenommener Altbatterien im Jahr 2010 [nach GRS 2011]. ....	75

Tabelle 19:	Gehalt an Kobalt und Seltene Erden in Li-Ion und NiMH Altbatterien [nach Lee 2002, Vest 2010].....	76
Tabelle 20:	Theoretische Potenziale an den wirtschaftsrelevanten Rohstoffen Kobalt und Seltene Erden in den zurückgenommenen Mengen der Batteriesysteme Li-Ion und NiMH [nach GRS 2011, Lee 2002, Vest 2010]. .....	76
Tabelle 21:	Seltenerdelemente im untersuchten Leuchtpulver, verändert nach [Luidold et al. 2012 zitiert in Wu 2014].....	78
Tabelle 22:	Mengen der verkauften und gesammelten Gasentladungslampen.....	78
Tabelle 23:	Wertstoffpotenzial in Leuchtstoffröhren ohne Leiterplatte des Vorschaltgerätes in Baden-Württemberg (2010).....	79
Tabelle 24:	Repräsentationsgrad der Branchen bei der Erhebung der Abfallerzeugung anhand der Zahl der Gesamtbeschäftigten nach [StaLa BW 2012b]. .....	82
Tabelle 25:	Ergebnisse der Erhebung zur Abfallerzeugung 2010 für die sechs Leitindustrien [StaLa BW 2013b].....	83
Tabelle 26:	Theoretisches Wertstoffpotenzial für die in der Automobilindustrie anfallende Abfallart 110109*: Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten [IPA 2013; StaLa BW 2013b; Eigene Berechnungen]. .....	86
Tabelle 27:	Abschätzung theoretischer Gesamtpotenziale für Rohstoffe des Rohstoff-Pools aus gewerblichen Abfällen, dargestellt nach Wirtschaftszweigen in kg/a.....	87
Tabelle 28:	Darstellung der zehn werthaltigsten Abfallströme unter Berücksichtigung aller im Rohstoff-Pool enthaltenen Rohstoffe [Eigene Berechnungen].....	88
Tabelle 29:	Darstellung der zehn werthaltigsten Abfallströme unter Berücksichtigung der Top-10-Rohstoffe [Eigene Berechnungen]. .....	89
Tabelle 30:	Abschätzung des theoretischen Wertstoffpotenzials für Abfallschlüssel 120118* ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme) [Eigene Berechnungen].....	90
Tabelle 31:	Außenhandel Baden-Württembergs 2010 nach ausgewählten Warennummern, Beispiel Antimon [StaLa BW 2013a].....	92
Tabelle 32:	Gegenüberstellung von Antimon Importmengen (in Rohform) und theoretischen Potenzialen in gewerblichen und kommunalen Abfallströmen. ....	93
Tabelle 33:	Übersicht über die Recyclingraten (verändert und erweitert nach UNEP 2011). .....	97
Tabelle 34:	Status- und Defizitanalyse der Sekundärgewinnung. ....	98
Tabelle 35:	Minen mit den geringsten jährlichen Kapazitäten zur Rohstoffförderung.....	99
Tabelle 36:	Recyclingverfahren der Top-10-Rohstoffe im Überblick.....	100
Tabelle 37:	Die fünf Hauptstufen der Wertschöpfungskette nach [Müller und Faulstich 2012].....	104
Tabelle 38:	Handlungsansätze, Instrumente und Anwendungsbeispiele zur Erreichung der Entkopplungsziele von Rohstoffverbrauch und Wohlfahrt [SRU 2010].....	106



## ANHANG

## Anlagenverzeichnis

<b>Anlage 1: Fact-Sheets .....</b>	<b>172</b>
Antimon .....	172
Beryllium.....	175
Germanium .....	178
Kobalt.....	181
Molybdän .....	184
Platinmetalle .....	187
Seltenerdmetalle .....	191
Tantal .....	195
Titan .....	198
Wolfram .....	201
Glossar für Fact-Sheets.....	204
<b>Anlage 2: Primärgewinnung .....</b>	<b>207</b>
Antimon .....	207
Beryllium.....	211
Germanium .....	215
Kobalt.....	218
Molybdän .....	222
Platingruppenmetalle .....	225
Seltenerdmetalle .....	230
Tantal .....	233
Titan .....	237
Wolfram .....	241
<b>Anlage 3: Umweltwirkungen.....</b>	<b>245</b>
<b>Anlage 4: Relevante Rohstoffe in Leiterplatten .....</b>	<b>249</b>
<b>Anlage 5: Ausstattung privater Haushalte mit Elektronikgeräten .....</b>	<b>251</b>
<b>Anlage 6: Theoretisches Potenzial in Elektronikgeräten .....</b>	<b>252</b>
<b>Anlage 7: Theoretisches Potenzial in Laptops .....</b>	<b>254</b>
<b>Anlage 8: Recyclingverfahren .....</b>	<b>255</b>
Antimon .....	255
Beryllium.....	257
Germanium .....	259
Kobalt.....	261
Molybdän .....	264
Platinmetalle .....	265
Seltenerdmetalle .....	267

Tantal .....	270
Titan .....	272
Wolfram .....	273

## Anlage 1: Fact-Sheets

### Antimon

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>8</b>
--	----------

Globale Aspekte	
Anwendungsgebiete	Zukunftstechnologien
Flammschutzadditiv in Kunststoffindustrie (72%)	Halbleiter
Batterien (19%)	Mikrokondensatoren
Katalysator zur PET-Erzeugung	Displays
Branchen	
Chemische Industrie (besonders WZ 20.1)	
Elektroindustrie (besonders WZ 27.2)	
Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte	
Regionale Konzentration der Produktion	Regionale Konzentration der Reserven
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	8 090 (sehr stark)
Länderkonzentration	äußerst hoch
	China (90%)
	2 290 (mittelmäßig)
	erhöht
	China (37%)
	Thailand (20%)
	Russland (17%)
Preisentwicklung [US-Dollar/kg]	Primärgewinnung weltweit [t]
<p>Preis Antimon US\$ / kg</p> <p>2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013</p>	2010 167 000
	2011 178 000
	2012 174 000
	2013 163 000
Globale Reserven [t]	
2010	2 114 000
2014	1 800 000
Statische Reichweiten [a]	
Reserven	13
Ressourcen	24
Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette	
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)	Versorgung kritisch
Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)	schwach
Gegenstand des Dodd-Frank-Act	nein
Anteil von Kleinbergbau	k.A.
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	nein

<b>Umweltwirkungen</b>			
<b>Ressourcen-indikator</b>	<b>Einheit</b>	<b>je Tonne</b>	<b>je Weltjahresproduktion 2010</b>
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	6,7	1 120 170
Kumulierter Energieaufwand	MJ	141,4	23 618 615
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	466	77 903 830
UEBEL-Index		9,33 * 10 <sup>-5</sup> [UEBEL * a]	15,57 [UEBEL]
<b>Human- und Ökotoxizität</b>			
<b>Indikator</b>		<b>je Tonne</b>	<b>je Weltjahresproduktion 2010</b>
		[t 1,4-DCB-Äquivalente]	[kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		29	4 850
Ökotoxizität		1 822	304 228

<b>BW-spezifische Aspekte</b>					
<b>Potenziale in Abfällen</b>					
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>	
Papier und Druck	2,2	Verpackungen	n.b	– Antimonrecycling in starkem Maße von Automobilindustrie abhängig – dissipative Verteilung und niedrige Antimonkonzentrationen im Endprodukt stehen dem Recycling entgegen	
Chemische Industrie	2,7	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	24		
Metallindustrie	3,1	Leuchtstoffröhren	i.B.		
Elektroindustrie	0,6	Batterien und Akkumulatoren	i.B.		
Maschinenbau	1,2	Elektroaltgeräte	i.B.		
Fahrzeugbau	1,1	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b		
<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>				<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen					5
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen					1
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG				[t]	1 455
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG				[t]	1 434

Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport	[%]	98,6
Bemerkungen: vorwiegend Antimonoxide von Bedeutung		
<b>Handlungsansätze</b>	<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
– Erkennung und Vermeidung dissipativer Verluste – Substitution	AK 1, AK 5	
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden	
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analysenergebnisse	
i.B.	in Bearbeitung	

## Beryllium

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>7</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>																																	
<b>Anwendungsgebiete</b>	<b>Zukunftstechnologien</b>	<b>Branchen</b>																															
Elektronik- und Telekommunikation-Produkte (42%) Verteidigungsanwendungen (11%) Industrie und Luftfahrt (11%) Energiesektor (8%) Transport (Automobile), Medizin-geräte und andere Anwendungen (28%)	Elektronik- und IT-Produkte  Elektromobilität	Elektroindustrie (gesamte Branche)  Fahrzeugbau (besonders WZ 29.1 / 30.1 / 30.3) Metallindustrie (besonders WZ 24.2) Maschinenbau (gesamte Branche)																															
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>																																	
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>		<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>																															
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	7 826 (sehr stark)	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	k.A.																														
Länderkonzentration	hoch USA (88%) China (11%)	Länderkonzentration	hoch mangelhafte Datenlage																														
<b>Preisentwicklung [US-Dollar/kg]</b>		<b>Primärgewinnung weltweit [t]</b>	<b>Globale Reserven [t]</b>																														
<table border="1"> <caption>Preisentwicklung Beryllium [US-Dollar/kg]</caption> <thead> <tr> <th>Jahr</th> <th>Preis [US\$/kg]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2007</td><td>300</td></tr> <tr><td>2008</td><td>350</td></tr> <tr><td>2009</td><td>320</td></tr> <tr><td>2010</td><td>500</td></tr> <tr><td>2011</td><td>450</td></tr> <tr><td>2012</td><td>450</td></tr> </tbody> </table>		Jahr	Preis [US\$/kg]	2007	300	2008	350	2009	320	2010	500	2011	450	2012	450	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Jahr</th> <th>Primärgewinnung [t]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2010</td><td>205</td></tr> <tr><td>2011</td><td>260</td></tr> <tr><td>2012</td><td>250</td></tr> <tr><td>2013</td><td>240</td></tr> </tbody> </table>	Jahr	Primärgewinnung [t]	2010	205	2011	260	2012	250	2013	240	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Jahr</th> <th>Reserven [t]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2010</td><td>&gt; 80 000</td></tr> <tr><td>2014</td><td>&gt; 80 000</td></tr> </tbody> </table>	Jahr	Reserven [t]	2010	> 80 000	2014	> 80 000
Jahr	Preis [US\$/kg]																																
2007	300																																
2008	350																																
2009	320																																
2010	500																																
2011	450																																
2012	450																																
Jahr	Primärgewinnung [t]																																
2010	205																																
2011	260																																
2012	250																																
2013	240																																
Jahr	Reserven [t]																																
2010	> 80 000																																
2014	> 80 000																																
		<b>Statische Reichweiten [a]</b>																															
		Reserven	k.A.																														
		Ressourcen	390																														
<b>Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette</b>																																	
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)			Versorgungsrisiko niedrig																														

Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)	mittel
Gegenstand des Dodd-Frank-Act	nein
Anteil von Kleinbergbau	k.A.
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	nein

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	k.A.	k.A.
Kumulierter Energieaufwand	MJ	k.A.	k.A.
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	k.A.	k.A.
UEBEL-Index		k.A.	k.A.
Human- und Ökotoxizität			
Indikator		je Tonne [t 1,4-DCB-Äquivalente]	je Weltjahresproduktion 2010 [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		k.A.	k.A.
Ökotoxizität		k.A.	k.A.

BW-spezifische Aspekte				
Potenziale in Abfällen				
Gewerblich	[t]	Kommunal	[t]	Defizite bei der Rückgewinnung
Papier und Druck	2,1	Verpackungen	n.b	– niedrige Recyclingquoten aufgrund langer Lebenszyklen der Güter und Anwendungen im nuklearen Bereich – Gesundheitsgefährdung durch toxische Stäube erfordert besondere Vorkehrungen beim Recycling – begrenzter Markt für Recyclingmaterial
Chemische Industrie	< 0,1	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	0,4	
Metallindustrie	2,2	Leuchtstoffröhren	i.B.	
Elektroindustrie	< 0,1	Batterien und Akkumulatoren	i.B.	
Maschinenbau	< 0,1	Elektroaltgeräte	i.B.	
Fahrzeugbau	< 0,1	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b	



<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>	<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen		3
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen		2
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG	[kg]	94
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG	[kg]	94
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport	[%]	100
Bemerkungen: Gesamtimportmenge erscheint sehr gering, teilweise Datensätze aus Geheimhaltungsgründen nicht verfügbar		
<b>Handlungsansätze</b>	<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
– Schaffung Datengrundlage / Datentransparenz	AK 3	
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden	
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analyseergebnisse	
i.B.	in Bearbeitung	

## Germanium

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>3</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>					
<b>Anwendungsgebiete</b>		<b>Zukunftstechnologien</b>		<b>Branchen</b>	
Infraroptik (30%) Telekommunikation / Glasfaser (20%) Katalysator für Polymererzeugung / PET (20%) Elektronik und Solartechnologien (15%) Andere Anwendungen: Metallindustrie, Medizintechnik (15%)		Glasfaserkabel Infraroptik (Linsen, Fenster, Nachtsichtgeräte) Photovoltaik		Chemische Industrie (besonders WZ 20.1) Elektroindustrie (besonders WZ 26.1 / 26.5 / 26.7 / 27.3)	
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>					
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>		<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>			
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	4 621 (sehr stark)	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	> 5 041 (sehr stark)		
Länderkonzentration	hoch	Länderkonzentration	hoch		
	China (68%) Russland (4%) USA (3%)		China (71%)		
<b>Preisentwicklung [US-Dollar/kg]</b>		<b>Primärgewinnung weltweit [t]</b>	<b>Globale Reserven [t]</b>		
		2010	118	2010	k.A.
		2011	118	2014	k.A.
		2012	128		
		2013	150		
				<b>Statische Reichweiten [a]</b>	
				Reserven	> 4
				Ressourcen	212
<b>Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette</b>					
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI) Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)			Versorgung kritisch am schwächsten		

Gegenstand des Dodd-Frank-Act	nein
Anteil von Kleinbergbau	k.A.
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	ja

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	k.A.	k.A.
Kumulierter Energieaufwand	MJ	k.A.	k.A.
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	k.A.	k.A.
UEBEL-Index		k.A.	k.A.
Human- und Ökotoxizität			
Indikator		je Tonne [t 1,4-DCB-Äquivalente]	je Weltjahresproduktion 2010 [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		k.A.	k.A.
Ökotoxizität		k.A.	k.A.

BW-spezifische Aspekte				
Potenziale in Abfällen				
Gewerblich	[t]	Kommunal	[t]	Defizite bei der Rückgewinnung
Papier und Druck	n.b.	Verpackungen	n.b.	– niedrige Recyclingquoten in den Bereichen Optik und Elektronik wegen geringer Gehalte im Endprodukt – lückenhafte Datenlage wegen militärischer Relevanz
Chemische Industrie	n.b.	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	n.b.	
Metallindustrie	n.b.	Leuchtstoffröhren	i.B.	
Elektroindustrie	n.b.	Batterien und Akkumulatoren	i.B.	
Maschinenbau	n.b.	Elektroaltgeräte	i.B.	
Fahrzeugbau	n.b.	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.	

<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>	<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen		3
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen		2
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG	[t]	2 170
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG	[t]	2 170
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport	[%]	100
Bemerkungen: Gesamtimportmenge erscheint sehr gering, teilweise Datensätze aus Geheimhaltungsgründen nicht verfügbar		
<b>Handlungsansätze</b>	<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Potenziale der Rückgewinnung aus Flugaschen von Kohlekraftwerken</li> <li>– Germaniumkonzentration von Produktionsrückständen liegt über der Konzentration natürlicher Vorkommen</li> <li>– Ausbau der Analytik (derzeit keine Potenziale bestimmbar)</li> <li>– Schaffung Datengrundlage / Datentransparenz</li> </ul>	AK 1, AK 3, AK 5	
k.A. keine Angaben / Daten vorhanden n.b. nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analyseergebnisse i.B. in Bearbeitung		

## Kobalt

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>4</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>					
<b>Anwendungsgebiete</b>		<b>Zukunftstechnologien</b>		<b>Branchen</b>	
Batterien (27%)		Lithium-Ionen-Batterien		Chemische Industrie (besonders WZ 20.1) Elektroindustrie (besonders WZ 27.2) Metallindustrie (besonders WZ 24.4 / 24.5 / 24.7)	
Superlegierungen und Magnete (26%)		Superlegierungen			
Hartmetalle (14%)		Katalysatoren für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe			
Pigmente (10%)					
Katalysatoren in der Petrochemie (9%)					
Andere Anwendungen (14%)					
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>					
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>		<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>			
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	3 079 (sehr stark)	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	3 279 (sehr stark)		
Länderkonzentration	hoch	Länderkonzentration	hoch		
	DR Kongo (53%)		DR Kongo (51%)		
	Russland (7%)		Australien (23%)		
	China (7%)		Kuba (8%)		
<b>Preisentwicklung [US-Dollar/kg]</b>		<b>Primärgewinnung weltweit [t]</b>	<b>Globale Reserven [t]</b>		
<p>Preis Kobalt US\$ / kg</p> <p>2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013</p>		2010	89 450	2010	6 604 000
		2011	109 100	2014	7 200 000
		2012	103 000		
		2013	120 000	<b>Statische Reichweiten [a]</b>	
				Reserven	74
		Ressourcen	168		
<b>Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette</b>					
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI) Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)			Versorgung kritisch schwach		

Gegenstand des Dodd-Frank-Act	nein
Anteil von Kleinbergbau	30%
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	ja (ca. 85%)

<b>Umweltwirkungen</b>			
<b>Ressourcen-indikator</b>	<b>Einheit</b>	<b>je Tonne</b>	<b>je Weltjahresproduktion 2010</b>
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	4,8	433 276
Kumulierter Energieaufwand	MJ	128,4	11 483 420
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	367	32 852 302
UEBEL-Index		$5,51 \cdot 10^{-5}$ [UEBEL*a]	4,93 [UEBEL]
<b>Human- und Ökotoxizität</b>			
<b>Indikator</b>		<b>je Tonne</b> [t 1,4-DCB-Äquivalente]	<b>je Weltjahresproduktion 2010</b> [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		4	373
Ökotoxizität		29	2.563

<b>BW-spezifische Aspekte</b>				
<b>Potenziale in Abfällen</b>				
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>
Papier und Druck	0,7	Verpackungen	n.b.	– Verfahren zur Rückgewinnung vorhanden, Recycling ist jedoch aufgrund der Heterogenität des Recyclingsubstrats schwierig
Chemische Industrie	48,5	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	9	
Metallindustrie	173,1	Leuchtstoffröhren	i.B.	
Elektroindustrie	0,6	Batterien und Akkumulatoren	i.B.	
Maschinenbau	307,8	Elektroaltgeräte	i.B.	
Fahrzeugbau	95,5	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.	

<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>	<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen		6
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen		2
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG	[t]	945
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG	[t]	687
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport	[%]	72,7
Bemerkungen: Gesamtimportmenge erscheint sehr gering, teilweise Datensätze aus Geheimhaltungsgründen nicht verfügbar		
<b>Handlungsansätze</b>	<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Großes Potenzial im Tiefseebergbau und Biomining</li> <li>– Elementspezifisches Recyclingziel (hohe Potenziale in gewerblichen Abfällen)</li> </ul>	AK 1, AK 2, AK 4, AK 5	
k.A. keine Angaben / Daten vorhanden		
n.b. nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analyseergebnisse		
i.B. in Bearbeitung		

## Molybdän

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>9</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>				
<b>Anwendungsgebiete</b>		<b>Zukunftstechnologien</b>		<b>Branchen</b>
Edelstahlindustrie (29%) Volllegierungsstahl (17%) Werkzeug- und Schnelldrehstahl (10%) C-Stahl (9%) HSLA-Stahl (8%) Katalysator in der Erdölraffination (8%) Molybdänstahl und -legierungen (7%) Superlegierungen (5%) Gusseisen (3%) Schmiermittel (3%) Andere Anwendungen (1%)		Meerwasserentsalzung Medizintechnik Erneuerbare Energien-Technologien (Dünnschicht-Photovoltaik, Windkraft) Superlegierungen		Metallindustrie (besonders WZ 24.1 / 24.4 / 24.5)
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>				
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>		<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>		
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	2 432 (mittelmäßig)	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	2 609 (stark)	
Länderkonzentration	erhöht	Länderkonzentration	erhöht	
	China (39%)		China (38%)	
	USA (25%)		USA (31%)	
	Chile (15%)		Chile (13%)	



Preisentwicklung [US-Dollar/kg]	Primärgewinnung weltweit [t]	Globale Reserven [t]
<p>Preis Molybdän US\$ / kg</p>	2010 241 670	2010 8 705 000
	2011 263 860	2014 11 000 000
	2012 259 000	
	2013 270 000	
		Statische Reichweiten [a]
		Reserven 36
		Ressourcen 80

Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette	
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)	mäßiges Risiko
Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)	mittel
Gegenstand des Dodd-Frank-Act	nein
Anteil von Kleinbergbau	k.A.
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	ja (54%)

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	6,4	1 555 668
Kumulierter Energieaufwand	MJ	150,6	36 399 740
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	461	111 310 785
UEBEL-Index		1,12 * 10 <sup>-4</sup> [UEBEL*a]	27,10 [UEBEL]
Human- und Ökotoxizität			
Indikator		je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
		[t 1,4-DCB-Äquivalente]	[kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		43	886 663
Ökotoxizität		3 669	10 424

<b>BW-spezifische Aspekte</b>				
<b>Potenziale in Abfällen</b>				
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>
Papier und Druck	0,7	Verpackungen	n.b.	– verbleibt als Ferromolybdän in Altstählen der Stahlindustrie
Chemische Industrie	<0,1	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	4	
Metallindustrie	2,4	Leuchtstoffröhren	i.B.	
Elektroindustrie	0,2	Batterien und Akkumulatoren	i.B.	
Maschinenbau	0,3	Elektroaltgeräte	i.B.	
Fahrzeugbau	0,4	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.	
<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>				
Anzahl der betrachteten Warengruppen				10
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen				3
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG				[t] 4 699
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG				[t] 4 077
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport				[%] 86,7
Bemerkungen: Gesamtimportmenge erscheint sehr gering, teilweise Datensätze aus Geheimhaltungsgründen nicht verfügbar				
<b>Handlungsansätze</b>				<b>Relevante Arbeitskreise</b>
– Stoffstromanalyse				AK 2
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden			
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analyseergebnisse			
i.B.	in Bearbeitung			

## Platinmetalle

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>9</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>	
<b>Anwendungsgebiete</b>	<b>Zukunftstechnologien</b>
Katalysatoren Chemie Industrie Petrochemie Elektroniksektor Glas- und Schmuckindustrie	Palladium: Katalysatoren, Meerwasserentsalzung Platin: Brennstoffzellen, Katalysatoren Ruthenium: Farbstoffsolarzellen, Legierungen
<b>Branchen</b>	
Fahrzeugbau (besonders WZ 29.3) Elektroindustrie (gesamte Branche) Metallindustrie (besonders WZ 24.4) Chemische Industrie (besonders 20.1)	
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>	
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>	<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) Palladium: 3 501 (sehr stark) Platin: 6 108 (sehr stark)	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) 7 906 (sehr stark)
Länderkonzentration Palladium: erhöhte Konzentration Russland (42%) Südafrika (41%) USA (6%) Platin: äußerst hoch Südafrika (77%) Russland (13%) Simbabwe (5%)	Länderkonzentration äußerst hoch Südafrika (89%) Russland (9%) USA (1%)

Preisentwicklung [US-Dollar/Feinunze]	Primärgewinnung weltweit [t]	Globale Reserven [t]
	2010	2010 71 210 2014 66 000
	Pd: 202	<b>Statische Reichweiten [a]</b>
	Pt: 193	
	2011	Reserven 180
	Pd: 215	Ressourcen 253
	Pt: 195	
	2012	
	Pd: 201	
	Pt: 183	
	2013	
Pd: 211		
Pt: 192		

Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette	
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)	Pd: mäßiges Risiko Pt: mäßiges Risiko
Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)	Pd: schwach Pt: am schwächsten
Gegenstand des Dodd-Frank-Act	nein
Anteil von Kleinbergbau	5%
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	ja

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	Pd: 5 090	Pd: 1 028 110
		Pt: 8 322	Pt: 1 606 226
		Ru: 20 781	Ru: 748 107
Kumulierter Energieaufwand	MJ	Pd: 181 499	Pd: 36 662 838
		Pt: 287 784	Pt: 55 542 283
		Ru: 34 335	Ru: 1 236 067

Wasserbedarf H <sub>2</sub> O- Fußabdruck m <sup>3</sup>	Pd: 307 880	Pd: 62 191 760
	Pt: 326 490	Pt: 63 012 570
	Ru: 34 928 404	Ru: 1 257 429 744
UEBEL-Index	Pd: 1,71 * 10 <sup>-2</sup> [UEBEL*a]	Pd: 3,45 [UEBEL]
	Pt: 2,76 * 10 <sup>-2</sup> [UEBEL*a]	Pt: 5,32 [UEBEL]
	Ru: 1,89 * 10 <sup>-3</sup> [UEBEL*a]	Ru: 0,07 [UEBEL]
<b>Human- und Ökotoxizität</b>		
<b>Indikator</b>	<b>je Tonne</b> [t 1,4-DCB-Äquivalente]	<b>je Weltjahresproduktion</b> <b>2010</b> [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität	Pd: 8 473 Pt: 9 320	Pd: 1 709 Pt: 1 795
Ökotoxizität	Pd: 442 048 Pt: 682 695	Pd: 89 179 Pt: 131 452

<b>BW-spezifische Aspekte</b>				
<b>Potenziale in Abfällen</b>				
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>
Papier und Druck	n.b.	Verpackungen	n.b.	– geringe Recyclingraten bei Elektroaltgeräten (ca. 10%), etwas besser bei Autokatalysatoren (> 50%), zum Teil bedingt durch Exporte in Schwellenländer – nur sehr wenige Anlagen weltweit für Ruthenium Recycling vorhanden
Chemische Industrie	n.b.	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	n.b.	
Metallindustrie	n.b.	Leuchtstoffröhren	i.B.	
Elektroindustrie	n.b.	Batterien und Akkumulatoren	i.B.	
Maschinenbau	n.b.	Elektroaltgeräte	i.B.	
Fahrzeugbau	n.b.	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.	

Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik	Einheit	
Anzahl der betrachteten Warengruppen		2 (Pd)
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen		6 (Pt)
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG	[t]	1 (Pd)
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG	[t]	0 (Pt)
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport	[%]	7,6 (Pd)
Bemerkungen:		167 (Pt)
Gesamtimportmenge erscheint sehr gering, teilweise Datensätze aus Geheimhaltungsgründen nicht verfügbar		1,4 (Pd)
		0 (Pt)
		17,9 (Pd)
		0 (Pt)
<b>Handlungsansätze</b>	<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
– Potenzial biometallurgischer Verfahren	AK 1, AK 2, AK 4	
– Ausweitung der Analytik		
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden	
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analyseergebnisse	
i.B.	in Bearbeitung	

## Seltenerdmetalle

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>9</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>				
<b>Anwendungsgebiete</b>		<b>Zukunftstechnologien</b>		<b>Branchen</b>
Magnete: Nd, Pr, Sm, La, Tb, Dy (21%)		Permanentmagnete, Lasertechnik (Neodym)		Fahrzeugbau (besonders WZ 29.3)
Katalysatoren: Ce, La, Pr, Nd, Y (20%)		Festoxid-(SOFC-) Brennstoffzellen, Al-Legierungselement (Scandium)		Elektroindustrie (besonders WZ 27.2 / 27.9)
Metallurgie (Legierungen, Batterien): La, Ce, Pr, Nd, Sm, Sc (18%)		Hochtemperatursupraleitung, Lasertechnik (Yttrium)		Metallindustrie (besonders WZ 24.1 / 24.4)
Polituren (15%)				Chemische Industrie (besonders WZ 20.1)
Gläser (9%)				
Keramik: Ce, La, Y, Pr, Nd (6%)				
Leuchtmittel: Ce, La, Eu, Tb, Y, Gd (7%)				
Sonstiges (4%)				
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>				
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>		<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>		
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	9 504 (sehr stark)	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	2 417 (mittelmäßig)	
Länderkonzentration	äußerst hoch China (97%) Indien (2%)	Länderkonzentration	erhöhte Konzentration China (37%) GUS-Staaten (19%) USA (13%)	

Preisentwicklung [US-Dollar/kg] [US-Dollar/t]	Primärgewinnung weltweit [t]	Globale Reserven [t]
	2010 133 380	2010 98 578 000
	2011 110 530	2014 140 000 000
	2012 110 000	
	2013 110 000	
		Statische Reichweiten [a]
		Reserven 739
		Ressourcen 2 437

Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette	
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)	Versorgung kritisch
Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)	schwach
Gegenstand des Dodd-Frank-Act	nein
Anteil von Kleinbergbau	k.A.
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	ja

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	Cer-Oxid-Konzentrat: 4,9	Cer-Oxid-Konzentrat: 264 978
		Lanthan-Oxid: 5,4	Lanthan-Oxid: 195 049
		Neodym-Oxid: 19,5	Neodym-Oxid: 423 968
		Praseodym-Oxid: 2	Praseodym-Oxid: 136 357
Kumulierter Energieaufwand	MJ	Cer-Oxid-Konzentrat: 161	Cer-Oxid-Konzentrat: 8 608 469
		Lanthan-Oxid: 181	Lanthan-Oxid: 6 492 435
		Neodym-Oxid: 761	Neodym-Oxid: 16 554 183



		Praseodym-Oxid: 818	Praseodym-Oxid: 5 344 124
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O- Fußabdruck	m <sup>3</sup>	Cer-Oxid-Konzentrat: 93	Cer-Oxid-Konzentrat: 4 972 389
		Lanthan-Oxid: 103	Lanthan-Oxid: 3 683 361
		Neodym-Oxid: 385	Neodym-Oxid: 8 372 219
		Praseodym-Oxid: 412	Praseodym-Oxid: 2 695 682
UEBEL-Index		Cer-Oxid-Konzentrat: 1,19 * 10 <sup>-5</sup> [UEBEL*a]	Cer-Oxid-Konzentrat: 0,53 [UEBEL]
		Lanthan-Oxid: 1,08 * 10 <sup>-5</sup> [UEBEL*a]	Lanthan-Oxid: 0,39 [UEBEL]
		Neodym-Oxid: 3,56 * 10 <sup>-5</sup> [UEBEL*a]	Neodym-Oxid: 0,25 [UEBEL]
		Praseodym-Oxid: 3,79 * 10 <sup>-5</sup> [UEBEL*a]	Praseodym-Oxid: 0,07 [UEBEL]
<b>Human- und Ökotoxizität</b>			
<b>Indikator</b>		<b>je Tonne</b> [t 1,4-DCB-Äquivalente]	<b>je Weltjahresproduktion 2010</b> [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		Cer-Oxid-Konzentrat: 4	Cer-Oxid-Konzentrat: 226
		Lanthan-Oxid: 5	Lanthan-Oxid: 171
		Neodym-Oxid: 21	Neodym-Oxid: 449
		Praseodym-Oxid: 22	Praseodym-Oxid: 145
Ökotoxizität		Cer-Oxid-Konzentrat: 26	Cer-Oxid-Konzentrat: 1 390
		Lanthan-Oxid: 29	Lanthan-Oxid: 1 039
		Neodym-Oxid: 117	Neodym-Oxid: 2 543
		Praseodym-Oxid: 125	Praseodym-Oxid: 820

<b>BW-spezifische Aspekte</b>				
<b>Potenziale in Abfällen</b>				
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>
Papier und Druck	n.b.	Verpackungen	n.b.	– ineffiziente Sammlung, geringe Gehalte und Konzentration in Konsumgütern
Chemische Industrie	0,6	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	n.b.	

Metallindustrie	n.b.	Leuchtstoffröhren	i.B.	– nur eine Großanlage in Europa, die Batterien und Leuchtmittel recycelt – Verschwiegenheit der Branche – Quelle im gewerblichen Bereich: gemischte Bau- und Abbruchabfälle, Rückgewinnung nicht realistisch	
Elektroindustrie	n.b.	Batterien und Akkumulatoren	i.B.		
Maschinenbau	< 0,1	Elektroaltgeräte	i.B.		
Fahrzeugbau	0,6	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.		
<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>				<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen					3
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen					0
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG				[t]	60
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG				[t]	0
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport				[%]	0
Bemerkungen: In der Außenhandelsstatistik werden keine einzelnen Elemente ausgewiesen					
<b>Handlungsansätze</b>				<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
– Ausweitung der Analytik – Stoffstromanalyse nach Hauptanwendungsgebieten – Elementspezifische Recyclingziele für ausgewählte Elemente (Neodym, Dysprosium)				AK 1 – AK 5	
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden				
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analyseergebnisse				
i.B.	in Bearbeitung				

## Tantal

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>2</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>					
<b>Anwendungsgebiete</b>		<b>Zukunftstechnologien</b>		<b>Branchen</b>	
Kondensatoren einschl. Draht (42%)		Mikroelektrische Kondensatoren		Elektroindustrie (gesamte Branche)	
Ta-metallbasierte Walzprodukte (20%)		Medizintechnologie		Metallindustrie (besonders WZ 24.4 / 25.7)	
Legierungszusätze, Superlegierungen, etc. (16%)				Maschinenbau (besonders WZ 28.1)	
Oxide und Chemikalien (14%)				Fahrzeugbau (besonders WZ 30.3)	
Carbide in Hartmetallen (8%)					
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>					
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>			<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>		
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	2 020 (mittelmäßig)		Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)	4 070 (sehr stark)	
Länderkonzentration	schwach erhöht		Länderkonzentration	sehr hoch	
	Brasilien (26%)			Brasilien (62%)	
	DR Kongo (25%)			Australien (38%)	
	Mozambique (18%)				

Preisentwicklung [US-Dollar/kg]	Primärgewinnung weltweit [t]	Globale Reserven [t]
<p>Preis Tantal US\$ / kg Ta2O5</p> <p>2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013</p>	2010	681
	2011	767
	2012	670
	2013	590
	2010	105 000
	2014	> 100 000
	<b>Statische Reichweiten [a]</b>	
	Reserven	154
	Ressourcen	288

Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette	
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)	Versorgung kritisch am schwächsten
Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)	
Gegenstand des Dodd-Frank-Act	ja
Anteil von Kleinbergbau	20-26%
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	ja (40%)

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	123	83 986
Kumulierter Energieaufwand	MJ	4 358	2 968 107
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	9 038	6 154 606
UEBEL-Index		1,16 * 10 <sup>-3</sup> [UEBEL*a]	0,86 [UEBEL]
Human- und Ökotoxizität			
Indikator		je Tonne	je Weltjahresproduktion 2010
		[t 1,4-DCB-Äquivalente]	[kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		169	115
Ökotoxizität		1 082	737

<b>BW-spezifische Aspekte</b>					
<b>Potenziale in Abfällen</b>					
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>	
Papier und Druck	n.b.	Verpackungen	n.b.	– Preisverfall bei Zinn macht das Recycling aus Zinnschlacken unrentabel – leichte Oxidation erschwert Recycling – dissipative Verteilung in Endprodukten – beim Recycling von Kondensatoren und Leiterplatten: »Verunreinigungen« durch Antimon und Phosphor	
Chemische Industrie	n.b.	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	n.b.		
Metallindustrie	n.b.	Leuchtstoffröhren	i.B.		
Elektroindustrie	n.b.	Batterien und Akkumulatoren	i.B.		
Maschinenbau	n.b.	Elektroaltgeräte	i.B.		
Fahrzeugbau	n.b.	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.		
<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>				<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen					8
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen					2
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG				[t]	682
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG				[t]	680
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport				[%]	99,8
Bemerkungen: Gesamtimportmenge erscheint sehr gering, teilweise Datensätze aus Geheimhaltungsgründen nicht verfügbar					
<b>Handlungsansätze</b>				<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geschätztes Potenzial im Hausmüll groß</li> <li>– Ausweitung der Analytik</li> <li>– Erkennung und Vermeidung dissipativer Verluste</li> <li>– Elementspezifisches Recycling</li> </ul>				AK 1, AK 3, AK 5	
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden				
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analyseergebnisse				
i.B.	in Bearbeitung				

## Titan

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>10</b>
--	-----------

<b>Globale Aspekte</b>	
<b>Anwendungsgebiete</b>	<b>Zukunftstechnologien</b>
Titandioxid (95%): Farbe, Kunststoffe, Papier, Katalysatoren, Keramik Titanmetall (5%): Luft- und Raumfahrt, Anlagenbau, medizinische Anwendungen	Miniaturisierte Kondensatoren Meerwasserentsalzung Orthopädische Implantate Farbstoffsolarzellen
<b>Branchen</b>	
Chemische Industrie (besonders WZ 20.1) Papier und Druckindustrie (besonders WZ 17.1) Metallindustrie (besonders WZ 24.1 / 24.4) Fahrzeugbau (besonders WZ 30.3)	
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>	
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>	<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) Ilmenit: 1 115 (mittelmäßig) Rutil: 3 522 (stark)	Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) Ilmenit: 1 598 (mittelmäßig) Rutil: 3 015 (stark)
Länderkonzentration Ilmenit: keine Besonderheiten Australien (17%) Südafrika (17%) Kanada (13%) Rutil: hohe Konzentration Australien (54%) Südafrika (22%) Sierra Leone (10%)	Länderkonzentration Ilmenit: schwach erhöht China (29%) Australien (19%) Indien (12%) Rutil: erhöhte Konzentration Australien (48%) Südafrika (18%) Indien (16%)

Preisentwicklung [US-Dollar/kg]	Primärgewinnung weltweit [t]	Globale Reserven [t]
	2010	6 438 000
	2011	6 829 000
	2012	7 230 000
	2013	7 550 000
		2010 729 980
		2014 748 000
		<b>Statische Reichweiten [a]</b>
		Reserven 107
		Ressourcen 293

Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette	
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)	Ilmenit: mäßiges Risiko
Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)	Rutil: niedriges Risiko
Gegenstand des Dodd-Frank-Act	Ilmenit: schwach
Anteil von Kleinbergbau	Rutil: schwach
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion	nein
	k.A.
	nein

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne TiO <sub>2</sub>	je Weltjahresproduktion TiO <sub>2</sub> 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	2,2	14 054 887
Kumulierter Energieaufwand	MJ	88,6	570 388 377
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	71	455 932 722
UEBEL-Index		5,73 * 10 <sup>-6</sup> [UEBEL*a]	36,86 [UEBEL]
Human- und Ökotoxizität			
Indikator		je Tonne [t 1,4-DCB-Äquivalente]	je Weltjahresproduktion 2010 [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		1	7 030
Ökotoxizität		18	118 291

<b>BW-spezifische Aspekte</b>					
<b>Potenziale in Abfällen</b>					
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>	
Papier und Druck	13,3	Verpackungen	n.b.	– gutes Recyclingpotenzial bei metallischem Titan, aber sehr hohe Qualitätsanforderungen aus der Flugzeugindustrie – kein marktfähiges Recyclingverfahren für Titandioxid (Weißpigment)	
Chemische Industrie	23	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	1 500		
Metallindustrie	9,6	Leuchtstoffröhren	i.B.		
Elektroindustrie	n.b.	Batterien und Akkumulatoren	i.B.		
Maschinenbau	5,1	Elektroaltgeräte	i.B.		
Fahrzeugbau	n.b.	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.		
<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>				<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen					13
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen					2
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG				[t]	54 547
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG				[t]	50 516
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport				[%]	92,6
Bemerkungen: Gesamtimportmenge erscheint sehr gering, teilweise Datensätze aus Geheimhaltungsgründen nicht verfügbar					
<b>Handlungsansätze</b>				<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
– Potenziale in Filterstäuben im Bereich gewerblicher Abfälle – Potenziale in Deinking-Schlämmen				AK 1, AK 5	
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden				
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analysenergebnisse				
i.B.	in Bearbeitung				



## Wolfram

<b>Bedeutung des Rohstoffs für Baden-Württemberg / Platzierung im Rohstoff-Ranking</b>	<b>6</b>
--	----------

<b>Globale Aspekte</b>																																						
<b>Anwendungsgebiete</b>		<b>Zukunftstechnologien</b>		<b>Branchen</b>																																		
Hartmetalle und Spritzpulver (63 %) Legierte Stähle (15 %) Wolfram-Metall, Walzprodukte und Schwermetalle (13 %) Chemikalien (5 %) Superlegierungen (4 %)		Superlegierungen (Luft- und Raumfahrt)		Metallindustrie (besonders WZ 24.1 / 24.4 / 25.4) Elektroindustrie (besonders WZ 27.4)																																		
<b>Produktion und weltwirtschaftliche Aspekte</b>																																						
<b>Regionale Konzentration der Produktion</b>			<b>Regionale Konzentration der Reserven</b>																																			
Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)		7 397 (sehr stark)		Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)		4 567 (stark)																																
Länderkonzentration		äußerst hoch		Länderkonzentration		hoch																																
		China (86%) Russland (4%)				China (65%) USA (5%) Kanada (4%)																																
<b>Preisentwicklung [US-Dollar/kg]</b>			<b>Primärgewinnung weltweit [t]</b>		<b>Globale Reserven [t]</b>																																	
<table border="1"> <caption>Preisentwicklung [US-Dollar/kg]</caption> <thead> <tr> <th>Jahr</th> <th>Preis [US\$/kg]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2007</td><td>240</td></tr> <tr><td>2008</td><td>240</td></tr> <tr><td>2009</td><td>200</td></tr> <tr><td>2010</td><td>240</td></tr> <tr><td>2011</td><td>430</td></tr> <tr><td>2012</td><td>380</td></tr> <tr><td>2013</td><td>370</td></tr> </tbody> </table>			Jahr	Preis [US\$/kg]	2007	240	2008	240	2009	200	2010	240	2011	430	2012	380	2013	370	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Jahr</th> <th>Primärgewinnung [t]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2010</td><td>68 820</td></tr> <tr><td>2011</td><td>72 990</td></tr> <tr><td>2012</td><td>75 700</td></tr> <tr><td>2013</td><td>71 000</td></tr> </tbody> </table>		Jahr	Primärgewinnung [t]	2010	68 820	2011	72 990	2012	75 700	2013	71 000	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Jahr</th> <th>Globale Reserven [t]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2010</td><td>2 767 200</td></tr> <tr><td>2014</td><td>3 500 000</td></tr> </tbody> </table>		Jahr	Globale Reserven [t]	2010	2 767 200	2014	3 500 000
Jahr	Preis [US\$/kg]																																					
2007	240																																					
2008	240																																					
2009	200																																					
2010	240																																					
2011	430																																					
2012	380																																					
2013	370																																					
Jahr	Primärgewinnung [t]																																					
2010	68 820																																					
2011	72 990																																					
2012	75 700																																					
2013	71 000																																					
Jahr	Globale Reserven [t]																																					
2010	2 767 200																																					
2014	3 500 000																																					
					<b>Statische Reichweiten [a]</b>																																	
					Reserven 40																																	
					Ressourcen 101																																	
<b>Relevante Aspekte der Liefer- und Wertschöpfungskette</b>																																						
Gewichtetes Länderrisiko nach Worldwide Governance Indicators (WGI)					mäßiges Risiko																																	
Umweltleistungen der Förderländer nach Environmental Performance Index (EPI)					schwach																																	
Gegenstand des Dodd-Frank-Act					ja																																	
Anteil von Kleinbergbau					> 6%																																	
Überwiegend Gewinnung in Koppelproduktion					nein																																	

<b>Umweltwirkungen</b>			
<b>Ressourcen-indikator</b>	<b>Einheit</b>	<b>je Tonne</b>	<b>je Weltjahresproduktion 2010</b>
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	343	23 602 803
Kumulierter Energieaufwand	MJ	52,4	3 606 994
Wasserbedarf H <sub>2</sub> O-Fußabdruck	m <sup>3</sup>	148 327	10 207 864 140
UEBEL-Index		2,53 * 10 <sup>-5</sup> [UEBEL*a]	1,74 [UEBEL]
<b>Human- und Ökotoxizität</b>			
<b>Indikator</b>		<b>je Tonne</b> [t 1,4-DCB-Äquivalente]	<b>je Weltjahresproduktion 2010</b> [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		k.A.	k.A.
Ökotoxizität		k.A.	k.A.

<b>BW-spezifische Aspekte</b>					
<b>Potenziale in Abfällen</b>					
<b>Gewerblich</b>	<b>[t]</b>	<b>Kommunal</b>	<b>[t]</b>	<b>Defizite bei der Rückgewinnung</b>	
Papier und Druck	n.b.	Verpackungen	n.b.	– Recycling wolframhaltiger Schrotte gut etabliert	
Chemische Industrie	< 0,1	Rost- und Kesselaschen, Schlacke	6		
Metallindustrie	n.b.	Leuchtstoffröhren	i.B.		
Elektroindustrie	n.b.	Batterien und Akkumulatoren	i.B.		
Maschinenbau	< 0,1	Elektroaltgeräte	i.B.		
Fahrzeugbau	< 0,1	Gemischte Siedlungsabfälle / Sperrmüll	n.b.		
<b>Importe nach BW nach Außenhandelsstatistik</b>				<b>Einheit</b>	
Anzahl der betrachteten Warengruppen					14
Anzahl der überdurchschnittlichen Warengruppen					2
Gesamtimportmenge aller betrachteter WG				[t]	1 932
Gesamtimportmenge der überdurchschnittlichen WG				[t]	1 372
Anteil überdurchschnittlicher WG an Gesamtimport				[%]	71,0

Bemerkungen: Vorwiegend Abfälle und Schrott aus Wolfram und Ferrowolfram			
<b>Handlungsansätze</b>		<b>Relevante Arbeitskreise</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Stoffstromanalyse (insbesondere Post-Consumer-Bereich)</li> <li>– Ausweitung der Analytik</li> </ul>		AK 1, AK 3	
k.A.	keine Angaben / Daten vorhanden		
n.b.	nicht bestimmbar, keine oder zu wenige Analysenergebnisse		
i.B.	in Bearbeitung		

## Glossar für Fact-Sheets<sup>5</sup>

**Dodd-Frank Act:** der US-amerikanische Gesetzestext fordert von in den USA börsennotierten Unternehmen Rechenschaft über die Herkunft von Konfliktmineralien. Hierdurch soll die Rohstoffextraktion transparenter gestaltet werden. Artikel 1502 des Dodd-Frank Act über Konfliktmineralien führt Erze auf, deren Förderung in Zusammenhang mit bewaffneten Konflikten steht.

**Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI):** bewertet die Länderkonzentration eines Rohstoffmarktes. Die Anteile der Förderländer an der Rohstoffproduktion oder den -reserven werden jeweils quadriert und aufsummiert. Hierdurch ergibt sich folgende Bewertungsskala:

Beurteilung der Marktkonzentration nach HHI		
niedrige Konzentration	mittelmäßige Konzentration	starke Konzentration
< 1 000	1 000 – 2 500	> 2 500

**Kleinbergbau:** (engl. artisanal and small-scale mining) ist geprägt durch einen niedrigen Technisierungsgrad und durch seinen informellen Charakter; wird z.T. illegal von bewaffneten Gruppen organisiert und kann so zur Finanzierung bewaffneter Konflikte beitragen.

**Koppelproduktion:** Gewinnung eines Rohstoffes als Nebenprodukt von Hauptmetallen. Dieser Rohstoff kann erst durch einen notwendigen Zwischenschritt wirtschaftlich abgebaut werden und sein globales Angebot hängt dadurch von der Gewinnung des Hauptmetalls ab, wodurch beispielsweise bei Absatzrückgängen des Hauptmetalls Ressourcenknappheit droht.

**Regionale Konzentration des Rohstoffmarktes:** Die geographische Konzentration der Rohstoffe wird sowohl hinsichtlich ihrer Gewinnung als auch ihrer Reserven analysiert.

Konzentration der Produktion und Reserven	
hohe Konzentration	> 50% in 1 Land
erhöhte Konzentration	> 50% in 3 Ländern
keine Besonderheiten	Verteilung der Produktion auf viele Länder
mangelhafte Datenlage	Fehlende Daten zu Marktanteilen

<sup>5</sup> Die Definitionen und Beschreibungen im Glossar basieren auf [BGR 2013; DERA 2013; Guinée et al. 2002; UBA und Öko-Institut 2013; Wittmer et al. 2011; World Bank Group 2010; YCELP 2012].

**Reserven:** genau quantifizierte, zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Rohstoffanteile.

**Ressourcen:** nachgewiesene oder mit hoher Sicherheit vermutete Rohstoffmengen, die auch solche Anteile beinhalten, die derzeit als unwirtschaftlich oder technologisch nicht gewinnbar gelten.

**Statische Reichweite:** Quotient aus Reserven oder Ressourcen und der jährlichen Fördermenge. Rein rechnerische Größe (zeitpunktabhängig und hypothetisch), die nichts über die tatsächliche Verfügbarkeit und den Erschöpfungszeitpunkt eines Rohstoffes aussagt:

$$\text{statische Reichweite [a]} = \frac{\text{Reserven [t] bzw. Ressourcen [t]}}{\text{Förderung [t/a]}}$$

**Umweltleistung der Förderländer:** Der **Environmental Performance Index (EPI)**, von der Universität Yale entwickelt, bewertet die Umwelt und den Zustand von Ökosystemen von Staaten. Hierdurch wird die Umweltleistung der Rohstoffproduzenten wie folgt kategorisiert:

Einteilung der Förderländer nach ihrer Umweltleistung		
stark	mittel	schwach
100 – 57	57 – 49	49 – 0

**Umweltwirkung der Rohstoffproduktion:** Die Umweltwirkungen der Rohstoffproduktion sind für zwei verschiedene Einheiten angegeben: (1) je Produktionseinheit (eine Tonne) und (2) je Jahresgesamtproduktion 2010.

Die Umweltwirkungen werden relativ zum Rohstoff mit den höchsten Umweltwirkungen nach folgender dreistufiger Skala eingeteilt:

Bewertung anhand der relativen Umweltwirkungen		
niedrig	mittel	hoch

<b>Energie</b>	<b>Material</b>				
<p><b>Kumulierter Energieaufwand (KEA):</b> gesamte energetische Ressourcen, die zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Rohstoffes notwendig sind. Dies beinhaltet auch indirekte Energieaufwendungen für die Bereitstellung der Infrastruktur.</p>	<p><b>Kumulierter Rohstoffaufwand:</b> gesamte Rohstoffaufwendungen entlang der Gewinnungsphase eines Rohstoffes. Beispielsweise wird bei Metallen das Erz als Ausgangsmaterial berücksichtigt, zudem werden alle mineralischen und energetischen Rohstoffe zur</p>				
<b>Wasser</b>	<b>UEBEL-Index</b>				
<p><b>Wasserbedarf H<sub>2</sub>O-Fußabdruck:</b> Menge an Wasser, die für die Förderung eines Rohstoffes notwendig ist.</p>	<p>Indikator des Umweltbundesamts, der die Umwelteinwirkungsbelastung der Rohstoffgewinnung bewertet.</p> <table border="1"> <tr> <td>Boden: Flächenumwandlung</td> <td>Gewässerqualität: Eutrophierung</td> </tr> <tr> <td>Klima: Treibhauspotenzial</td> <td>Luftqualität: Versauerung</td> </tr> </table>	Boden: Flächenumwandlung	Gewässerqualität: Eutrophierung	Klima: Treibhauspotenzial	Luftqualität: Versauerung
Boden: Flächenumwandlung	Gewässerqualität: Eutrophierung				
Klima: Treibhauspotenzial	Luftqualität: Versauerung				
<b>Humantoxizität</b>	<b>Ökotoxizität</b>				
Giftigkeit der Rohstoffgewinnung für Menschen	Giftigkeit des Bergbaus für Ökosysteme				

**Worldwide Governance Indicators (WGI):** das von der Weltbank entwickelte Indikatoren-Set gewichtet das Länderrisiko von Staaten anhand ihrer Regierungsführung und politischen Stabilität. Die Versorgung mit Rohstoffen aus Staaten mit schwacher Regierungsführung wird als kritisch eingestuft; für Rohstoffe aus Förderländern mit starker Regierungsführung wird das Versorgungsrisiko niedrig bewertet.

<b>Bewertungsskala nach WGI-Länderrisiko der Förderländer</b>		
niedriges Versorgungsrisiko	mäßiges Versorgungsrisiko	Versorgung kritisch
+2,5 bis +0,5	+0,5 bis -0,5	-0,5 bis -2,5

## Anlage 2: Primärgewinnung

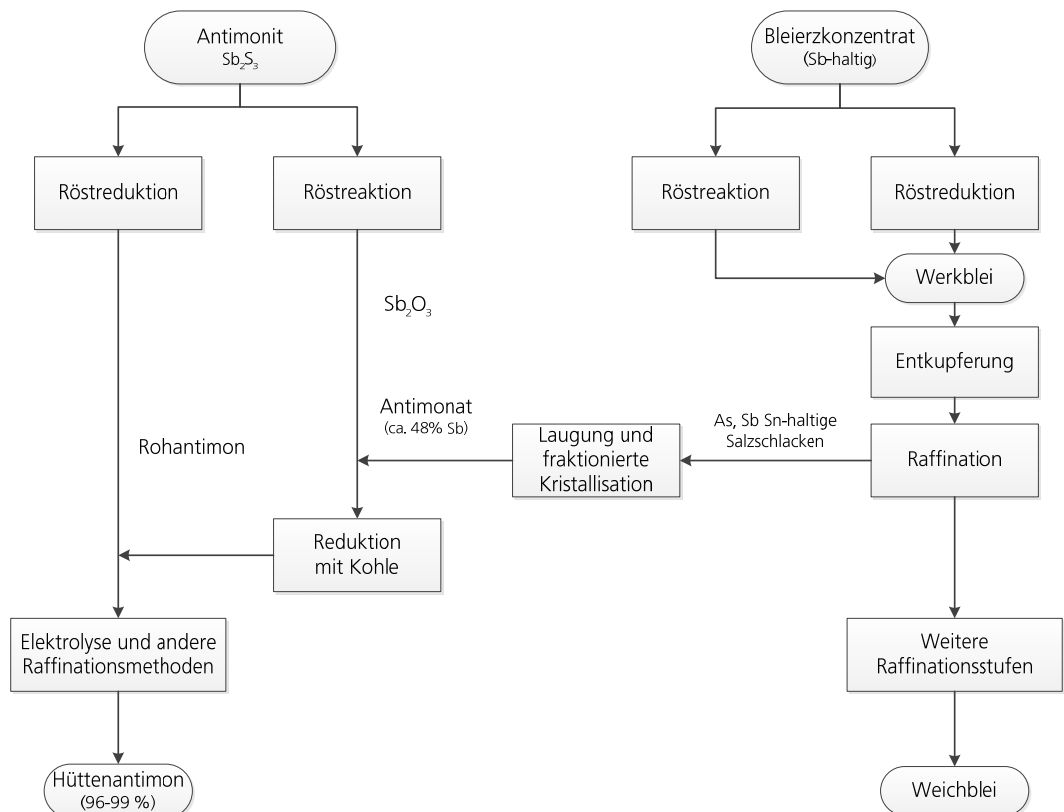
### Antimon

#### **Gewinnungsprozess**

Antimon (Sb, von lat. Stibium) kommt in der Natur meist sulfidisch gebunden und nur selten in elementarer Form vor [Carlin 2012]. Häufig ist Sb Bestandteil in Vorkommen von Nebenmetallen wie Cu, Ni, Co, Hg, Pb und Edelmetallen [Kammer 2006a]. Der wirtschaftlich bedeutendste Ausgangsstoff ist das Sulfid Stibnit ( $Sb_2S_3$ ), auch Antimonit genannt mit 71,7 Prozent Sb-Gehalt [Grund et al. 2000; Bertau et al. 2013].

Antimon wird sowohl im Tagebau als auch im Tiefbau gewonnen [DERA 2013]. Daneben gibt es vielfältige Arten der Antimon-Herstellung – abhängig von den Sb-Gehalten der Erzkonzentrate [Anderson 2012]: 60 Prozent der Sb-Roherze werden durch Flotation konzentriert, 33 Prozent durch Handverlesen und 7 Prozent mithilfe von Schwerkraftaufbereitung [Schwarz-Schampera 2014]. Abbildung 29 verdeutlicht schematisch die typischen Bereitstellungsketten von Antimon.

**Abbildung 29:**  
Antimongewinnung.  
Darstellung  
verändert nach  
[Kammer 2006a].



In der industriellen Herstellung kommen das Röstreduktions- bzw. Röstreaktionsverfahren und das Niederschlagsverfahren zum Einsatz [Bertau et al. 2013]. Das Röstreduktionsverfahren, das Konzentrate mit hohen Antimongehalten (45 bis 60 Prozent) einsetzt [DERA 2013], produziert durch Oxidation direkt metallisches Rohantimon geringerer Qualität [Kammer 2006a]:



Das Röstreaktionsverfahren wiederum setzt Antimonsulfide mit niedrigeren Antimongehalten (5 bis 25 Prozent) ein. Diese Konzentrate werden mit Sauerstoff geröstet, wodurch volatiles Antimontrioxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) entsteht, das aus dem Abgasstrom abgetrennt wird:



Im nächsten Schritt wird  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  mit Kohlenstoff (Kohle und Koks) zum Metall reduziert [Kammer 2006a; Bertau et al. 2013]. Als Flussmittel setzt man Alkalicarbonat oder -sulfat ein [Bertau et al. 2013]. Dieses Verfahren bedarf einer präzisen Kontrolle der Temperatur und Luftzufuhr. Im Falle von Sauerstoffüberschuss verdampft unumgesetztes  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  und es entsteht  $\text{Sb}_2\text{O}_4$ , das im Röstgut verbleibt. Sind die Temperaturen zu hoch, kommt es zu  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ -Verlusten in Form von Verdampfung [Kammer 2006a].

Alternativ kann Sb auch aus Schlacken gewonnen werden, die bei der Raffination von Bleierzkonzentraten entstehen [Kammer 2006b]. Die Konzentrate werden hierbei ebenfalls mittels Röstreaktion bzw. Röstreduktion zu Werkblei weiterverarbeitet. Dieses wird im Anschluss entkupfert und zu Sb-haltigen Salzsclacken weiterverarbeitet.

Diese Salzsclacken werden gelaugt und Antimonat ( $\text{Sb}_2\text{O}_4$ ) wird durch fraktionierte Kristallisation hergestellt. Hierdurch werden Verunreinigungen wie PbO abgetrennt [Kammer 2006b]. So kann durch anschließende Reduktion, Elektrolyse und andere Raffinationsmethoden hochreines Antimonmetall (96 bis 99 Prozent Sb-Gehalt) gewonnen werden [Kammer 2006b; DERA 2013].

Zudem kann Antimon mit 80-prozentiger Effizienz auch bei der Kupferschmelze gewonnen werden [OECD 2010a].

### **Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos**

Die globale Produktion von Antimon (Sb) ist mit 167 000 Tonnen groß. Die statische Reichweite der Reserven ist mit 13 Jahren äußerst gering und auch die statische Reichweite der Ressourcen liegt mit 24 Jahren nur unwesentlich höher. Antimon ist damit der Rohstoff mit der begrenztesten statischen Reichweite der zehn versorgungskritischsten Rohstoffe Baden-Württembergs.



Daneben konzentriert sich die weltweite Sb-Produktion geographisch äußerst stark auf China. Im Jahr 2010 besaß China 90 Prozent der weltweiten Produktionsanteile. Sb hat daher den zweitgrößten Herfindahl-Hirschman-Index (8 090) der untersuchten Rohstoffe. Zudem verfügte China auch über 37 Prozent der globalen Reserven [Carlin 2012]. Seit 2007 geht die Vormachtstellung der Volksrepublik aufgrund von Antimonförderung in anderen Ländern langsam zurück, jedoch spielt das Land auch bei der Weiterverarbeitung importierter Antimonkonzentrate eine große Rolle [DERA 2013]. Außerdem hielten im Jahr 2011 chinesische Unternehmen 74 Prozent der Weltbergwerksförderung inne und weitere verfügten über Firmenbeteiligungen ausländischer Unternehmen [DERA 2013].

Das Länderrisiko der Produktion wurde angesichts der Regierungsführung und der Umweltleistung des Hauptförderlandes China als sehr kritisch eingestuft. In den vergangenen 40 Jahren war der Antimonmarkt von starker Preisvolatilität geprägt [Schwarz-Schampera 2014]. Aufgrund von Umwelt- und Sicherheitsbedenken wurde die Produktion in der Volksrepublik durch strengere Auflagen, Exportquoten und Schließung illegaler Minen durch die dortige Regierung beschränkt, was sich in geringeren Förderungsmengen und Preisschwankungen ausdrückte [Carlin 2012; DERA 2013]. Baden-Württemberg ist daher nicht nur in höchstem Grade importabhängig, sondern auch einem großen Risiko für Preis- und Mengenschwankungen ausgesetzt [DERA 2013].

Antimon wird überwiegend als Hauptprodukt gewonnen, fällt jedoch auch als Koppelprodukt der Kupfer- und Bleigewinnung an.

Obwohl eine große Zahl von Publikationen existiert, die die umweltrelevanten Aspekte und die Eigenschaften von Antimon dokumentieren, herrschen weiterhin Wissenslücken über die kurz- und langfristigen Auswirkungen auf Böden, Sedimente und Gewässer [Filella et al. 2012]. Die Analyse der Umweltwirkungen zeigt, dass sich die Umweltwirkungen, die mit der Produktion einer Tonne Antimon assoziiert werden, im Mittelfeld bewegen. Zugleich weist die Antimon-Gesamtproduktion den drittgrößten UEBEL-Wert aller untersuchten Rohstoffe auf. Die Förderung von Antimon steht auch im Zusammenhang mit hohen Werten für Ökotoxizität und Humantoxizität. Dies gilt für die Produktion einer Rohstoffeinheit ebenso wie für die globale Weltjahresproduktion. Lediglich die Platinmetalle weisen hier höhere Umweltwirkungen auf. Aufgrund seiner Toxizität zählt Antimon zu den prioritären Gefahrenstoffen der US-Umweltbehörde [USEPA 1979] sowie der EU [EC 2006 2006]. Es gibt Studien, die auf eine kanzerogene Wirkung von Antimon(III)-oxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) hinweisen, diese bedürfen jedoch weiterer Untersuchungen [Gebel 1997; Kammer 2006a]. Daher wird die Substanz vom Internationalen Krebsforschungszentrum (IARC) als möglicherweise krebserregend eingestuft [IARC und WHO 1989].

Nahe der weltweit größten Antimonmine im chinesischen Hunan, wiesen Untersuchungen auf hohe Sb-Konzentrationen in bestimmten Ebenen der Nahrungskette aquatischer Ökosysteme hin [Fu et al. 2010]. Dies wird insofern als problematisch angesehen, da die örtlichen Landwirte das Wasser mit erhöhter Sb-Konzentration zur Bewässerung der Reisfelder benutzen [Fu et al. 2010]. Hierdurch bestehe die Gefahr, dass der Gefahrenstoff Eingang in die menschliche Nahrungskette findet und daher überdurchschnittlich in Bereichen des menschlichen Körpers nachweisbar ist, darunter Lunge, Lymphknoten und Haare [Wu et al. 2011].

## Beryllium

### **Gewinnungsprozess**

Nur zwei der rund 45 Berylliumminerale sind wirtschaftlich von Bedeutung. Bertrandit  $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ , das rund 0,27 Prozent Be enthält, wird überwiegend in den USA gewonnen und Beryll  $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$  mit einem Be-Gehalt von etwa 3,85 Prozent in anderen Ländern [Svilar et al. 2000; Cunningham 2006a; Lupton 2006].

### Erzaufschluss

Das Erzaufschlussverfahren unterscheidet sich für Bertrandit und Beryll (vgl. Abbildung 30). Das Bertrandit-Erz wird zunächst gebrochen, klassiert und nass gemahlen, um einen pumpbaren Schlacker zu erhalten [Lupton 2006]. Anschließend wird das im Schlacker enthaltene Beryllium durch Aufschluss mittels Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) bei 95 °C in Lösung gebracht [Lupton 2006]. Danach wird die Berylliumsulfatlösung von den unlöslichen Feststoffen getrennt, indem die Lösung im Gegenstromverfahren und unter Anwendung von Verdickungsmitteln dekantiert wird [Lupton 2006].

Aufgrund stabilerer Be-Verbindungen im Beryll-Erz ist ein Aufschluss mittels Laugung hier nicht möglich [Lupton 2006]. Zum Aufschluss der Erze werden diese im Lichtbogenofen (1625-1650 °C) aufgeschmolzen und die Schmelze anschließend mit Wasser zu einem Glas abgeschreckt [Lupton 2006]. Durch Wärmebehandlung des Glases im Drehofen (900-950 °C) wird die Reaktivität des Be-Anteils erhöht [Lupton 2006]. Dann wird das Glas zu einem Schlacker gemahlen und bei Temperaturen zwischen 250 und 300 °C mit konzentrierter Schwefelsäure behandelt [Lupton 2006]. Anschließend wird die Berylliumsulfat- und Aluminiumsulfathaltige Lösung ebenso wie im Aufschlussverfahren von Bertrandit durch Dekantieren von den Feststoffen getrennt [Lupton 2006].

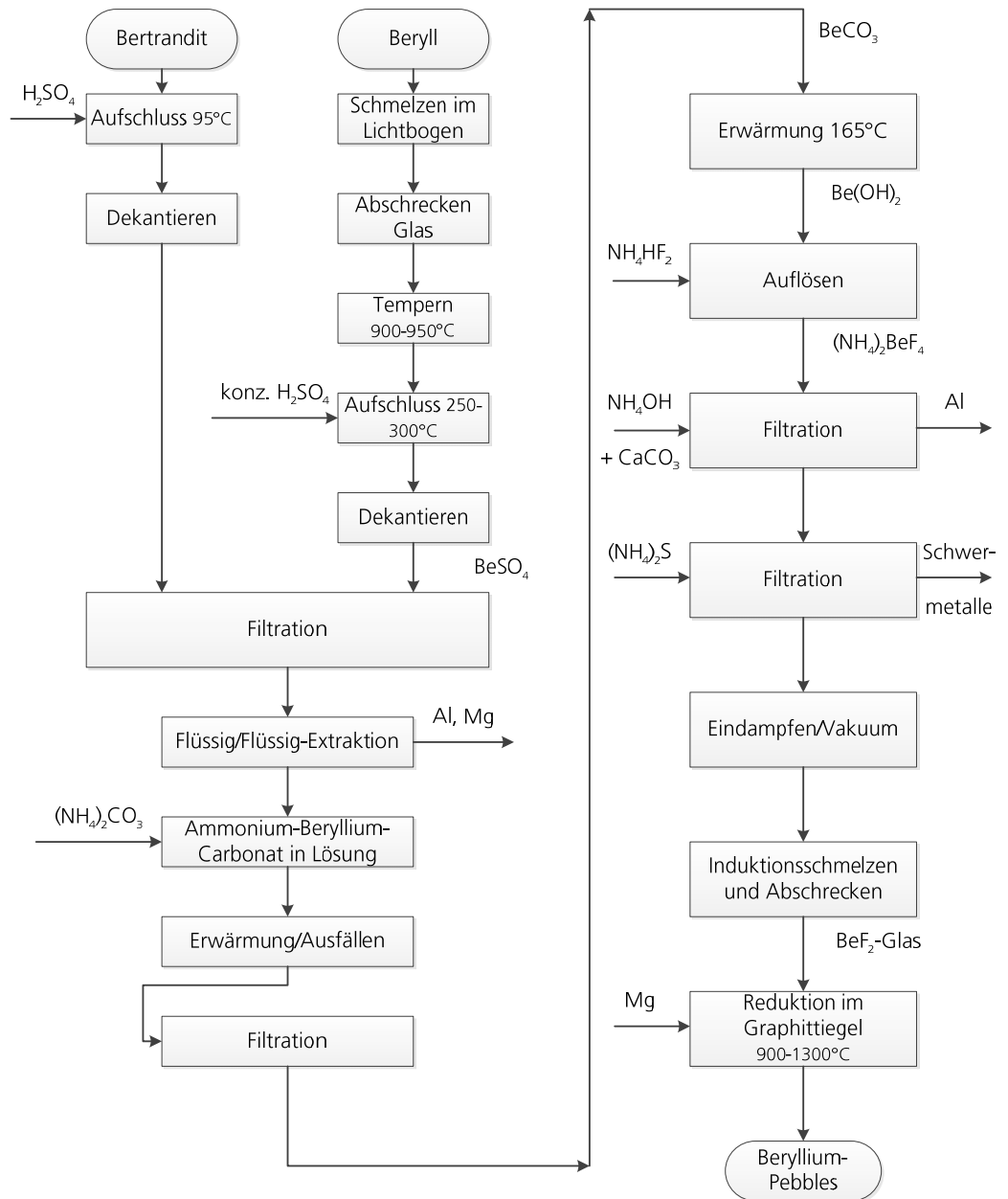
Sodann werden die Be-haltigen Sulfat-Lösungen durch Filtration gereinigt. Weitere Verunreinigungen, beispielsweise durch Al, Fe, Mg werden durch Flüssig/Flüssig-Extraktion herausgetrennt.

### Herstellung von Berylliummetall

Die häufigste Art der Gewinnung von Berylliummetall erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird Berylliumfluorid ( $\text{BeF}_2$ ) aus Berylliumhydroxid ( $\text{Be}(\text{OH})_2$ ) gewonnen, woraus im Anschluss durch Reduktion metallisches Be gewonnen wird.

Die Herstellung von  $\text{BeF}_2$  erfordert mehrere Prozessschritte, die Lupton 2006 und Bertau et al. 2013 wie folgt beschreiben. In einem ersten Schritt wird nach dem Schwenzfeier-Verfahren das Berylliumhydroxid,  $\text{Be}(\text{OH})_2$ , in Ammoniumbifluorid-Lösung ( $\text{NH}_4\text{HF}_2$ ) gelöst. Hierdurch entsteht eine leicht saure Ammoniumfluoroberyllat-Lösung,  $(\text{NH}_4)_2[\text{BeF}_4]$ , die zunächst mittels Ammoniak-Lösung neutralisiert wird.

**Abbildung 30:**  
Fließbild der Berylliumgewinnung aus Bertrandit- und Beryll-Erzen. Eigene Darstellung basierend auf [Lupton 2006].



Anschließend werden Aluminium- und Schwermetallverunreinigungen durch Zugabe von Fällungsreagenzien wie Calciumcarbonat,  $CaCO_3$ , ausgefällt und filtriert, wodurch das Ammoniumfluoroberyllat gereinigt wird. In einem nächsten Schritt wird das gereinigte Ammoniumfluoroberyllat durch Eindampfen unter Vakuum auskristallisiert und in einem Induktionsofen erhitzt, der mit Graphit

ausgekleidet ist. Hierbei wird eine BeF<sub>2</sub>-Schmelze gebildet, die über wasser-gekühlte Räder als glasartige Phase gewonnen wird [Lupton 2006; Bertau et al. 2013].

Die häufigste Art der Herstellung metallischen Berylliums ist die Reduktion von Berylliumfluorid (BeF<sub>2</sub>) mit Magnesium im Graphittiegel bei Temperaturen von bis zu 900-1.300 °C [Lupton 2006; Bertau et al. 2013].

Nach der Herstellung des BeF<sub>2</sub>, erfolgt dessen Reduktion mit metallischem Magnesium gemäß der Gleichung [Lupton 2006]:



Durch die Reaktionswärme schmilzt das Be auf und agglomeriert zu kleinen Kugeln (»Pebbles«). Anschließend wird die Schlacke mit dem Be-Metall abgegossen und erstarrt. Dann wird das Gemisch erneut gebrochen und unter Wasser gemahlen [Lupton 2006]. Hierdurch werden »Pebbles« mit einem 98-prozentigem Be-Gehalt gewonnen. Die restlichen Verunreinigungen werden durch Vakuumschmelzen in einem Induktionsofen gereinigt.

### ***Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos***

Aufgrund seiner ungewöhnlichen kernphysikalischen Eigenschaften ist Beryllium (Be) von militärischer Bedeutung [Lupton 2006]. Infolgedessen ist die Datenlage für Beryllium mangelhaft, was als großer Unsicherheitsfaktor zu bewerten ist. Die Produktionsmengen von Beryllium sind mit 205 Tonnen sehr niedrig. Für die Reserven liegen keine Daten vor. So kann lediglich die statische Reichweite der Ressourcen berechnet werden; diese ist mit 390 Jahre mit am größten.

Daneben ist die Primärgewinnung von einer äußerst hohen Konzentration geprägt; der Produktionsanteil der USA beträgt 88 Prozent, daneben produziert China 11 Prozent des weltweiten Antimons [USGS 2012a; USGS 2013]. Außerdem gibt es lediglich drei Länder, nämlich China, die USA und Japan, die Berylliumerze und -konzentrate in Be-Produkte weiterverarbeiten können [Cunningham 2006a]. Es wird davon ausgegangen, dass große Teile der Bergbauaktivitäten in Russland und Kasachstan stattfinden [Truemean und Sabey 2014]. Da hierüber jedoch keine genauen Daten veröffentlicht werden, ist der gesamte Markt durch einen hohen Grad an Unsicherheit charakterisiert [USGS 2012a]. Aufgrund der mangelhaften Datenlage hinsichtlich der globalen Be-Reserven können keine Aussagen über deren Konzentration getroffen werden. Zugleich wird der Be-Markt von vier Firmen dominiert: Brush Engineered Materials (USA), NGK Insulators (Japan), International Beryllium Corporation (Kanada) und Ulba Metallurgical Plant (Kasachstan) [OECD 2010b].

Anhand der verfügbaren Informationen, wurde ein niedriges Versorgungsrisiko aufgrund des WGI-Länderrisikos der Förderländer ermittelt, sowie ein mittleres Versorgungsrisiko anhand der EPI-Umweltleistung. Wie bereits oben angeführt, ist aufgrund der begrenzten Datenlage davon auszugehen, dass der tatsächliche Wert abweichend ist.

Für Beryllium liegen in den Datenbanken für Ökobilanzierung keine Daten vor. So konnten weder Umweltwirkungen, noch Humantoxizität oder Ökotoxizität analysiert werden. Dies ist insgesamt als negativ zu bewerten, da durch diese Unkenntnis eine fundierte Risikobewertung eingeschränkt ist.

Dennoch sind negative Wirkungen des Rohstoffes bekannt. Wird Be als feiner Staub eingeatmet, wirkt er sehr toxisch und kann die chronische Lungenkrankheit *Berylliose* auslösen [Lupton 2006]. Außerdem ist Be karzinogen [Lupton 2006]. Aufgrund des toxischen Charakters von Beryllium wurden bisher zahlreiche nationale und internationale Standards vereinbart, um die Grenzwerte für Berylliumgehalt in Luft, Wasser und anderen Medien zu regulieren [Jaskula 2012]. Durch die intensiven Kontrollmaßnahmen, die hierfür notwendig sind, sowie durch den hohen Energiebedarf, ergibt sich ein hoher Preis für den Rohstoff [Cunningham 2006a].

## Germanium

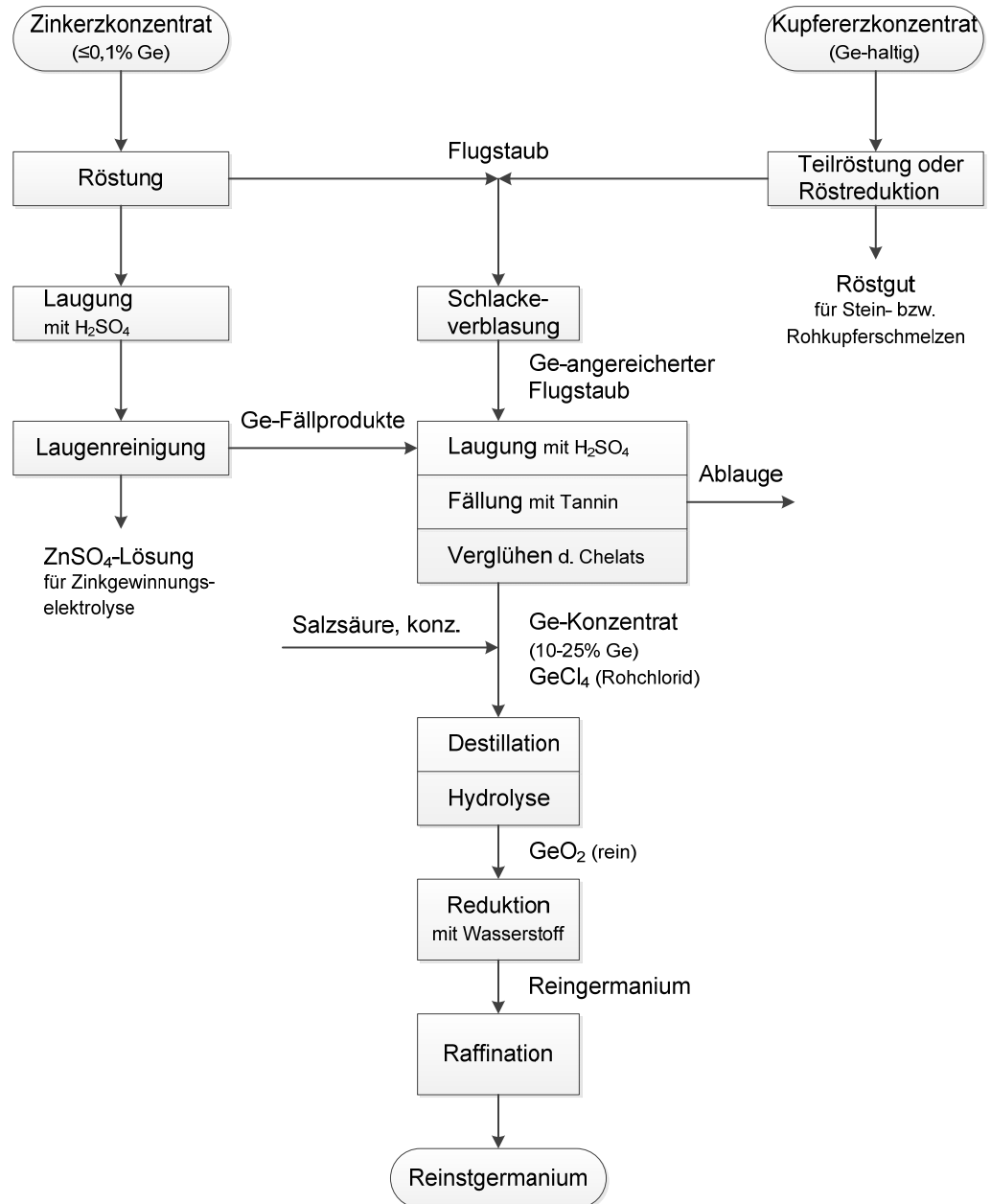
### ***Gewinnungsprozess***

Germanium findet sich in der Natur nur in niedrigen Konzentrationen und hauptsächlich in Sulfiden, sogenannten Thiogermanaten, gebunden [Bertau et al. 2013]. Die dominierende Rohstoffquelle bilden Zinkblenden mit Ge-Konzentrationen bis 0,1 Prozent [Scoyer et al. 2000; Kammer 2006b]. Abbildung 31 zeigt überblicksartig die Ge-Herstellung.

Für die Gewinnung und Raffination von Germanium spielt Germanium(IV)-chlorid ( $\text{GeCl}_4$ ) eine Schlüsselrolle [Kammer 2006b]. Im Folgenden wird dessen Herstellung beschrieben. Germanium wird aus Rauchgasen der Zinkerzaufbereitung und teilweise aus Kohlenasche produziert [Bertau et al. 2013; Guberman 2012]. Zunächst wird die Flugasche in Schwefelsäure aufgelöst [Bertau et al. 2013]. Dann wird Germaniumdioxid ( $\text{GeO}_2$ ) durch Zugabe von Natronlauge ausgefällt [Bertau et al. 2013; Guberman 2012]. Hierbei entsteht als Nebenprodukt ausgefälltes Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) [Bertau et al. 2013]. Durch Zugabe von Salzsäure lassen sich  $\text{GeO}_2$  und  $\text{ZnO}$  trennen, sodass die Oxide in die Chloride überführt werden [Bertau et al. 2013]. Das Germaniumdioxid ( $\text{GeO}_2$ ) wird chloriert und destilliert, um das erste verwendbare Produkt Germaniumtetrachlorid ( $\text{GeCl}_4$ ) zu bekommen [Guberman 2012; Bertau et al. 2013].

Anschließend wird das Germaniumkonzentrat durch mehrfache Destillation angereichert und veredelt [Bertau et al. 2013]. Hierdurch erhält man leicht flüchtiges  $\text{GeCl}_4$  [Bertau et al. 2013]. Durch Hydrolyse von  $\text{GeCl}_4$  und Trocknung kann diese zum weißen Pulver Germaniumdioxid umgewandelt werden [Guberman 2012]. Durch Reduktion mit Wasserstoff reagiert  $\text{GeO}_2$  zu metallischem Germanium in Pulverform [Guberman 2012]. Dieses wird durch kontinuierliches Schmelzen in Metall umgewandelt [Guberman 2012].

**Abbildung 31:**  
Überblick über die Germaniumherstellung.  
Leicht verändert nach [Kammer 2006b].



### **Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos**

Der globale Markt von Germanium (Ge) ist von großen Unsicherheiten geprägt, die auf die lückenhafte Datenlage zurückzuführen ist. Dies beeinträchtigt eine verlässliche Bewertung des Rohstoffes in den einzelnen Untersuchungskategorien. Hierauf wird an manchen Stellen erneut hingewiesen, jedoch sollten alle



präsentierten Ergebnisse unter diesem Vorzeichen betrachtet werden. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die große Mehrheit der Güter (88 Prozent im Jahr 2009) für Regierungs- und Sicherheitsbelange produziert werden und nur 12 Prozent für den kommerziellen Gebrauch [Guberman 2012]. Dies spricht für eine sicherheitspolitische Relevanz des Rohstoffes.

Die jährliche Produktionsmenge von Germanium ist mit 118 Tonnen die geringste aller zehn untersuchten Rohstoffe. Ausgehend von den Reserven-Daten der USA konnte ermittelt werden, dass die statische Reichweite der Reserven mindestens vier Jahre beträgt, jedoch in Wahrheit deutlich darüber liegen müsste, sofern auch Vorkommen anderer Förderländer berücksichtigt würden. Die statische Reichweite der Ressourcen ist mit 212 Jahren groß.

Der größte Germaniumproduzent ist China. Das Land hält 68 Prozent der weltweiten Produktionsanteile, weshalb der Markt von einer hohen Produktionskonzentration geprägt ist. Zu Beginn des Jahres 2011 verkündete China die Absicht, künftig Ge-Vorräte zu bilden, wodurch sich die Gefahr begrenzter Liefermengen erhöhte und folglich auch das Risiko eines Preisanstiegs [Guberman 2012]. Der Ge-Preis bewegt sich auf einem hohen Niveau. Die globalen Ge-Reserven sind hoch konzentriert, China verfügt über 71 Prozent der weltweiten Vorkommen [Melcher und Wilken 2013].

Basierend auf der politischen Stabilität (WGI) der Förderländer, wurde ein mäßiges Versorgungsrisiko für die Ge-Produktion ermittelt. Außerdem ist die EPI-Umweltleistung der Förderländer als am schwächsten einzustufen, was das Versorgungsrisiko stark erhöht.

Germanium ist ein typisches Koppelprodukt, da es keine wirtschaftlich abbauwürdige Lagerstätten für Ge-Minerale gibt [Kammer 2006b]. Infolgedessen gibt es weltweit nur eine stillgelegte Kupfermine, in der Ge als Primärprodukt gewonnen wird [Scoyer et al. 2000]. Germanium fällt als Nebenprodukt bei der Zink- und Kupferherstellung an und seine Produktion hängt daher stark von deren Förderung ab [Guberman 2012]. Daher ergibt sich ein hoher Preis für Germanium und die sehr eingeschränkte Anwendung des Elements [Kammer 2009].

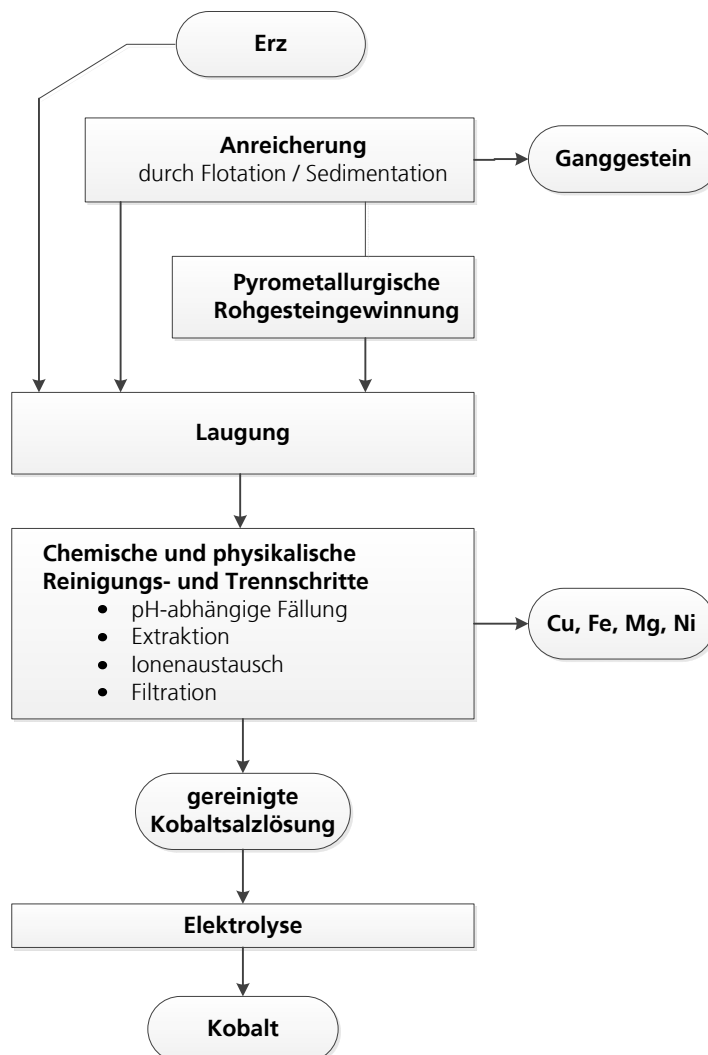
Für Germanium liegen keine Lebenszyklusdaten vor, aus denen Hinweise auf die Umweltwirkungen sowie Ökotoxizität und Humantoxizität abgeleitet werden können. Dies ist grundsätzlich als Defizit anzusehen, da keine verlässlichen Aussagen über die Primärgewinnung getroffen werden können. Nichtsdestotrotz sind keine Anhaltspunkte bekannt, die für eine schädliche Wirkung von Germanium auf den Menschen oder die Umwelt sprechen [Kammer 2006b]. Die meisten ökologischen Auswirkungen, die mit der Ge-Produktion assoziiert werden, beziehen sich auf Emissionen der Zinkförderung, insbesondere SO<sub>2</sub>-Emissionen und Umweltbelastungen infolge von Cadmium-Emissionen [Scoyer et al. 2000].

## Kobalt

### Gewinnungsprozess

Es sind 30 kobalthaltige Hauptminerale und 70 weitere Minerale mit Kobalt als einem der Hauptbestandteile bekannt; die wichtigsten sind Sulfide, Arsenide und Oxide [Hawkins 2006; Bertau et al. 2013]. Aufgrund dieser Vergesellschaftung von Kobalt in Erzen gibt es nicht ein typisches Gewinnungsverfahren, sondern es existieren vielmehr eine Vielzahl unterschiedlicher hersteller- und einatzstoff-abhängiger Verfahren zur Gewinnung [Bertau et al. 2013]. Die Möglichkeiten der Primärgewinnung sollen daher hier lediglich grob skizziert werden. Abbildung 32 zeigt ein vereinfachtes Fließschema zur Gewinnung von Kobalt [Bertau et al. 2013].

**Abbildung 32:**  
Herstellung von Kobalt. Leicht verändert nach [Bertau et al. 2013].



In einem ersten Schritt erfolgt üblicherweise eine Flotation und/oder Sedimentation der Co-, Cu-, Ni-haltigen Erze vom Ganggestein [Bertau et al. 2013]. Hierdurch erfolgt die Anreicherung der jeweiligen Minerale. Beim Einsatz kobaltreicher Erze liegt die Konzentration bei rund 15 Prozent, wohingegen die durchschnittliche Konzentration lediglich unter eins bis zu wenigen Prozent beträgt. Angesichts der geringen Anreicherung, verzichten einige Primärproduzenten bereits auf die physikalische Konzentration und beginnen direkt mit einer Laugung der Erze [Bertau et al. 2013].

Anschließend gibt es verschiedene Methoden der Weiterbehandlung: pyrometallurgische, hydrometallurgische und vapormetallurgische Prozessschritte [Bertau et al. 2013].

Bei pyrometallurgischen Prozessschritten werden metallhaltige Phasen von Verunreinigungen getrennt, um Metalle und ihre Verbindungen anzureichern [Bertau et al. 2013]. Hierdurch entstehen Zwischenprodukte (Legierung oder Schlacke, Co-Rohstein), woraus Kobalt hergestellt werden kann.

Das Kobalterz gelangt hierfür in einen Schmelzofen und es wird Luft zugesetzt [Bertau et al. 2013]. Hierdurch reichert sich Kobalt in einer sulfidischen Schlackephase (Co-Rohstein) an, die anschließend abgestochen werden kann [Bertau et al. 2013]. Eine alternative Methode bildet die Reduktion. Durch zugesetzten Kalk und Kohlenstoff erhält man eine Metalllegierung (Fe-(Cu,Ni)-Co), die von Verunreinigungen abgetrennt werden kann [Bertau et al. 2013].

Vapormetallurgische Prozessschritte ermöglichen die Gewinnung von hochreinem Kobalt [Bertau et al. 2013]. Nichtsdestotrotz finden diese Verfahren derzeit keine breite Anwendung [Bertau et al. 2013].

Daher wird an dieser Stelle lediglich das hydrometallurgische Verfahren näher beschrieben. Bei diesem Verfahren können sowohl Erze als auch Erzkonzentrate eingesetzt werden, wobei sich die spezifischen Prozesseigenschaften der Laugung nach der Art des Erzes richten [Bertau et al. 2013]. Hieraus werden solche Kobaltverbindungen gewonnen, die gut wasserlöslich sind, beispielsweise Kobaltsulfat oder Kobaltchlorid [Bertau et al. 2013].

Da durch die Lösung von Kobalt auch andere Metalle (insbesondere Cu, Fe, Mn, Ni) löslich gemacht werden, sind anschließend weitere Reinigungs- und Trennschritte notwendig, z. B. pH-abhängige Fällung, Extraktion und Ionenaustausch [Bertau et al. 2013]. Aus der hierdurch erhaltenen Metallsalzlösung wird abschließend mittels Elektrolyse metallisches Kobalt gewonnen [Bertau et al. 2013].

### ***Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos***

Die globale Kobalt-Produktion ist mit 89 450 Tonnen im Jahr 2010 verhältnismäßig groß. Die Reserven reichen statisch gerechnet 74 und die Ressourcen 168 Jahre.

Die DR Kongo ist weltweit führend im primären Abbau von Kobalt (Co) und besitzt rund die Hälfte der weltweiten Produktionsanteile (53 Prozent) und der weltweiten Reserven (51 Prozent) [Shedd 2012a; Boland und Kropshot 2011]. Sowohl die Produktion als auch die Vorkommen sind durch eine hohe Konzentration geprägt. Der Anteil Afrikas am globalen Kobaltbergbau betrug im Jahr 2010 70 Prozent [Yager et al. 2011].

Das typische Exportland für Kongos Kobalterzkonzentrate und Rohkobaltverbindungen ist China, das der derzeit größte Produzent von raffiniertem Co ist [Bertau et al. 2013]. Das Versorgungsrisiko hinsichtlich der politischen Instabilität und Regierungsführung der Kobalt-Förderländer ist als am kritischsten von allen zehn Rohstoffen eingestuft. Sogar der Rohstoff Tantal, dessen Handel als Konfliktmineral in der Vergangenheit stark beeinträchtigt war, zeigt hier ein niedrigeres Versorgungsrisiko. Auch die Umweltleistung nach EPI der Förderländer wird als schwach eingestuft, was die Versorgungssicherheit beeinträchtigt.

Kobalt kommt in der Natur selten in konzentrierter Form vor und fällt insbesondere beim Abbau anderer mineralischer Rohstoffe als Nebenprodukt an [Shedd 2012a; Bertau et al. 2013]. Die Mehrheit des weltweit produzierten Kobalts, etwa 50 Prozent, entsteht bei der Gewinnung von Nickel (Ni), ein Anteil von rund 35 Prozent zusammen mit Kupfer (Cu) [Bertau et al. 2013; Shedd 2012a]. Nur rund 15 Prozent stammen aus primärer Kobaltproduktion in Marokko [Hawkins 2006; Bertau et al. 2013]. Dies erhöht die Kritikalität der Rohstoffversorgung von Kobalt.

Wenngleich Kobalt nicht als Konfliktmineral gilt, stammt über die Hälfte der Produktion aus der DR Kongo. Da es sich hierbei um eine Region handelt, die für die Problematik der Konfliktminerale bekannt ist, sollte auf transparente Wertschöpfungsketten und Einhaltung von Mindeststandards bei der Gewinnung Wert gelegt werden.

Im Hinblick auf die Co-Primärgewinnung sind insbesondere bei arsenhaltigen Kobalterzen besondere Vorkehrungen für das Rösten vonnöten, um die Bildung von giftigem Arsenoxid zu vermeiden [Bertau et al. 2013]. Dazu gehört eine Laugung unter hohem Druck und solchen Verfahren, dass solche Verbindungen, die Arsen enthalten im festen Aggregatzustand zurückbleiben [Bertau et al. 2013].

Die Umweltwirkungen des Kobaltbergbaus und der damit in Zusammenhang stehenden Öko- und Humantoxizität liegen sowohl für die Betrachtung je Tonne als auch für die Weltjahresproduktion im mittleren Bereich. Neben konventionellen Methoden zur Kobaltförderung, gibt es auch zwei Verfahren, die künftig an Bedeutung gewinnen können: der Tiefseebergbau und die Biolaugung, auch *biomining* oder *bioleaching* genannt.

Im Hinblick auf Tiefseebergbau sind für Kobalt vor allem kobaltreiche Mangankrusten in 800 bis 2 000 Metern Meerestiefe von wirtschaftlichem Interesse, die meisten davon (66 Prozent) im Pazifik gelegen [Wiedicke-Hombach und Reichert 2013].

Tiefseebergbau ist jedoch nicht unumstritten [Mestre et al. 2014]. Derzeit ist es nicht möglich alle in der Tiefe abgebauten Minerale zu fördern. Insbesondere die Notwendigkeit einer Anreicherung von Erzen birgt, wie vermutet, technologische oder ökologische Probleme [ISA 2011; ISA 2013], wodurch erhöhte Schwermetallkonzentrationen als Folge auftreten könnten [EC-JRC 2010], die toxisch auf marine Flora und Fauna wirken [Holmstrup et al. 2010].

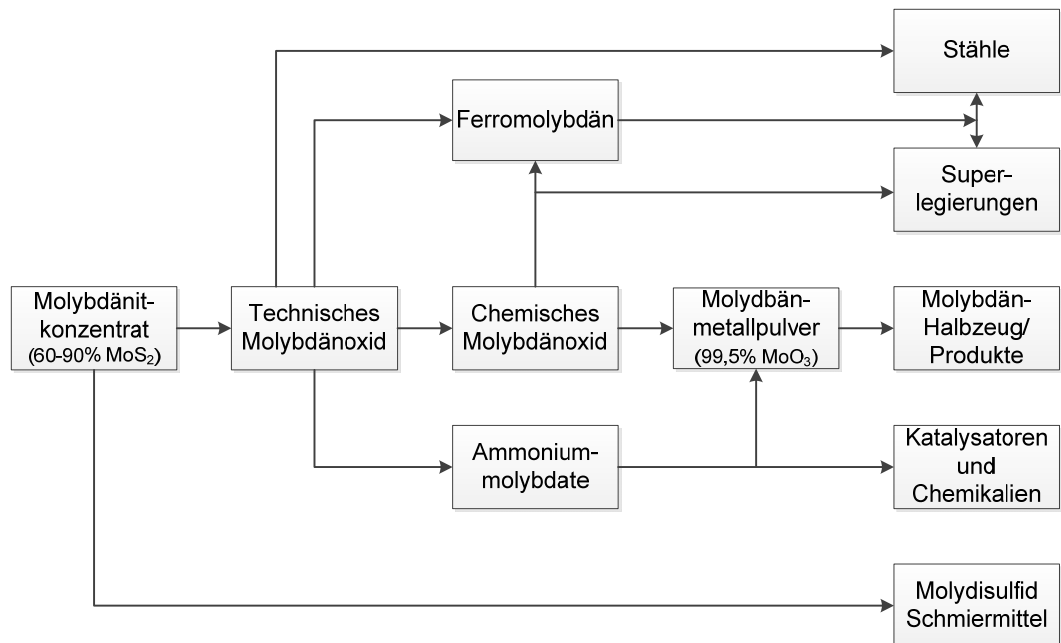
## Molybdän

### Gewinnungsprozess

Molybdän kommt in der Natur überwiegend als sulfidisches Erz in Form von Molybdänit ( $\text{MoS}_2$ ) vor, auch bekannt unter der veralteten Bezeichnung Molybdän-  
glanz [Bertau et al. 2013].

Abbildung 33 spiegelt schematisch die Herstellung von Molybdän wider.

**Abbildung 33:**  
Schema der  
Herstellung von  
Molybdän.  
Verändert nach  
[Bertau et al. 2013].



### Aufschluss der Erze

Molybdän wird aus Molybdänit hergestellt, das zunächst mit einem physikalischen Verfahren zu einem Molybdänit-Konzentrat (60 bis 90 Prozent  $\text{MoS}_2$ -Gehalt) angereichert wird [Gutknecht 2006]. Durch Brechen, Mahlen, wiederholter Flotation und erneutem Vermahlen wird Kupfer, Blei und Eisen abgetrennt [Bertau et al. 2013]. Danach werden Kupfer-, Blei-, Bismut- und Calciumbestandteile im Konzentrat mittels Säurebehandlung ausgewaschen und gereinigt [Bertau et al. 2013].

### Röstung und Reinigung

Nach dem Aufschluss der Erze erfolgt die Röstung. Hier wird in Hordenöfen bei Temperaturen zwischen 400 und 700 °C technisches Molybdän(VI)-oxid mit MoO<sub>3</sub>-Gehalten von 85 bis 90 Prozent gewonnen [Gutknecht 2006; Bertau et al. 2013]:



Molybdän(VI)-oxid wird entweder direkt zu Ferromolybdän (FeMo) weiterverarbeitet oder in das wichtigste Zwischenprodukt der Mo-Herstellung umgewandelt, nämlich Molybdäntrioxid (MoO<sub>3</sub>) [Bertau et al. 2013]. Dieses erhält man durch Sublimation bei Temperaturen zwischen 1.100 und 1.150 °C, wodurch MoO<sub>3</sub> mit einem 99,5 prozentigen Reinheitsgrad produziert wird [Bertau et al. 2013; Gutknecht 2006]. Um hieraus wiederum Molybdän in metallischer Form zu erhalten, wird MoO<sub>3</sub> (bzw. Ammoniumhexa- oder dimolybdat) im Wasserstoffstrom reduziert [Bertau et al. 2013].

### Herstellung von Molybdänmetall

Verwendet man Molybdän in Stählen als Fe-Mo-Legierung, wird meist Ferromolybdän anstelle von elementarem Molybdän eingesetzt [Bertau et al. 2013]. Ferromolybdän enthält zwischen 55 und 77 Prozent Mo und bietet verfahrenstechnische und ökonomische Vorteile in der Herstellung gegenüber Mo in Reinform [Bertau et al. 2013]. Ferromolybdän wird durch aluothermische bzw. silicothermische Reduktion von technischem MoO<sub>3</sub> (90 prozentige Reinheit) und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nach folgendem Prinzip gewonnen.



### ***Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos***

Die jährliche Molybdän-Produktionsmenge lag mit 263 865 Tonnen auf einem sehr hohen Niveau. Die statische Reichweite der Reserven ist mit 40 Jahren als gering einzuschätzen, und auch die statische Reichweite der Ressourcen liegt mit 80 Jahren nur unwesentlich höher. Molybdän (Mo) ist damit hinter Antimon der Rohstoff mit der geringsten statischen Reichweite.

Die globale Mo-Produktion und Reserven sind durch eine erhöhte Konzentration charakterisiert. China vereint 39 Prozent der Produktions- und 38 Prozent der Reserveanteile auf sich und die USA 25 Prozent der Produktion und 31 Prozent der Vorkommen. Hinsichtlich der Regierungsführung und Umweltschutzleistung der Förderländer bewegt sich Molybdän im Mittelfeld und ist insgesamt von einem mittleren Versorgungsrisiko geprägt.

Molybdän wird überwiegend (54 Prozent) als Nebenprodukt bei der Kupfer- oder Wolframingewinnung erzeugt; in 46 Prozent der Primärproduktion stellt Molybdän das Hauptprodukt dar [Polyak 2012].

Die Umweltwirkungen, die mit der Förderung einer Tonne Molybdän assoziiert werden, sind relativ groß. Die Jahresgesamtproduktion zeigt sogar Spitzenwerte, da die globale Mo-Gewinnung den zweitgrößten UEBEL-Wert aller Rohstoffe aufweist. Die weltweite Molybdän-Jahresproduktion zeigt die größten Werte hinsichtlich Ökotoxizität und Humantoxizität. Werden die Aspekte je Rohstoffeinheit betrachtet, zeigen lediglich die Platinmetalle höhere Ökotoxizitätswerte. Die Wirkungen einer Tonne Molybdän hinsichtlich Humantoxizität befinden sich hingegen im mittleren Bereich.



## Platingruppenmetalle

### ***Gewinnungsprozess***

Die Gruppe der Platinmetalle umfasst die Elemente Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd), Osmium (Os), Iridium (Ir) und Platin (Pt). Die Platinmetalle kommen in der Natur miteinander vergesellschaftet vor [Hagelüken und Kleinwächter 2006].

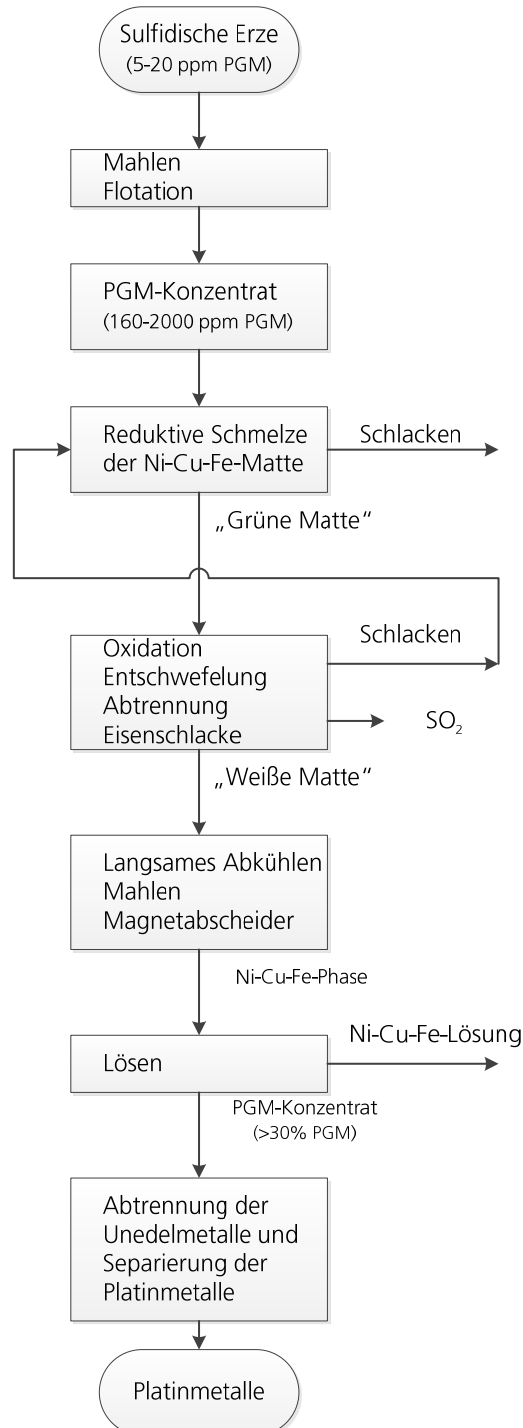
Im Folgenden soll hier auf die prinzipielle Gewinnung der Platinmetalle eingegangen werden, da diese i.d.R. in Koppelproduktion gewonnen werden. Eine separate Betrachtung aller Elemente in detaillierter Ausführlichkeit findet nicht statt, da lediglich der prinzipielle Ablauf des Verfahrens gezeigt werden soll.

Platin findet sich in der Natur sowohl in gediegener als auch in mineralischer Form [Bertau et al. 2013]. Die sogenannten Platinseifen, in denen Platin elementar vorliegt, werden jedoch heute nur noch selten abgebaut [Bertau et al. 2013]. Meist wird Platin entweder aus sulfidischen Erzen (siehe Abbildung 34) oder Nickelerzen in Koppelproduktion gewonnen [Hagelüken und Kleinwächter 2006; Bertau et al. 2013].

Das moderne Gewinnungsverfahren von PGM nutzt als Ausgangsstoff sulfidische Erze (PGM-Konzentration von 5-20 ppm) [Renner et al. 2000]. Zunächst erfolgt eine physikalische Anreicherung durch Mahlen und anschließender Flotation, um ein PGM-Konzentrat (160-2000 ppm PGM) zu erhalten [Renner et al. 2000; Bertau et al. 2013]. Das Flotationskonzentrat wird anschließend zu einer sogenannten »grünen Matte« im Elektro-Niederschachtofen reduktiv eingeschmolzen und durch pyrometallurgische Prozesse weiter angereichert [Hagelüken und Kleinwächter 2006; Bertau et al. 2013]. Durch das Einblasen von Sauerstoff in den Konverter oxidiert Eisensulfid zu Eisenoxid (Entschwefelung) und kann mit der Eisenschlacke abgetrennt werden [Hagelüken und Kleinwächter 2006; Bertau et al. 2013].

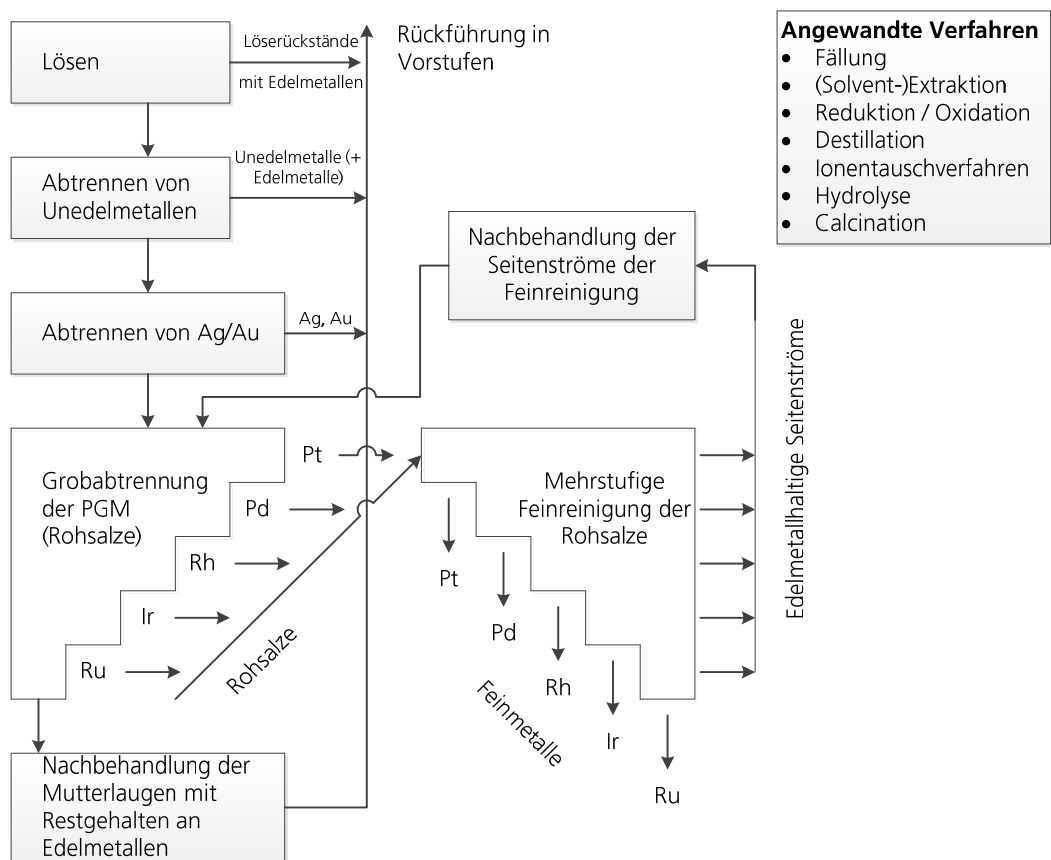
Das Zwischenprodukt hierbei wird als »weiße Matte« bezeichnet und verfügt über eine PGM-Konzentration von > 0,1 Prozent [Bertau et al. 2013; Renner et al. 2000]. Infolge langsamen Abkühlens werden die Edelmetalle in einer metallischen Ni-Cu-Fe-Phase weiter angereichert [Bertau et al. 2013]. Nach einer anschließenden Schwefelsäure/Sauerstoff-Laugung, erhält man Edelmetallkonzentrat mit PGM-Gehalt von 50 bis 90 Prozent [Renner et al. 2000].

**Abbildung 34:**  
Gewinnung von Platinmetallen aus sulfidischen Erzen.  
Basierend auf [Renner et al. 2000].



Bei der Verarbeitung der sulfidischen Nickelerze als alternatives Ausgangsmaterial zu sulfidischen Erzen, werden die Edelmetalle erst aus dem Rückstand nach der Laugung des Nickels konzentriert [Bertau et al. 2013]. Im weiteren Prozess werden schließlich die gewonnenen PGM-Konzentrate auf unterschiedlichen Wegen weiterverarbeitet, um die Edelmetalle in reiner Form zu erhalten (siehe Abbildung 35). Eine Übersicht über die einzelnen Verfahren und Möglichkeiten zur Separierung bietet Renner et al. 2000.

**Abbildung 35:**  
Prinzipieller  
Verfahrensablauf bei  
der Verarbeitung  
von PGM-  
Konzentraten. Aus  
[Bertau et al. 2013],  
leicht verändert.



### Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos

Die jährlichen Produktionsmengen von Platin (193 Tonnen) und Palladium (202 Tonnen) liegen auf einem sehr geringen Niveau. Lediglich Germanium zeigt noch geringere Produktionsmengen. Die statischen Reichweiten für Reserven (180 Jahre) und Ressourcen (253 Jahre) der Platingruppenmetalle (PGM) sind sehr groß. Jedoch konnten sie lediglich für die Platingruppenmetalle als Rohstoffgruppe ermittelt werden. Dies birgt die Gefahr, dass die statische Reichweite einzelner Elemente in Wahrheit wesentlich geringer ist.

Für die Gruppe der Platinmetalle herrscht eine äußerst hohe Angebotskonzentration vor. Rund 90 Prozent der weltweiten Produktion beschränkt sich lediglich auf die zwei Länder Südafrika und Russland [Hagelüken und Kleinwächter 2006; USGS 2012a]. Vor allem die Platin-Produktion zeichnet sich durch eine äußerst starke Konzentration aus, da Südafrika (77 Prozent) und Russland (13 Prozent) zusammen 90 Prozent auf sich vereinen. Palladium ist ebenfalls durch eine erhöhte Konzentration gekennzeichnet, weil insgesamt 83 Prozent der Produktion in Russland (42 Prozent) und Südafrika (41 Prozent) stattfindet. Bei den Reserven ist eine klare Vormachtstellung Südafrikas zu verzeichnen, das über 89 Prozent der weltweiten Vorkommen verfügt. Die äußerst hohe Konzentration der Reserven spiegelt sich auch im hohen Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven wider, bei denen die PGM den höchsten Wert (7 906) aufweisen.

Die primäre Bereitstellungskette der Platinmetalle ist mit einem hohen Zeit- und Kapitalbedarf verbunden. Dies könnte erklären warum sich die weltweite Förderung auf nur wenige große Minengesellschaften konzentriert: Anglo Platinum, Norilsk Nickel, Impala, Lonmin und Inco [Hagelüken und Kleinwächter 2006].

In Bezug auf die politische Stabilität der Förderländer ist von einem mittleren Versorgungsrisiko auszugehen. Die Umweltsituation der Produktionsländer hingegen ist für Palladium schwach und für Platin mit am schwächsten, was als Zeichen für eine kritische Verfügbarkeit gedeutet werden kann.

Die Platingruppenmetalle werden in Koppelproduktion gewonnen. Zum einen fallen Platin und Palladium bei der Förderung von Chrom-, Kupfer- und Nickelerzen an. Zum anderen werden Rhodium, Iridium, Ruthenium und Osmium als Koppelprodukte von Platin und Palladium gewonnen [Hagelüken und Kleinwächter 2006]. Steigt die Nachfrage nach einem der Rohstoffe, die in Koppelproduktion gewonnen werden, müssen automatisch Absatzmärkte für die Hauptprodukte geschaffen werden, um eine ökonomische Primärgewinnung zu gewährleisten. Dies kann die Versorgungssicherheit der Rohstoffgruppe negativ beeinflussen.

Die Umweltwirkungen im Hinblick auf Material-, Energie- und Wasserverbrauch der weltweiten Platinmetallgewinnung sind immens. Sie liegen z. T. in der hunderttausendfachen Größenordnung im Vergleich mit den anderen Rohstoffen. Ein Grund hierfür sind die geringen Erzgehalte der global am industriell bedeutendsten Reserven, die in Südafrika liegen. Folglich sind die Förderung, Aufbereitung und Verhüttung der PGM-Erze mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden [Hagelüken und Kleinwächter 2006]. Bei der Platinmetall-Förderung entstehen große Mengen an Abraum und SO<sub>2</sub>-Emissionen werden frei, sofern sulfidische Erze das Ausgangsmaterial sind [Erren und Wittmer 2011]. Die

Platinmetalle Rhodium, Platin und Palladium haben die größten Umweltwirkungen je Rohstoffeinheit bezüglich Ökotoxizität und Humantoxizität.

Wird als Vergleichsgrundlage zur Bewertung der Umweltwirkungen die jährliche Produktionstonnage gewählt, sind die Umweltwirkungen vergleichsweise gering, was jedoch durch das geringe Produktionsvolumen zu erklären ist.

## Seltenerdmetalle

### **Gewinnungsprozess**

Es gehören insgesamt 17 Elemente zu den Metallen der seltenen Erden. Aufgrund der hohen Anzahl gibt es nicht eine typische Art der Primärgewinnung, weshalb hier stellvertretend lediglich zwei Verfahren aufgezeigt werden.

Die wichtigsten Erze, aus denen Seltenerdmetalle gewonnen werden können, sind Monazit, Bastnäsit und Xenotim (veraltet: Ytterspat). Um hierin den SEM-Anteil zu erhöhen, erfolgt im ersten Schritt eine Anreicherung mithilfe physikalischer Verfahren [McGill 2000].

Zunächst wird kurz das Verfahren zur Herstellung von Scandium dargestellt [Bertau et al. 2013]. Hierbei wird ein Gemisch aus Scandium(III)-Chlorid ( $\text{ScCl}_3$ ), Kaliumchlorid (KCl) und Lithiumchlorid (LiCl) einer Schmelzflusselektrolyse mit Zinkkathode unterzogen [Bertau et al. 2013]. Durch diesen Prozess werden Zn/Sc-Legierungen gewonnen, die anschließend durch Destillation veredelt werden, indem Zn unterhalb des Siedepunktes von Scandium ( $1\,539\text{ °C}$ ) abdestilliert wird [Bertau et al. 2013]. Zur Erhöhung des Reinheitsgrades können weitere Destillationsverfahren im Hochvakuum eingesetzt werden [Bertau et al. 2013].

Ein anderes Verfahren wird zur Herstellung von Yttrium, Lanthan und den Lanthanoiden verwendet. Für den Aufschluss der Erze können sowohl Säuren als auch Basen eingesetzt werden. Silikate werden mit flüssiger Salzsäure ( $\text{HCl}_{\text{aq}}$ ) und Phosphaten mit konzentrierter Schwefelsäure sauer aufgeschlossen [Bertau et al. 2013]. Hierbei fallen lösliche Chloride oder Sulfate an [Bertau et al. 2013].

Die Trennung der Gemische in die Metalle der seltenen Erden als Einzelbestandteile ist technisch sehr aufwendig. Dies hängt zum einen an der chemischen Ähnlichkeit der Elemente und der geringen Selektivität der vorhandenen Methoden zum Aufschluss [McGill 2000]. Eine weitere Herausforderung stellen geringe Konzentrationen und deren Verteilung in den Ausgangserzen dar [McGill 2000]. Verschiedene Verfahren sind zur Auftrennung der Oxidgemische geeignet.

Historisch wurden die Lanthanoide durch fraktionierte Kristallisation aufgetrennt. Hierbei wurde die unterschiedliche Löslichkeit von Bestandteilen in Abhängigkeit zur Temperatur ausgenutzt [Bertau et al. 2013]. Heutzutage kommen vor allem »Lösungsextraktion, fraktionierte Fällung mit Basen, fraktionierte Zersetzung als Lanthanoidennitrate (und) die Trennung mittels Kationenaustauscherharzen« [Bertau et al. 2013] zum Einsatz. Eine ausführlichere Beschreibung der technischen Verfahren liefern McGill 2000; Richter und Schermanz 2006; BGS 2011b; Jordens 2013.

### ***Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos***

Obwohl grundsätzlich Daten zur Primärgewinnung der Seltenerdmetalle (SEM) vorliegen, sind diese im Wesentlichen lückenhaft. Genaue Daten zu globalen Reserven sind nur schwer zugänglich, ebenso wie detaillierte Daten zu den einzelnen Elementen, die zu den Seltenerdmetallen gezählt werden. Insgesamt fand die Produktion der Seltenen Erden 2010 in sehr großem Maßstab (133 380 t) statt. Die statischen Reichweiten für die Reserven (739 Jahre) und Ressourcen (2 437 Jahre) sind zwar von allen untersuchten Rohstoffen mit Abstand am größten. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Seltenerd-elemente und ihren variierenden Bedarfsmengen, sind allgemeine Aussagen nur schwer zu treffen.

Die Vormachtstellung Chinas bei der Gewinnung Seltener Erden ist auffallend. Die Marktkonzentration der SEM-Produktion ist von allen untersuchten Rohstoffen am größten, was sich auch im Herfindahl-Hirschman-Index (9 504) widerspiegelt. Im Jahr 2010 stammten rund 97 Prozent der Bergwerksförderung aus China; der Rest aus Indien, Australien, Malaysia und Brasilien [Gambogi 2012]. Neben einer äußerst hohen Konzentration der Produktion, entfallen auch über ein Drittel, genauer 37 Prozent, der globalen Reserven auf China. Deng Xiaoping, ein ehemaliger hochrangiger Politiker Chinas betonte die Bedeutung der Rohstoffe folgendermaßen: »The Middle East has oil, and China has rare earths« [BGS 2011b]. Das Quasi-Monopol der Produktion im Vergleich zu den Vorkommen macht deutlich, dass es China in den vergangenen Jahrzehnten infolge politischer Entscheidungen, Handelszölle und Exportquoten gelungen ist, seine Marktanteile und dominierende Stellung am Weltmarkt kontinuierlich weiter auszubauen [BGS 2011b]. Unter Verweis auf nationale Auflagen und Umweltbedenken, beschränkte China jüngst die Förderungs- und Exportmengen für Seltenerdmetallen [Gambogi 2012], wodurch die Sorge vor ernsthaften Lieferengpässen steigt [BGS 2011b].

Ob diese Länderkonzentration der Produktion künftig weiterbesteht, bleibt ungewiss. Eine Kurzstudie der BGR zeigt, dass das weltweit größte gesicherte SEM-Vorkommen in der Arktis, insbesondere Sibirien, liegt [DERA 2014b]. Gleichzeitig schlussfolgert der Bericht, dass die dortige Rohstoffförderung aufgrund ökologischer Risiken »auch in absehbarer Zukunft eher die Ausnahme und nicht die Regel sein [wird]« [DERA 2014b]. Bereits im Oktober 2013 gab Grönland eine Öffnung des Landes für den Bergbau bekannt [Mining Journal 2013]. Grönland verfügt (neben anderen mineralischen Rohstoffen) über »Vorkommen von Weltrang« [DERA 2010] an Seltenerdmetallen, die den Weltbedarf für 150 Jahre decken könnten [DERA 2012b]. Gleichzeitig gibt es auch hier Bedenken wegen der logistischen und klimatischen Herausforderungen sowie ökologischer Risiken [Mining Journal 2013].

Das Länderrisiko der Produktion ist sehr groß. Die Regierungsführung und Umweltleistung der Förderländer ist insgesamt als schwach anzusehen, wodurch das Versorgungsrisiko verstärkt wird.

Mit Ausnahme zweier Standorte in den USA und Australien, werden SEM ausschließlich als Koppelprodukte anderer Rohstoffe gewonnen [BGS 2011b]; in China als Nebenprodukt der Eisenerzförderung, in Russland bei der Titan-Gewinnung und in Kanada als Koppelprodukt von Uranminen [BGS 2011b]. Daneben fallen SEM z. T. bei der Förderung von Wolfram, Zinn, Niob und Zirkon an [McGill 2000; BGS 2011b]. Insbesondere die Koppelproduktion als Nebenprodukt der Uranförderung steht in Zusammenhang mit beträchtlichen Auswirkungen auf die Umwelt.

Ökologische Probleme der Seltenerdgewinnung stehen zumeist im Zusammenhang mit mangelhaften gesetzlichen Vorschriften und Kontrollen in den Förderländern [BGS 2011b]. Dies betrifft insbesondere teils illegal betriebene Minen mit provisorischen Infrastrukturen, die in der Vergangenheit vermehrt Proteste der Bevölkerung auslösten [adelphi und UBA 2014].

Es gibt drei wesentliche Umweltaspekte bei der Gewinnung Seltener Erden [BGS 2011b; SRU 2012]. Dies ist erstens der Einsatz von Säuren. Zweitens stammt der hohe Energiebedarf zur Gewinnung der Rohstoffe im Hauptförderland China insbesondere aus Kohlekraftwerken. Drittens werden immer noch SEM-Erze gewonnen, die in Vergesellschaftung mit radioaktivem Thorium vorkommen. Bei der Untersuchung der Umweltwirkungen, inkl. Ökotoxizität und Humantoxizität, weisen die einzelnen Seltenerd-Oxide für beide Betrachtungsperspektiven mittlere oder niedrige Werte auf.



## Tantal

### **Gewinnungsprozess**

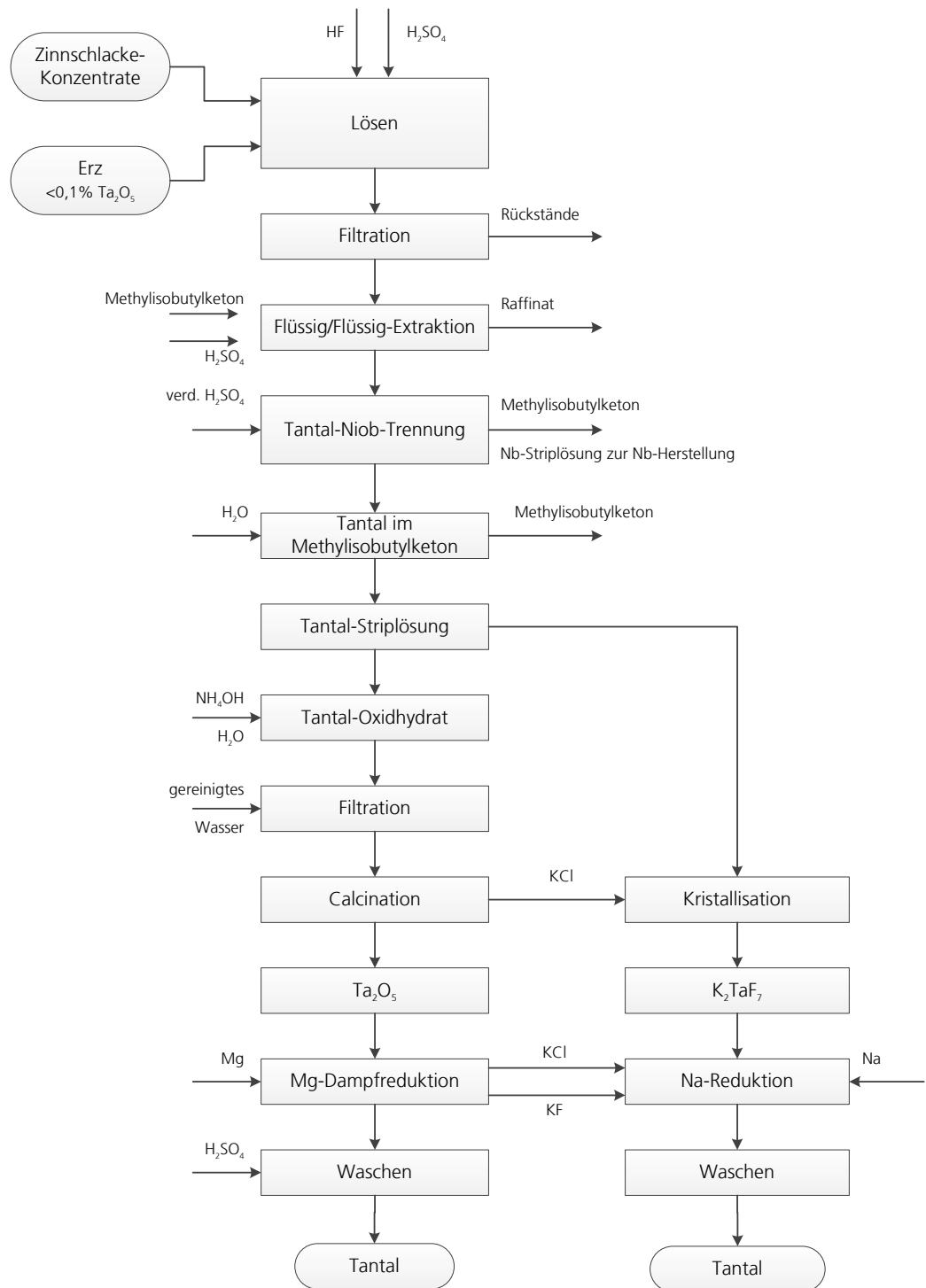
Tantal liegt in der Natur nicht elementar vor, und findet sich zumeist vergesellschaftet mit Niob (Nb) in den Columbit- und Tantalit-Mineralien – gemeinhin auch unter der Bezeichnung Coltan bekannt [Papp 2012; Haas und Schnitter 2006]. Die Tantal(V)-oxid-(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)-Konzentration in ökonomisch relevanten Erzvorkommen liegt in der Regel bei < 0.1 Prozent [Albrecht et al. 2000]. Ta-haltige Zinnvorkommen werden entweder durch einfachste Handarbeit oder in größerem Maßstab abgebaut. Als traditionelle Gewinnung von Tantal gilt das *Marignac*-Verfahren, das bis Mitte der 1950er Jahre Anwendung fand [Haas und Schnitter 2006].

Heutzutage ist ein anderes Verfahren industriell am verbreitetsten (siehe Abbildung 36), das auf der Flüssig/Flüssig-Extraktion basiert und als Ausgangsstoff das Mineral Tantalit (Pyrochlor) nutzt [Haas und Schnitter 2006; Bertau et al. 2013]. Zunächst erfolgt eine Anreicherung mittels Flotation. Während Niob-Verbindungen mithilfe von Säure aufgeschlossen und anschließend ausgefällt werden, verbleibt der Tantal-Komplex in der organischen Phase gelöst [Bertau et al. 2013]. Für die Fällung von schwerlöslichem Kaliumheptafluorotantalat werden Kaliumsalze zugegeben [Bertau et al. 2013].

Um hieraus metallisches Tantal zu erhalten, wird K<sub>2</sub>[TaF<sub>7</sub>] mithilfe von metallischem Natrium bei 800 °C oder durch Schmelzflusselektrolyse reduziert [Crocket et al. 1993; Bertau et al. 2013].

Alternativ kann Niob und Tantal durch fraktionierte Destillation von Columbit mit Kohlenstoff und Chlor durchgeführt werden, wodurch man NbCl<sub>5</sub> und TaCl<sub>5</sub> erhält. Für die anschließende Reduktion Tantals, wird wie oben metallisches Natrium eingesetzt [Bertau et al. 2013]. Einen genauen Überblick über die einzelnen Verarbeitungsverfahren bieten Albrecht et al. 2000.

**Abbildung 36:**  
Erzaufschluss und Tantal-Herstellung.  
Verändert nach [Haas und Schnitter 2006].



### ***Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos***

Die jährliche Produktion von Tantal (Ta) war mit 767 Tonnen im Jahr 2010 sehr gering. Die Datenlage zu den Länderanteilen an der globalen Förderung ist insbesondere für den afrikanischen Raum intransparent, was als Unsicherheitsfaktor zu bewerten ist. Die statische Reichweite der Reserven (154 Jahre) und Ressourcen (288 Jahre) ist unter den untersuchten Rohstoffen mit am größten.

Die globalen Ta-Reserven konzentrieren sich stark auf Brasilien (62 Prozent), woher auch rund ein Viertel (26 Prozent) der konventionellen Ta-Produktion stammt. Auch bei der Primärgewinnung von Tantal ist eine erhöhte Konzentration zu verzeichnen, die sich auf die Länder Brasilien (26 Prozent), die DR Kongo (25 Prozent) und Mozambique (18 Prozent) fokussiert.

Große Vorkommen werden auch in Grönland vermutet, das künftig eine entscheidende Rolle auf dem Ta-Markt spielen könnte. Seit September 2013 lockerte das Land seine strikte Haltung gegenüber Bergbau [Mining Journal 2013; DERA 2010].

Angesichts der politischen Stabilität und Regierungsführung der Förderländer, ist die Tantal-Versorgung als sehr kritisch einzuschätzen; der Rohstoff weist den zweitniedrigsten WGI-Wert auf. Auch die Umweltleistung der Förderländer wird als äußerst schwach bewertet, was negative Auswirkungen auf die Versorgungssituation bedeuten kann.

Der Abbau von Tantal hängt aus ökonomischen Gründen stark von der Gewinnung anderer Rohstoffe ab, zumeist von Zinn, teilweise auch Lithium [Crocket et al. 1993]. Der Grund hierfür ist, dass Tantal in der Natur nicht gediegen auftritt [Bertau et al. 2013]. Rund 60 Prozent der weltweiten Ta-Produktion stammt aus Primärgewinnung aus Erzen, 10 Prozent aus sekundären Konzentraten, 10 Prozent aus Zinnblechen und 20 Prozent aus Altmetallrecycling und synthetischen Konzentraten [Albrecht et al. 2000].

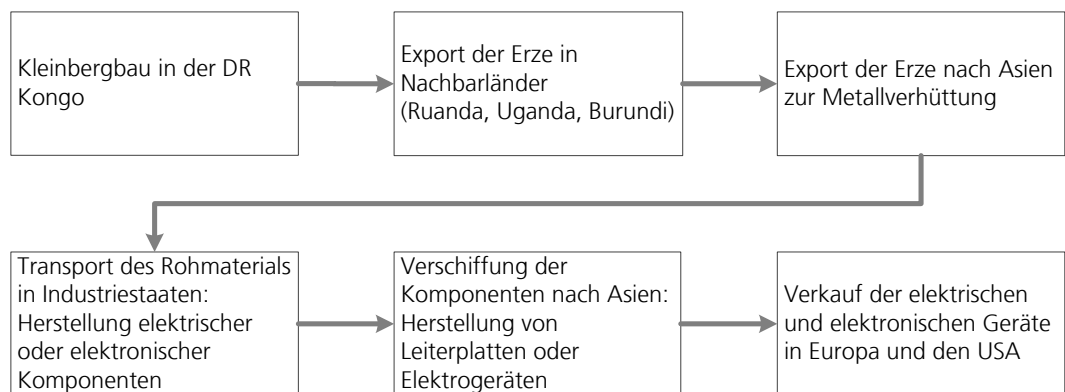
Abgesehen von den Platinmetallen zeigt Tantal die größten Umweltwirkungen je Rohstoffeinheit. Insbesondere der UEBEL-Index, Wasser- und Energieverbrauch je Tonne ist sehr groß. Tantal zeigt von den untersuchten Rohstoffen verhältnismäßig hohe Werte in Bezug auf Ökotoxizität und Humantoxizität bei der Betrachtung je Rohstoffeinheit. Wird die Weltjahresproduktion als Analysegrundlage gewählt, zeigt die globale Tantalförderung die geringsten Werte hinsichtlich Ökotoxizität und Humantoxizität und die Werte der Umweltwirkungen nach UEBEL-Index liegen im mittleren Bereich.

Obwohl Tantal (und Niob) im industriellen Maßstab abgebaut werden, werden auch erhebliche Mengen im Kleinbergbau gewonnen [BGS 2011a]. Die tatsächlichen Produktionszahlen auf dem afrikanischen Kontinent sind nicht verfügbar. Das britische BGS schätzt, dass im Jahr 2009 rund die Hälfte der

globalen Ta-Produktion aus Afrika stammte – zumeist aus der DR Kongo [BGS 2011a]. Dem UN-Bericht zufolge, der sich auf offizielle Statistiken zweier kongolesischer Regionen stützt, gab es im Zeitraum Januar bis September 2009 Coltanexporte in Höhe von 574 Tonnen [UN 2009].

Columbit-Tantalit (Coltan) gilt als Konfliktmineral und wird mit dem Kongo-Konflikt assoziiert. Eine typische Wertschöpfungskette zeigt Abbildung 37. Mehrere Berichte der UN-Expertengruppe zeigen die Verbindung zwischen dem Rohstoff und der Finanzierung bewaffneter Gruppen auf [UN 2009]. Diese Tatsache führte dazu, dass Nichtregierungsorganisationen (NGOs) zertifizierte Lieferketten forderten und verschiedene Initiativen gründeten, um soziale und ökologische Mindeststandards bei der Gewinnung von Mineralien zu gewährleisten [BGR 2007b].

**Abbildung 37:**  
Typische Wertschöpfungskette von Coltan aus der DR Kongo. Darstellung basierend auf [BGS 2011a].



In den Jahren 2008 und 2009 waren rund 40 Prozent der konventionellen Tantalraffinerien im Stillstand [Papp 2012]. Die Industrie suchte damals nach einem Weg, um illegal gewonnenes Coltan aus den Märkten zu drängen [Papp 2012]. Mittlerweile sind die Zertifizierungen der Minen soweit fortgeschritten, dass in den Jahren 2012 und 2013 erneut die Mehrheit, genauer jeweils rund 68 Prozent, des weltweit geförderten Tantals auf dem afrikanischen Kontinent gewonnen wurde [USGS 2014].

## Titan

### **Gewinnungsprozess**

In der Natur liegt Titan hauptsächlich in primären, magmatischen Erzen vor sowie als sekundäre, sogenannte Seifen [Sattelberger 2006]. Die Mineralien mit den höchsten Gehalten an Titan sind Rutil (Titandioxid; 90 – 97 Prozent  $\text{TiO}_2$ ) und Ilmenit (Titaneisen;  $\text{FeO-TiO}_2$  oder  $\text{TiFeO}_3$ ) [Sibum et al. 2000; Bedinger 2012; Bertau et al. 2013]. Ilmenit ist für 92 Prozent der weltweiten Versorgung mit Titanmineralen verantwortlich [USGS 2013]. Weniger als 3 Prozent der geförderterten Titanerze werden für die Herstellung von Titan und Titanlegierungen verwendet; die große Mehrheit (über 95 Prozent) wird zu »Weißpigment«  $\text{TiO}_2$  verarbeitet [Sibum et al. 2000; Sattelberger 2006]. Abbildung 38 stellt die Möglichkeiten zur Gewinnung von Titan und Titan(IV)-oxid ( $\text{TiO}_2$ ) schematisch dar [Zhang et al. 2011].

In einem ersten Schritt erfolgt die Anreicherung der Mineralien Rutil und Ilmenit durch Magnetscheidung und/oder Schwerkrafttrennverfahren, bevor diese mit  $\text{TiO}_2$ -Gehalten von 90 bis 95 Prozent (Rutil) und 54 Prozent (Ilmenit-Konzentrat) auf den Markt kommen [Sattelberger 2006].

Die kommerzielle Produktion von metallischem Titan aus  $\text{TiO}_2$  verläuft in zwei Schritten. Zunächst wird Titan-tetrachlorid ( $\text{TiCl}_4$ ) produziert. Dies geschieht durch die Umsetzung von natürlichem oder dem aus Ilmenit gewonnenen synthetischem Rutil in Gegenwart von Kohlenstoff und Chlor bei Temperaturen von 700 bis 1 200 °C [Sibum et al. 2000; Sattelberger 2006; Bedinger 2012; Bertau et al. 2013]:

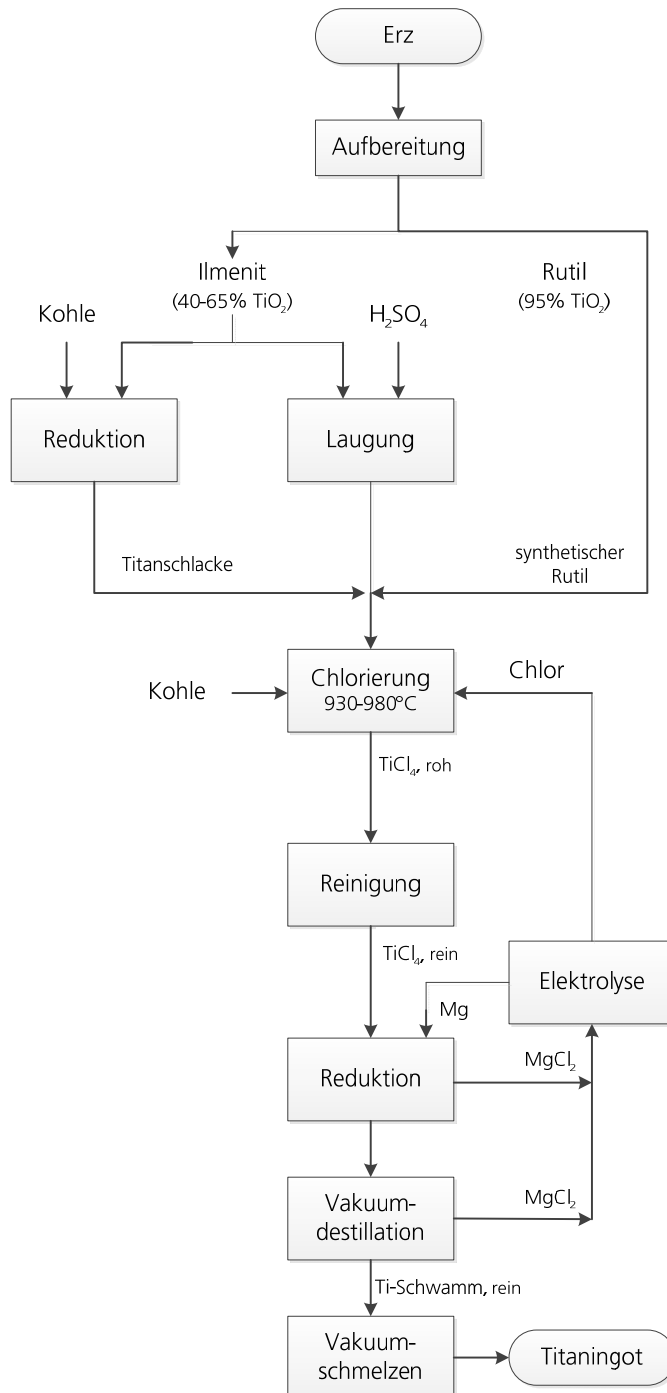


Anschließend erfolgt die Reduktion von Titan-tetrachlorid im Kroll Prozess mit Magnesium oder metallischem Natrium unter Schutzatmosphäre bei 850 bis 950 °C [Sattelberger 2006].



Als Produkt erhält man hierbei ein festes Gemisch aus Titanschwamm, Magnesiumchlorid und Resten der Ausgangsprodukte [Bertau et al. 2013]. Anschließend wird dieses durch Abtrennung des Magnesiumchlorids mittels Vakuumdestillation oder Auslaugens veredelt [Bertau et al. 2013]. Das hierbei erhaltene Titan charakterisiert sich durch einen Reinheitsgrad von 99,5 Prozent [Bertau et al. 2013]. Daneben gibt es noch veraltete, kostenaufwendigere und nicht kommerziell genutzte Verfahren, um hochreines Titan zu erhalten [Sattelberger 2006; Bertau et al. 2013]. Eine genaue Beschreibung der Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung gibt Sibum et al. 2000.

**Abbildung 38:**  
Herstellung von Titan  
im Kroll Prozess.  
Basierend auf  
[Sattelberger 2006].



### ***Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos***

Die jährlichen Produktionsmengen von Titanerzen liegen mit 6 438 000 Tonnen Rutil und Ilmenit in einer beträchtlichen Größenordnung – insbesondere im Vergleich beispielsweise mit Germanium, den Platinmetallen, Beryllium und Tantal, deren Jahresproduktionen um den Faktor zehntausend niedriger liegen. Genaue Produktionszahlen für metallisches Titan (Ti) liegen aufgrund der militärischen Relevanz nicht vor [Wuppertal Institut 2011a]. Die statischen Reichweiten der Titan-Reserven (107 Jahre) und Ti-Ressourcen (293 Jahre) sind verhältnismäßig groß. Die beiden wirtschaftlich bedeutendsten Titanerze sind Rutil und Ilmenit. Während es für die Produktion von Rutil eine hohe Angebotskonzentration auf Australien (54 Prozent) gibt, liegen bei der Ti-Förderung aus dem Mineral Ilmenit keine Besonderheiten vor. Erhöhte und schwach erhöhte Konzentrationen sind bei den Reserven festzustellen: bei Rutil verfügen Australien (48 Prozent) und Südafrika (18 Prozent) über mehr als die Hälfte der globalen Reserven, während bei Ilmenit China (29 Prozent), Australien (19 Prozent) und Indien (12 Prozent) zusammen mehr als die Hälfte besitzen. Hinzu kommt, dass der Markt insgesamt von einer geringen Zahl an Produzenten sowie einer hohen Relevanz militärischer Anwendungen geprägt ist, was sich negativ auf die Versorgungslage auswirken kann [Wuppertal-Institut 2011c].

Ausgehend von der Regierungsführung von Förderländern von Titanerzen ist von einem niedrigen bis mittleren Versorgungsrisiko auszugehen. Gleichzeitig wird deren Umweltleistung als schwach bewertet, was die Versorgungssicherheit negativ beeinträchtigen kann.

Bei der Rohstoffaufbereitung besteht die Gefahr von Wasserbelastungen durch Flotationschemikalien, Säuren und mineralischen Schwebstoffen [Wuppertal Institut 2011a]. Insbesondere bei der Herstellung von Titanetetrachlorid können Chlorgas, Schwefelsäure sowie Wasser als Emissionen anfallen und Luft und Umwelt belasten [Wuppertal Institut 2011a].

Aufgrund des großen Produktionsumfangs ist laut Wuppertal-Institut »von bedeutender Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme auszugehen«, da die Gesamtextaktionsmenge jährlich etwa 1 600 Mio Tonnen beträgt [Wuppertal-Institut 2011c]. Außerdem ist die Herstellung von Titan aufwendig und energieintensiv und Oberflächengewässer können durch Sprenggase, Extraktion oder Abfälle Oberflächengewässer gestört werden [Wuppertal-Institut 2011c]. Dies spiegelt sich auch in der Analyse der Umweltwirkung wider. Während die Umweltwirkungen einer Tonne Titandioxid im Vergleich mit anderen Rohstoffen als mit am geringsten einzustufen sind, zeichnet der Vergleich der jährlichen Produktionsmenge ein konträres Bild. Die globale TiO<sub>2</sub>-Förderung weist den höchsten UEBEL-Index auf und verbraucht die meiste Energie.

Die Titandioxid-Jahresproduktion ist für die zweitgrößten Umweltwirkungen hinsichtlich Humantoxizität und die drittgrößten in Bezug auf Ökotoxizität verantwortlich. Bei der Untersuchung der Wirkungen je Rohstoffeinheit sind die Werte für  $\text{TiO}_2$  im Vergleich zu den anderen Rohstoffen sehr niedrig.



## Wolfram

### **Gewinnungsprozess**

Wolfram, oder veraltet auch Tungsten, ist ein seltenes Element und findet sich in der Natur nie in gediegener Form [Bertau et al. 2013]. Es gibt zwei Gruppen wirtschaftlich bedeutender Wolframerze: die Scheelite und Wolframite [Lassner et al. 2000]. Die Scheelitgruppe mit dem Mineral Scheelit,  $\text{CaWO}_4$ , stellt zwei Drittel der weltweiten Wolframerzvorkommen dar [Gille 2006]. Daneben gibt es die Gruppe der Wolframite, einer Mischung aus  $\text{FeWO}_4$ -reichen Mischkristallen (Ferberit) und  $\text{MnWO}_4$ -reichen (Hübnerite) [Gille 2006; Bertau et al. 2013]. Wolfram kommt nur äußerst selten als pures Metall zum Einsatz und wird überwiegend in Form seiner Verbindungen genutzt [Bertau et al. 2013].

Der erste Schritt bei der Gewinnung von elementarem Wolfram (Wolframpulver) ist die Anreicherung des Erzes durch Abtrennung des Ganggesteins [Gille 2006]. Wolframerze weisen zunächst niedrige  $\text{WO}_3$ -Gehalte von meist weniger als 1,5 Prozent auf [Bertau et al. 2013].

Diese Anreicherung erfolgt durch unterschiedliche sukzessive physikalische Prozessschritte wie Mahlen, Flotation und Elektro- oder Magnetseparation [Bertau et al. 2013], die in Abbildung 39 dargestellt werden. Als Produkt fällt hierbei W-Konzentrat mit mindestens 65 Prozent  $\text{WO}_3$  an, das unmittelbar von der Stahlindustrie eingesetzt werden kann [Bertau et al. 2013].

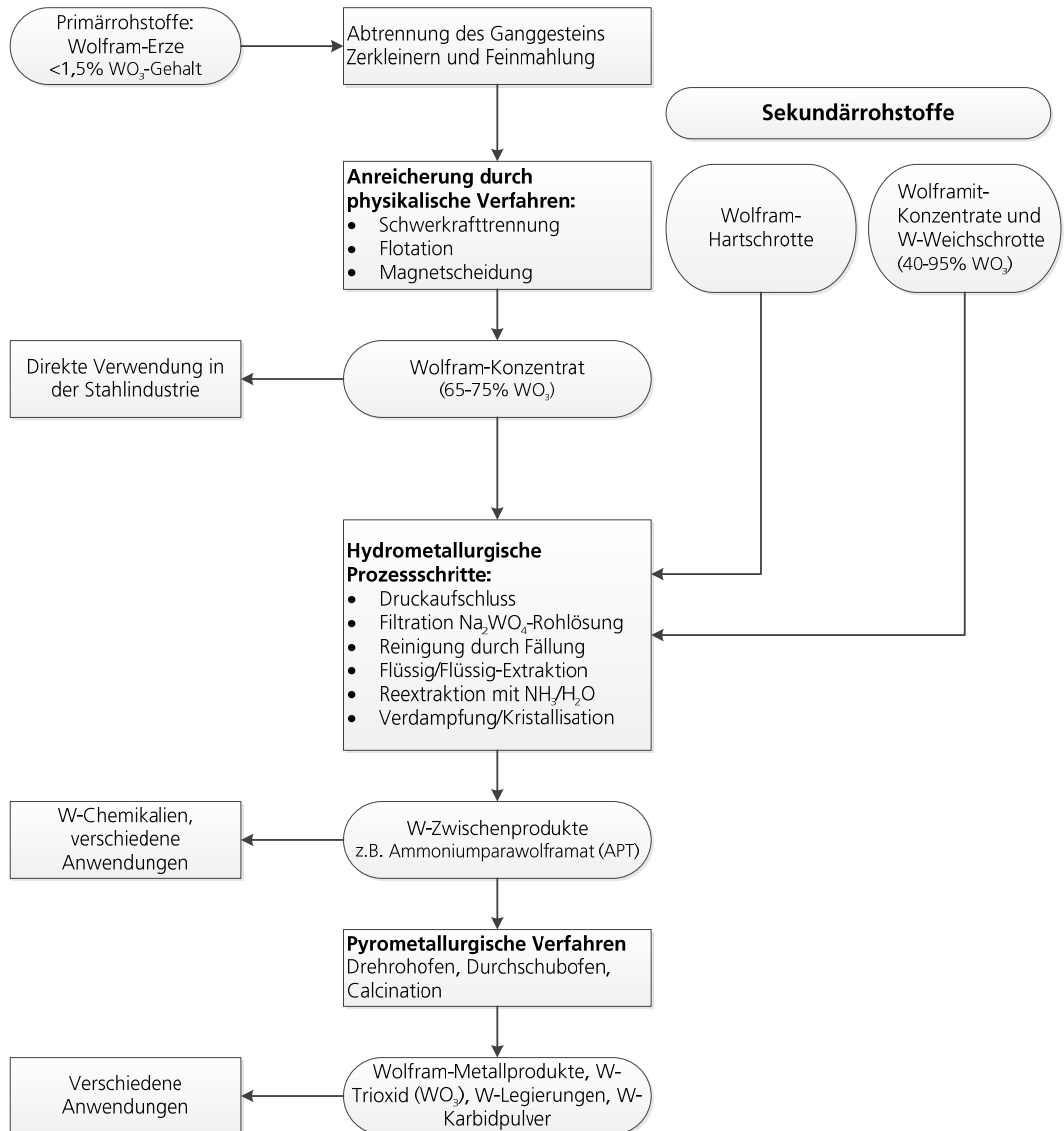
Wird das Wolframkonzentrat nicht direkt in der Industrie eingesetzt, erfolgt die Weiterverarbeitung zu hochreinem Ammoniumparawolframat (engl. Ammonium paratungstate APT). Diese Handelsform von Wolfram gilt als »zentrales Zwischenprodukt« [Gille 2006]. Die APT-Herstellung erfolgt durch hydrometallurgische Aufschlussverfahren mittels Salzschnmelzen, Soda- oder Natronlauge-Druckaufschluss [Gille 2006; Bertau et al. 2013]. Alle modernen Verfahren, um die unlöslichen Bestandteile abzutrennen, sind alkalisch [Gille 2006]. Die in der Lösung enthaltene Silikate, Molybdän und gelöste Metallionen wie As, Sb, Pb, Co werden ausgefällt [Bertau et al. 2013]. Im nächsten Schritt wird aus dieser Lösung Wolfram in Form von Isopolywolframat mittels organischer Lösemittel oder Ionenaustauscherharze extrahiert, gereinigt und durch Herausdestillieren von Wasser und Ammoniak in ATP,  $(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}) \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ , umgewandelt [Bertau et al. 2013; Gille 2006].

Um aus ATP letztlich Wolframcarbid (WC), Wolframmetallpulver oder Wolframbasislegierungen oder -verbundstoffe herzustellen, kommen pyrometallurgische Verfahren, wie Kalzinierung in Drehrohöfen oder Durchschuböfen, zum Einsatz [Gille 2006]. Aus den Wolframoxiden kann durch Reduktion wiederum Wolframpulver, also elementares Wolfram, hergestellt werden [Lassner et al. 2000]:



Eine detaillierte Beschreibung der Verfahrensschritte liefern Lassner et al. 2000.

**Abbildung 39:** Übersicht der Wolfram-Herstellung. Darstellung verändert nach [Gille 2006; Lassner et al. 2000; BGS 2011c; Gille und Meier 2012].



### ***Relevante Aspekte hinsichtlich des Versorgungsrisikos***

Die globale Jahresproduktion von Wolfram (W) ist mit 68 820 Tonnen verhältnismäßig groß. Wolfram ist ein Industrirohstoff mit nur geringer Reichweite der Reserven (40 Jahre), die Reichweite der Ressourcen beträgt 102 Jahre. Die weltweite Wolframingewinnung konzentriert sich äußerst stark auf China, das 86 Prozent der weltweiten Produktionsanteile besitzt. Daneben konzentrieren sich auch mehr als die Hälfte (65 Prozent) der globalen Reserven auf die Volksrepublik.

Die Regierungsführung der Förderländer wird als eher schwach bewertet, wodurch sich ein mäßiges Versorgungsrisiko ergibt. Das gleiche gilt für die Umweltleistung, die außerdem als schwach angesehen wird, was das Versorgungsrisiko erhöht.

Wolfram gilt als Konfliktmineral, da sich bewaffnete Gruppen u. a. mit Wolframithandel finanzieren, weshalb das Erz Gegenstand des Dodd-Frank-Act ist. Zudem wird Wolfram auch im Kleinbergbau gewonnen, weshalb transparente Wertschöpfungsketten empfehlenswert sind.

Trotz des niedrigen UEBEL-Index der Wolframproduktion, zeigte die Untersuchung, dass für die Gewinnung einer Tonne Wolfram ein sehr hoher Materialaufwand notwendig ist. Die globale Wolframproduktion ist zudem für den meisten Wasserverbrauch aller Rohstoffe verantwortlich.

Obwohl Wolfram seit seiner Entdeckung Ende des 18. Jahrhunderts vielfältig eingesetzt wird, gibt es wenige Erkenntnisse über eine möglicherweise negative Wirkung von Wolfram auf die Umwelt, Lebewesen und mögliche Verbreitungswege [Wilson und Pyatt 2006]. Dies kann ein Grund dafür sein, weshalb in den untersuchten Ökobilanzierungsdatenbanken keine Informationen zu Wolfram vorhanden sind. Strigul et al. 2005 weisen darauf hin, dass Wolfram durch vermehrte Anwendung erleichterten Eingang in die menschliche und natürliche Umwelt findet [Strigul et al. 2005].

Ein direkter biologischer Einfluss von Wolfram auf Bodenorganismen, Pflanzen und Tiere ist zum derzeitigen Kenntnisstand nicht endgültig nachzuweisen. Dennoch konnten negative Wirkungen bei einer Wolframpulver-Konzentration von mehr als 10 000 mg/kg in Böden gemessen werden [Strigul et al. 2005]: Bodenbakterien und Pflanzen sterben und Pilzwachstum nimmt zu. Dies lässt sich auf Bodenversauerung infolge einer erhöhten W-Konzentration zurückführen, jedoch nicht direkt auf das Wolfram [Strigul et al. 2005]. Daneben wurde nachgewiesen, dass Wolfram bioakkumuliert [Wilson und Pyatt 2006]. Jedoch ist der toxische Charakter von Wolfram stark von dessen chemischer Form und den Verbreitungswegen abhängig [Strigul et al. 2005].

Daneben sei auf einen möglichen Zusammenhang zwischen Wolfram und gehäuften Fällen von akuter lymphatischer Leukämie bei Kindern in drei verschiedenen Regionen unterschiedlicher US-Bundesstaaten hingewiesen [Koutsospyros 2006]. Obwohl die Erkrankungen nicht eindeutig auf W zurückzuführen sind, konzentrieren sich die Fälle auf Gebiete mit aktiven oder stillgelegten W-Minen und/oder Einrichtungen für W-Verarbeitung und Militärbasen. Darüber hinaus wurden erhöhte W-Konzentrationen in den Bäumen der unterschiedlichen Gebiete nachgewiesen [Sheppard und Witten 2003]. Abschließend bleibt die Erkenntnis, dass die Wirkung von W auf die Umwelt und menschliche Gesundheit nur fragmentarisch und unvollständig ist. Insgesamt kann die Toxizität von Wolfram deutlich geringer eingestuft werden als die anderer Schwermetalle [Lassner et al. 2000].

## Anlage 3: Umweltwirkungen

**Anlage 3:**  
 Verwendete Datensätze für Ökobilanzierung, Namen der jeweiligen Prozesse und Methoden wie in Datenbanken angegeben. Als Quelle steht [1] für die ecoinvent data v2.2 Datenbank [ecoinvent 2009] und [2] für die ProBas-Datenbank [UBA und Öko-Institut 2013].

Rohstoff	Name des Prozesses	Quelle
<b>Antimon</b>	<i>antimony, at refinery, CN, [kg] (#11162)</i>	[1]
<b>Beryllium</b>	<i>keine Daten vorhanden</i>	
<b>Germanium</b>	<i>keine Daten vorhanden</i>	
<b>Kobalt</b>	<i>cobalt, at plant, GLO, [kg] (#5836)</i>	[1]
<b>Molybdän</b>	<i>molybdenum, at regional storage, RER, [kg] (#1116)</i>	[1]
<b>Platinmetalle</b>		
Iridium	<i>Iridium</i>	[2]
Osmium	<i>Osmium</i>	[2]
Palladium	<i>palladium, at regional storage, RER, [kg] (#1127)</i>	[1]
Platin	<i>platinum, at regional storage, RER, [kg] (#1133)</i>	[1]
Rhodium	<i>rhodium, at regional storage, RER, [kg] (#1142)</i>	[1]
Ruthenium	<i>Ruthenium</i>	[2]
<b>Seltenerdmetalle</b>		
Cer-Oxid-Konzentrat	<i>cerium concentrate, 60% cerium oxide, at plant, CN, [kg] (#6949)</i>	[1]
Lanthan-Oxid	<i>lanthanum oxide, at plant, CN, [kg] (#6944)</i>	[1]
Neodym-Oxid	<i>neodymium oxide, at plant, CN, [kg] (#6950)</i>	[1]
Praseodym-Oxid	<i>praseodymium oxide, at plant, CN, [kg] (#6951)</i>	[1]
Samarium-, Europium-, Gadolinium-Konzentrat	<i>samarium europium gadolinium concentrate, 94% rare earth oxide, at plant, CN, [kg] (#6952)</i>	[1]
Seltenerd-Oxid-Konzentrat	<i>rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite, at beneficiation, CN, [kg] (#6954)</i>	[1]
<b>Tantal</b>	<i>tantalum, powder, capacitor-grade, at regional storage, GLO, [kg] (#8054)</i>	[1]
<b>Titandioxid</b>	<i>titanium dioxide, production mix, at plant, RER, [kg] (#355)</i>	[1]
<b>Wolfram</b>	<i>Wolfram</i>	[2]

**Anlage 3:**

Fortsetzung.  
 Übersicht der  
 Methoden zur  
 Bewertung der  
 Umweltwirkung.  
 Die Quelle [1]  
 verweist auf die  
 ecoinvent  
 Datenbank v2.2  
 [ecoinvent 2009],  
 [2] auf die Pro-Bas-  
 Datenbank [UBA  
 und Öko-Institut  
 2013].

Indikatoren zur Abschätzung der Umweltwirkung		Name der LCIA Methode und Quelle
Ressource – Ressourcenindikator		Einheit
1	<b>Material</b> Ressourcenverbrauch: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	[kg] [t] a) EDIP2003/ non-renewable resources [1] b) Ressourcen: KRA, absolut (Kumulierter Rohstoffaufwand) abzgl. KRA, Biotisch. Rohstoffaufwand [2]
2	<b>Energie</b> Energieverbrauch: Kumulierter Energieaufwand (KEA)	[MJ] a) Cumulative Energy Demand (CED) [1] b) Ressourcen: KEA, absolut (Kumulierter Energieaufwand) [2]
3	<b>Wasser</b> Wasserbedarf: » H <sub>2</sub> O- Fußabdruck «	[m <sup>3</sup> ] [l] a) ReCiPe Midpoint (H)/water depletion [1] b) Ressourcen: Wasserbedarf [2]
Schutzgut – Umweltindikator		Einheit
4	<b>Boden</b> Landverbrauch: Flächenumwandlung	[m <sup>2</sup> /a] a) CML 2001/ land use [1] b) Ressourcen: Flächeninanspruchnahme (Summe aus ‚Acker- und Forstflächen‘ und ‚Versiegelte Flächen‘) [2]
5	<b>Gewässerqualität</b> Eutrophierung	[kg N] a) EDIP2003/eutrophication, separate N potential [1] b) Gewässereinleitungen: Summe Stickstoff (als N) [2]
		[kg AO <sub>x</sub> ] a) cumulative LCI results/To Nature/water: AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl (Summe aus ‚ocean‘ und ‚river‘) [1] b) Gewässereinleitungen: halogenhaltige org. Verb. AOX [2]
6	Klima Treibhauspotenzial (THP): » CO <sub>2</sub> - Fußabdruck «	[kg CO <sub>2</sub> - Äq.] a) IPCC 2007/ GWP 100a [1] b) Luftemissionen: Treibhauseffekt [2]
7	Luftqualität Versauerung	[kg SO <sub>2</sub> ] a) CML 2001/ acidification potential (AP), generic [1] b) Luftemissionen: Versauerung [2]
		[kg NO <sub>x</sub> ] a) selected LCI results/air: nitrogen oxides [1] b) Luftemissionen: NO <sub>x</sub> (aus NO <sub>2</sub> ) [2]
		[kg NH <sub>3</sub> ] a) cumulative LCI results/To Nature/air: Ammonia, unspecified [1] b) Luftemissionen: NH <sub>3</sub> [2]
		[kg NMVOC] a) selected LCI results/air: NMVOC [1] b) Luftemissionen: NMVOC [2]
AGGREGIERTER INDIKATOR		Einheit
Umwelteinwirkungsbelastung		UEBEL

**Anlage 3:**  
 Umwelt-  
 einwirkungs-  
 belastung je  
 Rohstoffeinheit  
 (Tonne) nach  
 Gewichtung,  
 alle Werte  
 angegeben in  
 der Einheit  
 UEBEL.

	<b>Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL*a) je Tonne Rohstoff</b>				
	<b>Summe</b>	<b>Klima</b>	<b>Luft- qualität</b>	<b>Gewässer</b>	<b>Boden</b>
<b>Rhodium</b>	<b>5,377E-02</b>	1,160E-04	2,898E-03	3,909E-02	1,167E-02
<b>Platin</b>	<b>2,757E-02</b>	5,929E-05	1,342E-03	2,016E-02	6,006E-03
<b>Palladium</b>	<b>1,709E-02</b>	3,893E-05	2,788E-03	1,084E-02	3,420E-03
<b>Osmium</b>	<b>1,327E-02</b>	5,900E-05	1,289E-03	3,889E-03	8,036E-03
<b>Iridium</b>	<b>1,079E-02</b>	4,799E-05	1,048E-03	3,162E-03	6,534E-03
<b>Ruthenium</b>	<b>1,886E-03</b>	8,449E-06	1,832E-04	5,524E-04	1,142E-03
<b>Tantal</b>	<b>1,258E-03</b>	1,041E-06	1,248E-06	5,409E-04	7,150E-04
<b>Molybdän</b>	<b>1,121E-04</b>	3,072E-08	1,306E-07	9,540E-05	1,658E-05
<b>Antimon</b>	<b>9,326E-05</b>	5,170E-08	1,493E-07	8,001E-05	1,305E-05
<b>Kobalt</b>	<b>5,511E-05</b>	3,332E-08	6,299E-08	4,453E-05	1,049E-05
<b>Sm-, Eu-, Gd- Konzentrat (94% SEO)</b>	<b>4,989E-05</b>	2,225E-07	1,555E-07	3,484E-05	1,468E-05
<b>Praseodym- Oxid</b>	<b>3,788E-05</b>	1,657E-07	1,161E-07	2,631E-05	1,129E-05
<b>Neodym-Oxid</b>	<b>3,559E-05</b>	1,543E-07	2,148E-07	2,461E-05	1,061E-05
<b>Wolfram</b>	<b>2,535E-05</b>	1,148E-08	2,429E-07	3,393E-06	2,170E-05
<b>Cer-Oxid- Konzentrat</b>	<b>1,193E-05</b>	3,327E-08	2,052E-06	6,453E-06	3,389E-06
<b>Lanthan-Oxid</b>	<b>1,077E-05</b>	3,738E-08	2,701E-08	7,069E-06	3,635E-06
<b>Titandioxid</b>	<b>5,725E-06</b>	1,827E-08	1,926E-08	4,977E-06	7,107E-07
<b>Seltenerd-Oxid- Konzentrat (70% SEO)</b>	<b>2,976E-06</b>	5,543E-09	4,519E-09	1,752E-06	1,214E-06

**Anlage 3:**  
 Umwelt-  
 einwirkungs-  
 belastung der  
 globalen  
 jährlichen  
 Gesamt-  
 produktion  
 nach  
 Gewichtung,  
 alle Werte  
 angegeben in  
 der Einheit  
 UEBEL.

	<b>Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) der Weltjahresproduktion</b>				
	<b>UEBEL- Summe</b>	Klima	Luftqualität	Gewässer	Boden
Titandioxid	<b>36,860</b>	1,176E-01	1,240E-01	3,204E+01	4,576E+00
Molybdän	<b>27,103</b>	7,424E-03	3,155E-02	2,306E+01	4,007E+00
Antimon	<b>15,574</b>	8,635E-03	2,493E-02	1,336E+01	2,179E+00
Platin	<b>5,321</b>	1,144E-02	2,590E-01	3,891E+00	1,159E+00
Kobalt	<b>4,930</b>	2,981E-03	5,634E-03	3,983E+00	9,382E-01
Palladium	<b>3,451</b>	7,865E-03	5,631E-01	2,190E+00	6,909E-01
Wolfram	<b>1,745</b>	7,901E-04	1,672E-02	2,335E-01	1,494E+00
Tantal	<b>0,857</b>	7,092E-04	8,497E-04	3,683E-01	4,869E-01
Neodym-Oxid	<b>0,774</b>	3,356E-03	4,670E-03	5,351E-01	2,307E-01
Cer-Oxid- Konzentrat	<b>0,531</b>	1,784E-03	1,295E-03	3,460E-01	1,817E-01
Lanthan-Oxid	<b>0,386</b>	1,341E-03	9,692E-04	2,536E-01	1,304E-01
Praseodym-Oxid	<b>0,248</b>	1,083E-03	7,586E-04	1,720E-01	7,378E-02
Ruthenium	<b>0,068</b>	3,042E-04	6,594E-03	1,989E-02	4,113E-02
<b>SUMME</b>	<b>97,847</b>	<b>0,165</b>	<b>1,040</b>	<b>80,453</b>	<b>16,188</b>



## Anlage 4: Relevante Rohstoffe in Leiterplatten

**Anlage 4:**  
 Gehalt an für  
 Baden-  
 Württemberg  
 wirtschafts-  
 relevanten  
 Rohstoffen in den  
 Leiterplatten  
 ausgewählter  
 Elektronikgeräte  
 [Blaser 2012].

in mg/kg Gerät	Sb	Be	Ge	Co	Pd	Rh	Pt	Ru	Ce
PC	168	0,2		1	4,6		0,1	0,2	1,7
Laptop	186	4,7	2,0	11,7	24,3		0,2	0,9	4,4
Telefongerät	27			1,9					
Drucker	7		0	0,5	0,3				
Mobiltelefon	149	7,9	14,1	105,7	72,9	105,9	2,7	1,8	160,2
Faxgerät	82			51,2	13,4				
TV, CRT	33			0,1	0,1				
TV, Plasma	62								
TV, LCD	220				1,3				
Videorekorder, VCR	205			7,5	4		0,9	0,9	
DVD-Spieler	168			7,7	1,4		0,6	0,2	0,7
Stereoanlage	52			0,4					
Kassettenradio	316			0,4	1,8		0,2		
Digitalkamera	364	13,8	28,3	33,2	38,3	47,5	0,2	2,1	15,0
Videokamera	334		35,4	26,6	152,2		1,8	2,3	39,4
CD-Spieler, tragbar	141		14,1	8,1	0,5				10,1
Minidisk-Spieler, tragbar	181	9,4	18,8	23,6	43,2				3,1

Fortsetzung  
 Anlage 4.

in mg/kg Gerät	Dy	Gd	La	Nd	Pr	Tb	Ta	W
PC			9,2	8,3			0,1	7,8
Laptop			15,3	70,8			282,4	0,5
Telefongerät			3,9	5,8				
Drucker			0,1	0,8				0,2
Mobiltelefon	10,9	19,6	162,7	523,7	51	13,6	549,1	458,7
Faxgerät								8,8
TV, CRT			0	0				
TV, Plasma		7,8	7,8	7,8			7,8	
TV, LCD								
Videorekorder, VCR							1,8	3,0
DVD-Spieler				14,0			10,7	0,9
Stereoanlage								9,4
Kassettenradio							0,5	2,4
Digitalkamera	11,4		28,1	67,9		3,6	1644,1	140,2
Videokamera	10,9	17,7	78,8	144,6	17,7	5,3	1536,9	102,4
CD-Spieler, tragbar	10,1		10,1	20,2			67,2	2,0
Minidisk-Spieler, tragbar	15,7		15,7	15,7			1507,2	16,5

**Legende**

11,4

 keine Angabe über Baujahr der untersuchten Geräte bzw. Baujahr zu alt  
und zusätzlich zu geringe Datenanzahl zur Mittelwertbildung

11,4

 keine Angabe über Baujahr der untersuchten Geräte bzw. Baujahr zu alt  
oder zu geringe Datenanzahl zur Mittelwertbildung

## Anlage 5: Ausstattung privater Haushalte mit Elektronikgeräten

### Anlage 5:

Ausstattungsgrad, Geräteanzahl, Gerätegewicht und Gesamtgewicht an Elektro- und Elektronikgeräten in Bezug auf das Jahr 2010 in Baden-Württemberg [nach EMPA 2009; Blaser 2012; StaLa BW 2014b; StaLa BW 2014c].

	<b>Ausstattungsgrad Haushalte in %</b>	<b>Geräteanzahl</b>	<b>Gewicht je Gerät in kg</b>	<b>Gesamtgewicht in t</b>
PC	64,1	3 231 730	9,90	31 994
Laptop	46,8	2 359 516	3,50	8 258
Digitalkamera	69,1	3 483 815	0,30	1 045
Mobiltelefon	87,5	4 411 488	0,13	573
DVD-Spieler	68,5	3 453 565	5,00	17 268
Videokamera	19,4	978 090	0,40	391

Haushalte in Baden-Württemberg 2010: 5 041 700

## Anlage 6: Theoretisches Potenzial in Elektronikgeräten

**Anlage 6:**  
 Theoretisches Potenzial an für Baden-Württemberg wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in ausgewählten und im Bestand baden-württembergischer Haushalte befindlicher Elektronikgeräte 2010 [nach Blaser 2012; EMPA 2009; StaLa BW 2014b; StaLa BW 2014c; StaLa BW 2014d].

Element	Gerät		
	Desktop PC	Laptop	Digitalkamera
	Potenzial in kg		
<b>Antimon</b>	5 375	1 536	380
<b>Beryllium</b>	6	39	14
<b>Germanium</b>		17	30
<b>Kobalt</b>	32	97	35
<b>Molybdän</b>			
<b>Platinmetalle</b>			
Palladium	147	201	40
Rhodium			50
Platin	3	2	0,2
Ruthenium	6	7	2
<b>Seltenerdelemente</b>			
Cer	54	36	16
Dysprosium			12
Gadolinium			
Lanthan	294	126	29
Neodym	266	585	71
Praseodym			
Terbium			4
<b>Tantal</b>	3	2 332	1 718
<b>Titan</b>			
<b>Wolfram</b>	250	4	147

Fortsetzung  
 Anlage 6.

Element	Gerät: Potenzial in kg			Gesamt- potenzial in kg
	Mobil- telefon	DVD- Spieler	Video- kamera	
<b>Antimon</b>	85	2 901	131	<b>10 409</b>
<b>Beryllium</b>	5	-	-	<b>64</b>
<b>Germanium</b>	8	-	14	<b>68</b>
<b>Kobalt</b>	61	133	10	<b>367</b>
<b>Molybdän</b>	-	-	-	<b>-</b>
<b>Platinmetalle</b>				
Palladium	42	24	60	<b>513</b>
Rhodium	61	-	-	<b>110</b>
Platin	2	10	1	<b>18</b>
Ruthenium	1	3	1	<b>21</b>
<b>Seltenerdelemente</b>				
Cer	92	12	15	<b>226</b>
Dysprosium	6	-	-	<b>18</b>
Gadolinium	11	-	7	<b>18</b>
Lanthan	93	-	31	<b>574</b>
Neodym	300	242	57	<b>1 520</b>
Praseodym	29	-	7	<b>36</b>
Terbium	8	-	2	<b>14</b>
<b>Tantal</b>	315	185	601	<b>5 155</b>
<b>Titan</b>	-	-	-	<b>-</b>
<b>Wolfram</b>	263	16	40	<b>719</b>

**Legende**

- |      |  |
|------|--|
| 11,4 | Erhebliche Unsicherheiten in der Höhe der Potenziale |
| 11,4 | Geringere Unsicherheiten in der Höhe der Potenziale  |

## Anlage 7: Theoretisches Potenzial in Laptops

**Anlage 7:**  
 Potenziale an wirtschaftsrelevanten Rohstoffen in Laptops in baden-württembergischen Haushalten 2010 [nach StaLa BW 2014c; StaLa BW 2014d; LANUV 2012].

	<b>Gehalt Laptop (CCFL) in mg</b>	<b>Gehalt Laptop (LED) in mg</b>	<b>Potenzial BW 2010 Laptop (CCFL) in kg</b>	<b>Potenzial BW 2010 Laptop (LED) in kg</b>	<b>Gesamtpotenzial BW 2010 Laptop in kg</b>
Kobalt	65 000	65 000	15 337	138 032	153 369
Neodym	2 100	2 100	495	4 459	4 955
Tantal	1 700	1 700	401	3 610	4 011
Praseodym	270	270	64	573	637
Dysprosium	60	60	14	127	142
Palladium	40	40	9	85	94
Platin	4	4	1	8	9
Yttrium	1,80	1,60	0,400	3	4
Gallium	0	1,60	-	3	3
Gadolinium	0,01	0,75	0,002	2	1,60
Cer	0,08	0,10	0,020	0,2	0,20
Europium	0,13	0,03	0,030	0,1	0,10
Lanthan	0,11	0	0,030	-	0,03
Terbium	0,04	0	0,010	-	0,01

Laptops in Baden-Württemberg 2010: 2 359 516  
 davon Laptops (CCFL): 235 952  
 davon Laptops (LED): 2 123 564

## Anlage 8: Recyclingverfahren

### Antimon

Aufgrund seiner Verwendung in Autobatterien ist Antimon-Recycling eng mit dem Blei-Recycling sowie der globalen Automobilproduktion verbunden [Carlin 2012]. Gleichzeitig nimmt der Sb-Gehalt aufgrund von Umweltbedenken in Autobatterien tendenziell ab, wodurch auch ein Rückgang des Recyclings zu erwarten ist [Grund et al. 2000; Carlin 2012]. Als problematisch gilt das Recycling von Antimonoxiden, die als Grundstoff zur Herstellung von Flammenschutzadditiven in Kunststoffen häufig ungenutzt im Haushaltsmüll enden [Carlin 2012].

#### ***Antimon-Recycling aus Bleiakkumulatoren aus Fahrzeugen***

Während im Jahr 2000 rund 95 Prozent des recycelten Antimons in den USA aus Bleiakkumulatoren stammte und direkt in den Produktionskreislauf der Batterieindustrie zurückgeführt wurde, nahm der Anteil in den vergangenen drei Jahrzehnten stetig ab [Carlin 2006]. So wurden die traditionellen bleisäurehaltigen Akkumulatoren der Fahrzeugindustrie häufig durch Lithium-Ionen-Akkumulatoren abgelöst oder Bleianteile durch Calcium-Zusätze ersetzt [Carlin 2006]. Dennoch wird im Folgenden der Prozess schematisch dargestellt.

Zunächst erfolgt eine mechanische Zertrennung der Batterie in eine Plastikfraktion, eine Metallfraktion (87-88 Prozent Pb, 3-3,5 Prozent Sb) und eine Oxid-Sulfat-Schlacke (70-76 Prozent Pb, 0,5-1 Prozent Sb) [Grund et al. 2000]. Die Metallfraktion wird in einem rotierenden Flammofen oder Drehrohfen geschmolzen, um eine Sb-Pb-Legierung zu erhalten [Grund et al. 2000]. Die Schlacke wird unter Zugabe von S-bindenden Stoffen bei reduzierenden Bedingungen zu Hartblei verhüttet. Das Hartblei kann zusammen mit Blei mit höheren Sb-Gehalten zu handelsüblichen Legierungen verschmolzen werden [Grund et al. 2000]. Gelegentlich werden das Antimon und die Antimon-Blei-Gemische auch durch Oxidierungsprozesse umgewandelt, um Blei mit höheren Sb-Konzentrationen zu erhalten [Grund et al. 2000].

#### ***Antimon-Recycling aus Flammenschutzadditiven***

Obwohl die Mehrheit des verwendeten Antimons in der Kunststoffindustrie als Flammenschutzadditiv verwendet wird, findet Recycling hierbei nahezu keine Anwendung [Carlin 2012]. Der Grund hierfür ist die dissipative Verteilung des Elements in den Endprodukten [DERA 2013]. Auch in einigen Elektroaltgeräten finden sich nur sehr geringe Antimonkonzentrationen von 0,1 Prozent Gewichtsanteil, wodurch umfassendes Recycling erschwert wird [Carlin 2012].

Dennoch gibt es Möglichkeiten, um Sb aus Plastik in Form von Antimonpulver zu recyceln, wie ein chinesisches Patent [Wang et al. 2013] zeigt. Das Plastikrecycling umfasst verschiedene Verfahrensschritte und erfolgt unter Säurelaugung und hohen Temperaturen. Für das Sb-Recycling erfolgen im Wesentlichen vier Schritte:

Zugabe einer Base zur Erhöhung des pH-Werts von 1,0 auf 2,0, Beigabe eines Eisenpräparats, Filtration zur Trennung der festen und flüssigen Bestandteile und Separierung des Sb-Pulvers [Wang et al. 2013].

### ***Antimon-Recycling aus Anodenschlamm***

Des Weiteren gibt es Methoden, um Antimon aus Anodenschlamm herzustellen. Ein patentiertes Verfahren aus China nutzt Kupferanodenschlamm als Ausgangsmaterial, basiert auf Auswaschung und kombiniert pyrometallurgische und hydrometallurgische Prozessschritte, wodurch Sb-Recyclingquoten von bis zu 95 Prozent erreicht werden [Jianfu 2009]. Eine weitere Methode nutzt Bleianodenschlamm unter Behandlung mit Chlorierung und Laugung mit anschließender Filtration zur Sb-Rückgewinnung [Liu et al. 2013]. Darüber hinaus ist ein Prozess patentiert, womit aus schwefelhaltiger Schlacke durch Drucklaugung Antimon mit 81-82 Prozent Effizienz recycelt werden kann [Bao et al. 2010].

Ein geringes Potenzial für Sb-Recycling stellen ferner Lötstellen in Wasserleitungen dar, bei denen traditionell verwendetes Blei aufgrund der Gesundheitsgefährdung durch ein Gemisch aus Antimon, Silber und Zinn ersetzt wurde [Carlin 2006].



## Beryllium

Beryllium-Recycling steht vor einer Reihe von Herausforderungen. Der Markt für Be-Recyclingmaterial ist begrenzt und durch zyklische Entwicklungen von Unsicherheiten geprägt [Cunningham 2006a]. Zugleich sind recycelbare metallische Berylliumbestandteile, die trotz ihrer langen Lebensdauer prinzipiell problemlos wiedergewonnen werden könnten [BeST 2014], z. T. in Atomreaktoren oder Nuklearwaffen verbaut [Cunningham 2006a]. Daher besteht das Risiko einer radioaktiven Verschmutzung [Cunningham 2006a], wodurch eine Vorbehandlung notwendig ist [Druyts 2005]. Hierfür finden sich zwei angemeldete Patente, die ein solches Reinigungsverfahren beinhalten [Kawamura et al. 1997; Kawamura et al. 2009]. Darüber hinaus können bei den Recyclingverfahren Be-Emissionen in Form von toxischen Stäuben entstehen, von denen eine Gesundheitsgefahr ausgeht [Cunningham 2006a].

### ***Beryllium-Recycling aus Legierungen***

Obwohl in den USA rund 75 Prozent des Berylliumkonsums auf Beryllium-Kupfer-Legierungen in elektrischen und elektronischen Gerätebestandteilen zurück zu führen ist, wird derzeit nur wenig hiervon recycelt [Cunningham 2006a]. Dies hängt vor allem mit der geringen Größe der Bestandteile zusammen und den damit verbundenen technischen Schwierigkeiten bei ihrer Trennung sowie den niedrigen Berylliumgehalten [Cunningham 2006a]. Be-haltiger Elektronikmüll enthält in der Regel zu geringe Anteile an Beryllium, das beispielsweise mit Konzentrationen von ~2 ppm in Kupferlegierungen vorliegt [BeST 2014]. Beim Recycling von Cu-Be-Legierungen wird insbesondere der Kupferanteil rückgewonnen und der Be-Anteil geht ungenutzt verloren [Cunningham 2006a]. Daher bleibt Be in Schlacken zurück, sodass zwar einerseits keine Gefahr von toxischen Be-Stäuben ausgehen kann, die Berylliumanteile andererseits jedoch auch nicht recycelt werden können und als Reststoff zurückbleiben [BeST 2014].

### ***Recycling von Ammoniumfluoroberyllat***

Ein russisches Patent beschreibt ein Recyclingverfahren zur Rückgewinnung von Ammoniumfluoroberyllat mit hohem Reinheitsgrad, welches als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Be-Metall verwendet werden kann [Matjasova et al. 2013].

### ***Recycling von Beryllium-Oxiden***

Bei thermischer Behandlung von Be-haltigen Abfallströmen ist es möglich die Beryllium-Anteile in Oxid-Form zu überführen, wodurch eine Rückgewinnung möglich wird [Oakdene Hollins 2011]. Dieses kann anschließend in Berylliumchlorid umgewandelt werden und als Katalysator in der Industrie oder im Labor eingesetzt werden [Oakdene Hollins 2011]. Das Beryllium-Oxid kann auch mit Wasser reagieren und somit in Hydroxid-Form überführt werden. Gemeinsam mit CO<sub>2</sub> wird hieraus Beryllium-Karbonat geformt, das thermisch in Oxid-Form umgewandelt werden und anschließend mittels Salzsäure in Chlorid-Form umgewandelt

werden kann [Eneh 2011; Oakdene Hollins 2011]. Bei einer einfachen Verbrennung hingegen gehen Berylliumanteile in die Flugasche des Verbrenners über und gehen somit verloren [Gullet et al. 2007; Oakdene Hollins 2011].

Beim Be-Recycling wird 70 Prozent weniger Energie benötigt als für dessen Primärgewinnung [BeST 2014]. So konnte ein US-amerikanisches Unternehmen durch den Einsatz von recyceltem Beryllium zur Herstellung ihrer Produkte den Energiebedarf auf 20 Prozent des Ausgangsprozesses senken [Jaskula 2012].

## Germanium

Germaniumrecycling ist an den Prozess der Primärgewinnung angelehnt, sodass die primäre und sekundäre Verarbeitung zusammen erfolgt [Jorgenson 2006]. Die seltenen Vorkommen von Germanium, seine niedrigen Erzgehalte und aufwendige Herstellungsverfahren begünstigen die Voraussetzungen für Recycling. Erstens liegen die Ge-Konzentrationen in Produktionsrückständen aus den Anwendungsbereichen deutlich über den Konzentrationen in natürlichen Vorkommen, was sekundäre Gewinnungsverfahren fördert [Kammer 2009]. Zweitens liegen die zu erwartenden Kosten für das Recycling aufgrund der höheren Ge-Gehalte der Ausgangsstoffe deutlich unter denen der Primärgewinnung [Kammer 2009]. Da Ge aufgrund seines hohen Preises nur in sehr eingeschränkten Bereichen Anwendung findet, ist drittens die Recyclingquote für Produktionsschrotte – im Vergleich zum End-of-Life-Recycling – relativ hoch [Kammer 2009; UNEP 2009a]. Begünstigend kommt viertens hinzu, dass die Qualitäten zwischen Germanium aus Primär- und Sekundärproduktion auf gleichem Niveau liegen [Kammer 2009]. Zukünftig ist von einem vermehrten Abfallaufkommen aus der Photovoltaikindustrie auszugehen, wodurch die EoL-Recyclingrate ansteigen wird [USGS 2010a].

Für das Recycling eignen sich Materialien ab einem Germaniumgehalt von zwei Prozent, weshalb auch Filtermatten aus der Raumlufthereinigung von Glasfaserproduzenten geeignet sind [Kammer 2009]. Insbesondere im Bereich der Elektronik und Optik ist der Ge-Anteil jedoch so gering, dass ein Recycling der Endprodukte häufig nicht wirtschaftlich ist [Kammer 2009]. Der Grund hierfür ist, dass der Anteil konventioneller Metalle in diesen Produkten deutlich höher ist, sodass das Recycling häufig auf diese ausgerichtet ist, wodurch geringe Ge-Gehalte verloren gehen [Kammer 2009].

### ***Konventionelles Germaniumrecycling***

Beim Ge-Recycling wird zunächst Roh-Germanium-Tetrachlorid mittels Laugung hergestellt. Anschließend wird es mithilfe von Destillation gereinigt [Kammer 2009]. Infolge von Hydrolyse und der anschließenden Trocknung wird Germanium-Oxid gebildet. Durch Reduktion mit Wasserstoff entstehen hieraus Germanium-Barren [Kammer 2009]. Nach unterschiedlichen Verfahrensschritten, darunter Zonenschmelzen und Züchtung von Kristallen, erfolgt die mechanische Weiterverarbeitung zu Wafern oder optischen Halbzeugen [Kammer 2009].

### ***Germaniumgewinnung aus Flugasche aus Kohlekraftwerken***

Germanium kommt in unterschiedlichen Kohlearten vor und kann daher theoretisch aus Flugaschen von Kraftwerken rückgewonnen werden [Reisener und Schuler 1957; Kammer 2006b]. Zwar liegen die Konzentrationen in Kohlevorkommen in Deutschland relativ niedrig [Melcher und Buchholz 2014], jedoch werden auch Kohlearten in deutschen Kraftwerken verbrannt, die im Ausland

gewonnen wurden. Hierfür sind verschiedene Patente eingetragen, die auf unterschiedlichen Verfahren basieren: hydrometallurgische Ge-Extraktion [Guowen et al. 2012], Behandlung mit konzentrierter Schwefelsäure [Baraniei und Bohomaz 2008], oder Chlorierung. Das Patent von Burgos et al. 2005 basiert auf Extraktion von Flugaschen in Wasser, wodurch die Löslichkeit von Ge erhöht wird und so als feste Phase gewonnen wird [Burgos et al. 2005]. Bei Hydrometal SA umfasst der Ge-Rückgewinnungsprozess vier wesentliche Schritte: erneuter Aufschluss, Laugung, Reinigung und Zementation – wobei nach den zwei letzten Stufen eine Fest/Flüssig-Trennung erfolgt [Jorgenson 2006]. Das Potenzial von Ge-Rückgewinnung aus Flugasche von Kohlekraftwerken ist theoretisch immens. Momentan gilt dieses Verfahren meist als ökonomisch unrentabel [Jorgenson 2006], könnte jedoch in Zukunft eine zentrale Rolle spielen [Moskalyk 2004; Kammer 2006b].

#### ***Germanium-Recycling im Bereich Optik***

Obwohl rund ein Fünftel des Germaniums derzeit für den Telekommunikationssektor verwendet wird, befindet sich das Recycling auf niedrigem Niveau [Jorgenson 2006]. Im Jahr 1985 wurde ein Recyclingprozess entwickelt, um mit 95-prozentiger Effizienz Germanium von Abfallströmen aus der Produktion im Bereich Optik rückzugewinnen [Jorgenson 2006]. Bei dem Verfahren wird ein Ge-Filterkuchen mithilfe eines Gaswäschers und einem Vorgang zur Rückführung hergestellt. Anschließend erfolgt ein Niederschlags- und Filtrationsverfahren [Jorgenson 2006].

#### ***Germanium-Recycling aus Polyethylenterephthalat (PET)***

Die Ge-Nachfrage vonseiten Japans ist kürzlich angestiegen, bedingt durch den vermehrten Bedarf an PET-Trinkwasserflaschen nach dem Erdbeben und Tsunami Anfang 2011 [Guberman 2012]. Es findet kein Recycling von Abfällen statt, denn gerade beim Recycling von PET Flaschen spielt die Qualität des Recyclingprodukts eine große Rolle. Daher werden lediglich industrielle Produktionsabfälle intern recycelt, wodurch rund fünf Prozent des eingesetzten Germaniums gedeckt werden [Jorgenson 2006].

#### ***Germanium-Recycling durch Flüssig-Ionen-Austauschverfahren***

Jorgenson [2006] verweist auf einen Prozess des Unternehmens Met-Tech Systems Inc., durch den Metalle wie Germanium durch einen Flüssig-Ionen-Austausch rückgewonnen werden können [OCETA 1996 zitiert aus Jorgenson 2006]. Hierbei wird das Recyclingsubstrat zunächst verflüssigt und so umgewandelt, dass es an ein Extraktionsmittel angelagert werden kann. Anschließend können die Metalle selektiv an eine organische Phase gebunden werden und anschließend über Schwerkraft abgetrennt werden [Jorgenson 2006].

## Kobalt

Sogenanntes Post-Consumer-Recycling findet vor allem für Batterien, Legierungen und Katalysatoren statt [UNEP 2009a]. Daneben gibt es unterschiedliche Arten von Sekundärkobalt wie beispielsweise Superlegierungen, Legierungen, Katalysatoren, Magnete und Sinterhartmetalle, die dem Kobaltkreislauf rückgeführt werden können [Hawkins 2006]. Recycelter Kobaltschrott kommt vorrangig aufgrund seines relativ niedrigen Preises als Ersatz für andere, kostenintensivere Materiale in Legierungen zum Einsatz [Shedd 2004].

### ***Kobalt-Recycling aus verbrauchten Katalysatoren***

Insbesondere bei der Katalysatorherstellung werden – trotz hoher Verfahrenskosten – 90 Prozent des eingesetzten Kobalts wiederverwendet, was auf das hohe Preisniveau von Kobalt zurückzuführen ist [Hawkins 2006].

Die Gulf Chemical and Metallurgical Corporation verwendet pyrometallurgische und hydrometallurgische Verfahren zum Kobaltrecycling aus Katalysatoren [Wang 2006]. Im Wesentlichen werden Co/Mo- und Ni/Co/Mo/V-Katalysatoren im 14 MW-Elektrolichtbogenofen behandelt [Wang 2006]. Als Produkt erhält man eine metallische Legierung mit 35-55 Prozent Nickel- und 8-14 Prozent Kobaltanteil, das schließlich an Ni- und Co-Raffinerien verkauft wird [Wang 2006; GCMC 2013].

### ***Kobalt-Recycling aus Batterien und Akkumulatoren***

Im Bereich von Batterien und Akkumulatoren, fand Kobalt jüngst vermehrt Anwendung und ersetzte stetig NiCd- und NiMH-Batterien [Shedd 2004; Georgi-Maschler et al. 2012]. Co-Recycling aus Batterien basiert i.d.R. auf hydrometallurgischen oder pyrometallurgischen Verfahren, die teilweise auch miteinander kombiniert werden [Georgi-Maschler et al. 2012].

Umicore betreibt seit 2011 im belgischen Hoboken eine Recyclinganlage, bei der neben Seltenerdmetallen und Platinmetallen auch Kobalt rückgewonnen werden kann [Umicore 2014]. Die Anlage ist eine der innovativsten Co-Recyclinganlagen weltweit. Die Batterien werden zuvor in Hanau, Deutschland, zerlegt und mechanisch rückgebaut. Das recycelte Produkt wird anschließend in einer Anlage in Olen, Belgien, zu  $\text{LiCoO}_2$  weiterverarbeitet und anschließend nach China, Korea oder Japan weitertransportiert [Umicore 2014]. Dort werden Rohstoffe für die Kathodenherstellung produziert [Umicore 2014]. Die jährliche Kapazität beträgt 7 000 Tonnen Batterien, was rund 150 000 Elektroautobatterien und 250 Mio Handys entspricht [Umicore 2011]. Das Potenzial beträgt somit zwischen 950 und 1 575 Tonnen Co aus gewöhnlichen Mobiltelefonen sowie Smartphones (Berechnungen basierend auf [LANUV 2012]). Für Elektroautobatterien konnten keine geeigneten Zahlen ermittelt werden.

Ein anderes Verfahren wird von der Firma Toxco Inc. in Kanada zur Anwendung gebracht. Hierbei werden hydrometallurgische Verfahren verwendet um Lithium-Batterien aufzubereiten. Zunächst werden restliche Energieladungen der Abfallprodukte entfernt und diese anschließend in unterirdischen Betonbehältern gelagert. Falls notwendig, kommt hierbei ein patentiertes Verfahren zum Einsatz und die Akkus werden auf  $-200\text{ °C}$  heruntergekühlt, um Lithium in inertem Zustand zu erhalten, das bei Raumtemperatur explosive Eigenschaften zeigt. Anschließend werden die Akkus vorsichtig geshreddert, granuliert und gesiebt. Enthalten die Batterien Kobalt, wird dieses in Form von  $\text{LiCoO}_2$  rückgewonnen und anschließend als Elektrodenmaterial in Batterien wiederverwendet [Georgi-Maschler et al. 2012].

### ***Kobalt-Recycling aus industriellen Legierungen***

Beim End-of-Life-Recycling von Hartlegierungen oder Co-haltigen Industriewerkzeugen, kommen hydrometallurgische oder pyrometallurgische Verfahren zum Einsatz [Oakdene Hollins 2011]. Hierfür werden Legierungen in eine schmelzflüssiges Zinkbad gegeben, wodurch das Kobalt vom Wolframcarbidge trennt wird [Oakdene Hollins 2011]. Anschließend werden Kobalt und Zink durch Destillation voneinander getrennt [Gille und Meier 2012].

### ***Kobalt-Recycling aus Schmelzofenschlacke***

Zuletzt wurde die Gewinnung von Kobalt aus Zwischenprodukten (Schlacken) früherer Minenaktivität zunehmend bedeutender [Hawkins 2006]. Hierbei wird aus Schmelzofenschlacke in carbothermischen Reduktionsverfahren eine weiße Eisen/Kobalt/Kupfer-Legierung hergestellt, die anschließend zerstäubt und hydrometallurgisch weiter verarbeitet werden kann [Hawkins 2006]. Die weitere Verarbeitung erfolgt in der Kokkola-Anlage in Finnland [Hawkins 2006].

### ***Kobalt-Recycling aus Kupfererzen***

Daneben wird Kobalt auch aus Kupfererzen gewonnen. Zunächst werden Sulfide durch oxidierende Röstung in Sulfate umgewandelt. Anschließend erfolgt schwefelsaure Laugung mit sukzessiver Reinigung der ausgedickten Suspension [Hawkins 2006]. Schließlich werden die Kupferbestandteile durch Elektrolyse entfernt und Zink und restliches Kupfer abgeschieden [Hawkins 2006].

### ***Kobalt-Recycling mithilfe von Biomining***

Das sogenannte Biomining setzt biotechnologische Verfahren ein, um Erze im Bergbau aufzubereiten [DERA 2011b]. Als geeignete Ausgangsstoffe gelten industrielle Rückstände wie z.B. Flugaschen der Abfallverbrennung, Schlacken, Galvanikschlämme oder Elektronikschrott [DERA 2011b]. Für die Aufbereitung von festen und flüssigen Ausgangsstoffen kommen sowohl Mikroorganismen als auch Pilze infrage [DERA 2011b].

Während derzeit bereits ein Viertel des Kupfers auf diese Weise gewonnen wird [Hennebel et al. 2013], spielt Biolaugung bei der Kobaltgewinnung noch eine untergeordnete Rolle. Das Verfahren kommt bei Co lediglich dann zum Einsatz, sofern sich die konventionelle Aufbereitung als unwirtschaftlich erweist [DERA 2011b]. Gründe hierfür können niedrige Erzgehalte oder Entlegenheit der Produktionsstätte sein [DERA 2011b]. Daneben kann Biolaugung auch dafür eingesetzt werden, Kobalt aus Zwischenprodukten (Schlacken) früherer Bergbauaktivitäten zu gewinnen, die vormals als Abfallprodukt ein Entsorgungsproblem darstellten [Johnson 2013].

Kobaltrecycling mittels Biomining wird seit 1999 wirtschaftlich in einer Tankbiolaugungsanlage in Kasese, Uganda, betrieben, in der Pyritkonzentrate aus einer ehemaligen Kupfermine aufbereitet werden [Morin und D'Hugues 2010]. Das generelle Verfahren umfasst sieben wesentliche Schritte: (1) Gewinnung von Pyritkonzentrat durch hydraulisches Verfahren, (2) physikalische Trennung des Pyritkonzentrats und des Kalksteins, (3) Biolaugung, (4) Entfernung des Eisens, (5) Reinigung der Lösung und Flüssig/Flüssig-Extraktion, (6) Kobaltgewinnung im Elektrolyseverfahren und schließlich Aufbereitung und (7) Abwasseraufbereitung und Abfallbehandlung [Morin und D'Hugues 2010]. Hierdurch wird Kobalt mit einer Reinheit von 99,9 Prozent wiedergewonnen [Morin und D'Hugues 2010].

Daneben werden im Talvivaara-Projekt in Finnland durch Haufenlaugung eines polymetallischen Erzes mit niedrigen Erzgehalten – neben Nickel, Zink und Kupfer – auch 1 800 Tonnen Kobalt jährlich gewonnen [DERA 2011b; Talvivaara 2012].

Biomining gilt als umweltfreundliche und ökonomische Alternative zu konventionellen Verfahren. Dies liegt u. a. am niedrigen Energieverbrauch (im Vergleich zu Röst- und Schmelzverfahren), der Vermeidung von SO<sub>2</sub>-Bildung und an der Tatsache, dass auch Vorkommen mit geringeren Konzentrationen rentabel werden [Hennebel et al. 2013; Johnson 2013]. Nichtsdestotrotz ist das Verfahren deutlich zeitintensiver als herkömmliche Methoden [Hennebel et al. 2013]. In Zukunft könnten Anwendungen der Biolaugung zunehmend an Bedeutung gewinnen.

## Molybdän

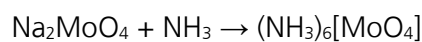
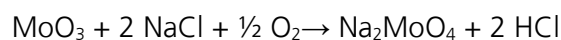
### ***Recycling von elementarem Molybdän aus Legierungen***

Informationen zum Molybdän-Recycling und den damit verbundenen Schwierigkeiten sind nur begrenzt vorhanden. Dies kann damit zusammenhängen, dass rund zwei Drittel des Molybdäns in der Stahlproduktion verwendet werden und infolge des Recyclings von Altstahl in den Stählen verbleiben [Gille und Meier 2012; Bertau et al. 2013].

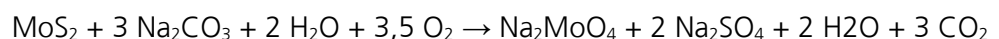
Beim Recycling von Molybdän aus Wolfram-Legierungen oder anderen Superlegierungsschrotten wird zunächst ein oxidatives pyrometallurgisches Röstverfahren durchgeführt [Mishra et al. 2012]. Ein geringer Teil wird direkt als elementares Molybdän aus Legierungen wiedergewonnen [Bertau et al. 2013].

### ***Recycling von Molybdän aus verbrauchten Katalysatoren***

Es finden sich zahlreiche Patente zum Mo-Recycling aus Altkatalysatoren (z.B. Chen et al. 2010; Wang et al. 2009a). Die gängigen Rückgewinnungsverfahren von Mo aus Molybdänoxid aus verbrauchten Katalysatoren basieren z. T. auf chlorierende Röstung und Laugung [Mishra et al. 2012]:



Alternativ ist auch die 84-prozentige Rückgewinnung von Mo aus Molybdänsulfid mittels hydrometallurgischer Verfahren möglich [Park et al. 2006; Mishra et al. 2012]. Hieraus lässt sich anschließend mithilfe eines Niederschlagsverfahren MoO<sub>3</sub> mit 97,3 prozentige Reinheit gewinnen [Kar et al. 2005; Park et al. 2006]:



Walsdorff et al. 2013 beschreiben ein Verfahren zur Behandlung des Katalysators mit einem wässrigen Auswaschmittel, wodurch 95 Prozent des enthaltenen Molybdäns abgetrennt werden können [Walsdorff et al. 2013].



## Platinmetalle

Das Recycling der Platinmetalle leistet bereits heute einen wichtigen Beitrag zur Deckung der Nachfrage [Wäger und Lang 2010]. Als Gründe hierfür gelten die hohen Preise und der damit verbundene finanzielle Anreiz zum Recycling, die aufwendige Primärgewinnung und vorhandene Recyclingtechnologien [Wäger und Lang 2010]. Zudem liegen die Konzentrationen in Schrotten meist über jenen in natürlichen Erzen [UNEP 2009a].

Im Bereich des industriellen Recyclings, wie beispielsweise Katalysatoren für die (Petro-)Chemie oder Anwendungen in der Glasindustrie, liegen die Recyclingquoten für Platin, Palladium und Rhodium heute bereits bei über 90 Prozent [Wäger und Lang 2010]. Die Wiederaufbereitung von privaten Konsumgütern wie Elektroaltgeräten und Autokatalysatoren gestaltet sich hingegen wesentlich schwieriger [Wäger und Lang 2010]. Hier wechseln Eigentümer häufig, die Produkte werden weltweit gehandelt und aufgrund der offenen Stoffkreisläufe, gehen Schätzungen zufolge 50 Prozent des Recyclingpotenzials verloren [Wäger und Lang 2010]. Ferner gibt es weltweit lediglich fünf Anlagen, die beispielsweise Ruthenium aus gemischtem Recycling-Input-Material rückgewinnen können: die Aurubis GmbH (ehemals Norddeutsche Affinerie AG, Deutschland), Boliden (Schweden/Finnland), Johnson Matthey (USA/Großbritannien), Hoboken/Umicore (Belgien) und The Dowa Group (Japan) [UNEP 2009a].

### ***Platinmetall-Recycling aus Auto-Abgaskatalysatoren und petrochemischen Katalysatoren***

Die Vorteile des Recyclings aus Auto-Abgaskatalysatoren liegen auf der Hand: Stabilisierung der Marktpreise, Sicherung eines nachhaltigen Angebotsflusses an Platinmetallen, Verringerung der Abhängigkeit von den Hauptförderländern Südafrika und Russland sowie ökologische Vorteile [Hagelüken und Kleinwächter 2006]. Ein Problem stellt hierbei der Export an gebrauchten Kraftfahrzeugen und Elektrogeräten in Schwellenländer, sodass darin gebundene Rohstoffe nicht mehr für das Recycling zur Verfügung stehen [Schütte et al. 2012].

PGM-Rückgewinnung aus Auto-Abgaskatalysatoren ist daher gut etabliert. Bevor die Edelmetalle abgeschieden werden, sind Vorbehandlungsmaßnahmen wie Entmanteln der Katalysatoren, mechanische Zerkleinerung und z. T. eine Voranreicherung notwendig [Hagelüken und Kleinwächter 2006]. Zunächst wird das Recyclingsubstrat gemahlen, vermischt und homogenisiert, ehe eine Probe im Labor analysiert wird, um optimale Ausbeuten zu erzielen. Nach einer Aufkonzentrierung in einem Hochofenverfahren kommen hydrometallurgische Prozesse zum Einsatz, wodurch ein PGM-Konzentrat entsteht, das wie im Primärprozess abgeschieden und raffiniert wird [Hagelüken und Kleinwächter 2006].

### ***Platinmetall-Recycling aus Elektroaltgeräten***

Die höchsten PGM-Konzentrationen in Elektronikschrott finden sich in Leiterplatten. Meist wird als Verfahren die chemische Laugung angewandt, wenngleich dies aufgrund der Komplexität der verbauten Elemente als ineffizient gilt und hierfür weitere Untersuchungen notwendig sind [Oakdene Hollins 2011; UNEP 2009c].

The Dowa Group kombiniert den Rückgewinnungsprozess mit Kupfer- und Bleischmelzen und erreicht so Recyclingquoten von rund 95 Prozent [OECD 2010a; Oakdene Hollins 2011]. Das Verfahren bei Umicore basiert auf einer Kombination aus Hüttenprozessen und Edelmetallscheidung [Hagelücken und Kleinwächter 2006].

### ***Biometallurgische Verfahren zur PGM-Sekundärgewinnung***

Ebenso wie bei Kobalt könnten auch bei den Platinmetallen biometallurgische Verfahren in Zukunft an Bedeutung gewinnen, wobei sich die meisten der Verfahren derzeit noch in der Entwicklungsphase befinden [Hennebel et al. 2013]. Biosorption mittels Mikroorganismen eignet sich ersten Untersuchungen zufolge u. a. für Ruthenium [Kwak et al. 2013]. Für einige Rohstoffe, darunter Palladium, liegen die Konzentrationen in Reststoffen oder Abwässern häufig über konventionellen Erzen [Hennebel et al. 2013]. So weisen beispielsweise Abwässer aus Krankenhäusern erhöhte Konzentrationen für Platin auf, die auf bestimmte medizinische Behandlungen zurückzuführen sind [Kümmerer 2001; Lenz et al. 2007].

## Seltenerdmetalle

Schätzungen zufolge werden derzeit weniger als 1 Prozent der Seltenerdmetalle recycelt [UNEP 2011]. Als Gründe hierfür gelten ineffiziente Sammlung, technologische Schwierigkeiten und mangelnde finanzielle Anreize [UNEP 2011; Graedel et al. 2011]. Dies führt dazu, dass bis heute keine maßgeblichen Aktivitäten über Post-Consumer-Recycling bekannt sind [Öko-Institut 2011]. Einen wichtigen Stellenwert nehmen hierbei die Elektronik- und Elektroaltgeräte ein, in denen SEM in großer Elementvielfalt und geringen Konzentrationen verbaut werden, was das Recycling erschwert [Binnemans et al. 2013]. Daher scheinen Recyclingfortschritte im industriellen Bereich momentan als am wahrscheinlichsten [Wäger und Lang 2010]. Trotz Exportbeschränkungen und Handelshemmnisse infolge der Rohstoffpolitik Chinas liegen die Preise für Primärprodukte immer noch auf einem zu niedrigen Niveau, sodass sich Recycling bislang als unwirtschaftliche Alternative herausstellt [Öko-Institut 2011]. Dies ist sowohl auf die komplexen Verfahrensschritte zurückzuführen, als auch den hohen Energiebedarf [Öko-Institut 2011].

Im Folgenden soll auf Recyclingmöglichkeiten von SEM-Bestandteilen in Konsumgütern eingegangen werden, die sowohl im industriellen Bereich als auch im Post-Consumer-Bereich eingesetzt werden können, nämlich Magnete, Batterien, Leuchtstoffröhren und andere Verfahren. Aufgrund der Vielzahl an neuen Forschungen kann lediglich auf eine Auswahl an Technologien eingegangen werden.

### ***Recycling von Seltenen Erden aus Magneten***

Im Bereich des Recyclings von Magneten – der wichtigsten Anwendung für Seltenerdmetalle – gibt es unterschiedliche Hemmnisse. Aufgrund möglicher Störungen der Flugzeugtechnik können viele Magnete beispielsweise nicht auf dem Luftweg transportiert werden und müssen zunächst entmagnetisiert werden [Oakdene Hollins 2010]. Eine Behandlung zum direkten Wiedergebrauch gilt zwar als energieeffizient und kommt mit geringem Chemikalieneinsatz aus, eignet sich derzeit jedoch nur für große Magneten (z.B. aus Windturbinen und großen Elektromotoren), die derzeit (noch) nicht in großen Mengen verfügbar sind [Öko-Institut 2011].

Obwohl rund 20 bis 30 Prozent der eingesetzten Seltenerdmetalle während der Herstellung von Magneten als Schleifstaub, Späne oder stückiger Metallschrott anfallen [Richter und Schermanz 2006; Zhong et al. 2010], wird Recycling industrieller Abfälle derzeit nicht betrieben [Shirayama und Okabe 2009]. Hierfür wären unterschiedliche Verfahren geeignet.

Hydrometallurgische Verfahren zum Magnetrecycling sind technisch aufwendig und erfordern neben einer Vielzahl an Produktionsschritten auch den Einsatz von Chemikalien, wodurch große Mengen an Abwasser anfallen [Öko-Institut 2011].

Pyrometallurgische Verfahren sind energieintensiv und können z. T. nicht bei oxidierten Magneten angewandt werden. Zudem fallen beim Elektroschlack-Umschmelzverfahren große Mengen an festen Abfallstoffen an [Öko-Institut 2011]. Da Seltene Erden häufig nur als Legierungen eingesetzt werden, fallen sie beim Schmelzverfahren als Oxide an und bleiben in der Schlacke gebunden zurück.

### ***Recycling von Seltenen Erden aus Batterien***

Ein Forschungsprojekt der Universität Erlangen, der Technischen Universität Clausthal, dem Öko-Institut Darmstadt sowie dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) unter Beteiligung von Experten aus Unternehmen untersucht Recyclingmöglichkeiten von Seltenerd magneten aus elektrischen Fahrzeugantrieben, insbesondere Neodym-Eisen-Bor-(NdFeB-)Magnete [Elwert und Goldmann 2013].

Für Blei- und NiCd-Batterien existieren bereits etablierte Recyclingmethoden, während sich für neuere Batterietypen wie Nickel-Metallhydrid(NiMH)- oder Lithium-Akkus die meisten Verfahren noch im Anfangsstadium ihrer Entwicklung befinden [Oakdene Hollins 2010].

Das bisher einzige großtechnische Aufbereitungsverfahren für aufladbare NiMH-Batterien entstand durch eine Kooperation des französischen Chemiekonzerns Rhodia und der belgischen Firma Umicore [Rhodia und Umicore 2011]. Zunächst werden die Akkus in einem Ofen in der belgischen Anlage in Hoboken zu einer FeNiCuCo-haltigen Schmelze und einer flüssigen seltenerdmetallhaltigen Schlacke eingeschmolzen. Hieraus gewinnt Rhodia in der Anlage im französischen La Rochelle Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium zurück [Luidold et al. 2013].

### ***Recycling von Seltenen Erden aus Leuchtstoffen***

Bei Leuchtstoffen gibt es zwei zentrale Herausforderungen: einerseits die große Bandbreite an Elementen, die für das Recycling einzeln abzutrennen sind und andererseits die Minimierung von Schadstoffen [Luidold et al. 2013]. Derzeit ist die Anlage in La Rochelle, Frankreich, die europaweit einzige, die in der Lage ist, Leuchtstoffpulver als SEO-Konzentrate aufzuarbeiten; eine weitere Anlage ist in Saint-Fons geplant [RM 2011; Elwert und Goldmann 2013]. Dennoch ist es auch hier aus verfahrenstechnischen und ökonomischen Gründen nicht möglich Seltenerdmetalle herzustellen, weshalb die Konzentrate zur weiteren Behandlung nach China verfrachtet werden, um im Anschluss wieder rückimportiert zu werden [Elwert 2013].

### ***Biosorption zur Sekundärgewinnung von Seltenerdmetallen***

Wie bei Kobalt und den Platinmetallen, eignen sich auch Seltenerdelemente für biometallurgische Verfahren, wie Biosorption [Hennebel et al. 2013]. Dies konnte bereits im Versuch für unterschiedliche Lanthanide, darunter Neodym [Okajima et al. 2010], Lanthan, Europium, Thulium und Ytterbium [Texier et al. 2002; Moriwaki und Yamamoto 2013] gezeigt werden.

### ***Recycling von Seltenen Erden aus Flachbildschirmen***

Ein relativ komplexes Recyclingverfahren, patentiert durch [Homma et al. 2010], beschreibt, wie Yttrium, Europium, Lanthan, Terbium, Gadolinium aus Flachbildschirmen mit geringem Energieaufwand rückgewonnen werden können. Der Prozess umfasst neben Zerkleinerung und Pulverisierung der Ausgangskomponenten eine Lösung in Flusssäure, aus der anschließend Elemente herausgefiltert oder mithilfe von Elektrolyse rückgewonnen werden [Homma et al. 2010].

## Tantal

Recycling im Konsumgüterbereich ist derzeit von geringem Stellenwert und findet lediglich bei tantalhaltigen Hartmetallen und Superlegierungen Anwendung [UNEP 2009a]. Insbesondere beim Ta-Recycling aus Kondensatoren oder Leiterplatten in Elektroaltgeräten herrschen Defizite vor. So gelangen laut Hochrechnungen einer Studie des bifa-Umweltinstituts jährlich mehr als drei Prozent der Weltjahresproduktion an Tantal in deutsche Mülltonnen [Nordsieck et al. 2013, zitiert aus Goldmann und Rasenak 2013]. Als Grund für die niedrigen Recyclingquoten gelten die niedrigen Tantal-Konzentrationen in den Konsumgütern. Da für den Einsatz von Kondensatoren eine hohe Verdünnung des Metalls notwendig ist, lohnt sich Recycling bislang wirtschaftlich nicht [Gille und Meier 2012]. Angesichts der Tatsache, dass 40 Prozent des Tantalbedarfs für Kondensatoren benötigt wird, wäre dies ein zentraler Ansatzpunkt für effizientere Rohstoffnutzung. Bislang werden bei der Kondensatorherstellung lediglich industriell produzierte Schrotte, wie Fehlchargen und Produktionsabfälle, dem internen Kreislauf für das Recycling zugeführt, indem sie an Pulver- und Ingothersteller rückgeführt werden [Gille und Meier 2012].

### ***Tantal-Recycling aus Kondensatoren***

Hierfür werden in der Regel zwei wichtige Verfahren angewandt. Beim ersten Verfahren wird zunächst auf unterschiedlichem Wege die Mangandioxid-Beschichtung entfernt [Nanjo und Satou 1989]. Anschließend werden unterschiedliche Verfahren wie beispielsweise Chlorierung oder die Elektronenstrahlmethode angewendet, um Tantal rückzugewinnen [Nanjo und Satou 1989]. Ein anderes Verfahren nutzt thermische Behandlung bei bis zu 550 °C in oxidierender Atmosphäre, um Tantal zu recyceln [Yumoto 2009]. Gerade die leichte Oxidierbarkeit Tantals birgt jedoch auch Herausforderungen, da es bei pyrometallurgischen Recyclingschritten leicht in Schlacken übergeht [Hagelüken 2008; UNEP 2009a].

Rückgewonnenes Tantal ist häufig durch Antimon oder Phosphor verunreinigt, wodurch die Wiederverwendung in Ta-Kondensatoren beeinträchtigt sein kann. Daher schlagen Matsuzaki et al. 2013 in ihrem patentierten Verfahren folgende Verfahrensweise vor: Zerkleinerung des Substrats mit anschließender Siebbehandlung, Magnettrennung und Schwerkrafttrennung mit folgender Säure- und anschließend einer Alkalibehandlung. Als Ausgangsmaterial für eine optimale Rückgewinnung werden gesinterte Tantal-Presskörper empfohlen, die aus Tantal-kondensatoren stammen [Matsuzaki et al. 2013].

### ***Tantal-Sekundärgewinnung aus Schlacken der Zinnverhüttung***

Tantal wird u. a. aus Schlacken der Zinnverhüttung gewonnen, was 2011 rund acht Prozent der Gesamtproduktion ausmachte [Bertau et al. 2013]. Zinnhaltige Kassiterit-Erze kommen häufig in Vergesellschaftung mit den Tantaliten und Columbiten vor. Aus den anfallenden Schlacken können mittels pyrometallurgischer Verfahren künstliche Tantal-Konzentrate hergestellt werden, die den natürlichen Erzkonzentraten beigemischt werden können [Gille und Meier 2012]. Der Anteil an Recycling aus Zinnblechen am gesamten Ta-Input ist seit den 1980er Jahren von 50 auf rund 10 Prozent gesunken, wofür insbesondere der Preisverfall für Zinn verantwortlich ist [Albrecht et al. 2000].

Als vielversprechendes Unternehmen für Tantal Recycling nennen Oakdene Hollins das Unternehmen Buss & Buss Spezialmetalle GmbH, die sich als eine von wenigen Firmen weltweit auf die Ta-Rückgewinnung aus Elektroaltgeräten oder anderen Abfällen, wie beispielsweise Folien, Anoden oder Metallstiften, spezialisierte [Oakdene Hollins 2011].

## Titan

Solange Titan in metallischer Form vorliegt, kann es relativ leicht recycelt werden [Wuppertal Institut 2011a].

### ***Titan-Recycling im Flugzeugbau***

Insbesondere in der Luftfahrtindustrie fallen große Mengen an Titanschrott bei der Herstellung von Flugzeugteilen an. Derzeit kommt deren Wiederverwendung aufgrund von Qualitätseinbußen oftmals nur als Ausgangsmaterial für weiße Wandfarbe oder als Zugabe in der Stahlschmelze infrage. Dem will die Effizienzoffensive »Return« der Leibniz Universität Hannover entgegenwirken und erforscht Möglichkeiten zum Wiedereinsatz von Titanspänen. Die Forschungs-offensive plant mithilfe neuer Kühlkonzepte während der Zerspanung, Maschinenkonzepten und Werkzeugtechnologien, die Späne in hoher Qualität dem Produktionskreislauf rückzuführen [RM 2013].

Einen anderen Lösungsansatz hierfür liefert der Feinguss-Spezialist Tital, der mithilfe eines Feingussverfahrens auch größere Titan-Gussteile herstellen kann. Dies verringert im Vergleich zum Fräsen und Zerspanen nicht nur Materialeinsatz, sondern erlaube direktes Wiedereinschmelzen von Produktionsabfällen und reduziere nach Firmenangaben hierdurch auch Kosten [RM 2009].

Industrieller Titanschrott im Flugzeugbau kann – sofern er sortenrein ist und nach Reinigung von anhaftendem Schneideöl und Hartmetallbruchstücken – direkt zu Abschmelzelektroden verpresst oder wieder eingeschmolzen werden (Cold Hearth-Technologie) [Sattelberger 2006].

Titan-Altschrott wird mittels Röntgenfluoreszenz untersucht, um die genaue Legierungszusammensetzung ermitteln zu können [Sattelberger 2006]. Hiervon abhängig ist auch die spätere Verwendung: unlegierter Titanschrott oder solcher mit starken Eisen-Verunreinigungen kann als Ferrotitan in der Stahlindustrie eingesetzt werden [Sattelberger 2006]. Sofern die Eisengehalte geringer sind, ist Titanschrott auch für die Herstellung von Titanvorlegierungen für Superlegierungen geeignet [Sattelberger 2006].

### ***TiO<sub>2</sub>-Recycling***

Geeignete Verfahren zur TiO<sub>2</sub>-Rückgewinnung sind in der Literatur nicht beschrieben und konnten auch durch die Patentrecherche nicht ermittelt werden.



## Wolfram

Das Recycling wolframhaltiger Schrotte ist aufgrund ökonomischer, ökologischer und technologischer Gründe seit mehreren Jahrzehnten etabliert [Lassner et al. 2000]. Die W-Konzentrationen in Schrotten liegen mit 30 bis 99 Prozent deutlich über denen der Erze, die zur Primärgewinnung verwendet werden; daher gilt Recycling als wirtschaftlich rentabel und Verfahren zur Konzentration des Ausgangsstoffes sind nicht vonnöten [Lassner et al. 2000].

W-haltige Schrotte werden in Weich- und Hartschrotte eingeteilt [Gille 2006]. Als ökologische Vorteile, die das Recycling begünstigen, gelten verringerter Energieaufwand, kein Chemikalieneinsatz zur Konzentration des W-Anteils und die verschärften Umweltauflagen bei der Primärgewinnung [Lassner et al. 2000].

Es sind zahlreiche Patente für unterschiedliche W-Recyclingverfahren angemeldet [EPA 2014]. Grundsätzlich wird zwischen direkten und indirekten Wiedergewinnungsverfahren unterschieden. Beim direkten Recycling wird Schrott von seiner festen Form in ein Pulver verarbeitet, das anschließend recycelt wird und direkt in den industriellen Prozess, bei dem es als Abfallprodukt angefallen ist, rückgeführt [Lassner et al. 2000]. In diesem Fall sind einheitliche Ausgangsmaterialien notwendig [Lassner et al. 2000].

### ***Wolfram-Hartmetall-Recycling im Zink-Prozess***

Das meistgenutzte Recyclingverfahren ist der Zink-Prozess für Hartmetall-Schrotte, der insbesondere für die direkte Wiedergewinnung im industriellen Bereich angewandt wird [Gille und Meier 2012].

Im Zink-Prozess wird zunächst sortenrein gesammelter Schrott mit Zink-Platten in abgedeckte Graphittiegel gegeben [Gille und Meier 2012]. Anschließend erfolgt die Erwärmung in N<sub>2</sub>/Ar-Atmosphären auf 800 bis 900 °C. Infolgedessen legiert das geschmolzene Zink mit dem Co-Bindemetall und bildet Zn-reiche intermetallische Phasen [Gille und Meier 2012]. Hierdurch wird das Hartmetall aufgebläht, aufgerissen und zerstört. Durch Unterdruck verdampft das Zink und durch Temperaturerhöhung auf 1.100 °C verdampft Zn erneut, kondensiert und kann so rückgewonnen werden [Gille und Meier 2012]. Hierdurch entstehen aus den Hartmetallteilen poröse, leicht zerstörbare Körper. Diese werden anschließend aufgemahlen, bis ein Pulvergemisch aus Wolframcarbid-, Kobalt- und anderen Carbideilchen entsteht [Gille und Meier 2012]. Das Recyclingprodukt eignet sich direkt zur Herstellung von Hartmetallen durch Pressen und Sintern [Gille und Meier 2012].

Zwei koreanische Patente basieren auf ähnlicher Vorgehensweise im elektrischen Lichtbogenofen und eignen sich dafür, um aus gesintertem Wolframcarbid gereinigtes WC-Pulver zu recyceln [Pee et al. 2011; Pee et al. 2012].

Als wesentlicher Nachteil des Zink-Prozesses gelten die erhöhten Verunreinigungen des Zn-Regenerats, die sowohl prozessbedingt sind, aber z. T. auch von Beschichtungen der Wendeschneidplatten stammen können [Gille und Meier 2012]. Hierdurch weisen die Hartmetallprodukte geringe Defizite auf, weshalb das Zn-Regenerat meist nur als Beimischung eingesetzt werden kann [Gille und Meier 2012].

### ***Chemisches Wolfram-Recycling und gemeinsame Weiterverarbeitung mit Primärerzen***

Beim indirekten Recycling werden Wolframabfälle chemisch umgewandelt, sodass Unreinheiten und andere Bestandteile abgetrennt und entfernt werden können. Meist wird hierfür W-Schrott direkt gesammelt und als Rücklaufmaterial in der pulvermetallurgischen Verarbeitung dem Recycling zugeführt [Gille 2006]. Nach einer Oxidation bei 700 bis 800 °C, werden die Sekundärmaterialien wie primäre Erzkonzentrate den normalen hydrometallurgischen Prozessen zugeführt [Gille 2006; Gille und Meier 2012]. Das weitere Verfahren wird durch das Recyclingmaterial nicht beeinträchtigt [Lassner et al. 2000]. Anschließend erfolgt die Umwandlung in das zentrale Zwischenprodukt Ammoniumparawolframat (APW) und die anschließende Weiterverarbeitung wie bei der Primärgewinnung [Lassner et al. 2000]. Die direkten und indirekten Recyclingverfahren werden teilweise miteinander kombiniert.

Der Vorteil vom chemischen Recycling gegenüber dem direkten Recycling ist die Qualität der Endprodukte, die mit zunehmenden Verfahrensschritten steigt [Gille und Meier 2012].

### ***Recycling von Wolframcarbid-Kobalt-Legierungen***

Im Bereich Hartmetall-Recycling finden sich zahlreiche patentierte Verfahren zum industriellen Recycling von Wolframcarbid-Kobalt-(WC-Co)-Legierungen. Das von Song et al. 2012 beschriebene Verfahren umfasst Oxidation, Kugelmahlen zum Mischen, Zufügen von Wolfram- oder Kobaltoxid, Aufkohlung, Zugabe eines Bindemittels, Pressen und Sintern [Song et al. 2012]. Ein ähnliches Verfahren schlägt Arumugavelu 2011 vor: Oxidation bei 400 bis 1 000 °C in einem Muffelofen, gefolgt von Zermahlen in einer Kugelmühle mit einer anschließenden carbothermischen Reduktion [Arumugavelu 2011]. Ronglin 2012 beschreibt ein Verfahren, um das Recyclingsubstrat vorab von Fe, Ni und Co zu reinigen [Ronglin 2012].

### ***Wolfram-Katalysator-Rückgewinnung***

Im chemischen Bereich gibt es unterschiedliche Methoden, um Wolfram-Katalysatoren rückzugewinnen: Wang et al. 2009b empfehlen, vereinfacht ausgedrückt, eine sukzessive Veränderung der pH-Werte, um Wolfram zu separieren [Wang et al. 2009b]. Ein koreanisches Patent schlägt folgendes Vorgehen vor: Eintauchen des W-Katalysators in eine oxidierte Säure, wodurch ein Sulfid und Dianion gebildet wird, das anschließend herausgelöst wird [KR 2012].