

Freie wissenschaftliche Arbeit im Fach Umweltmanagement
an der Technischen Universität Berlin

Recherche zur Rohstoffgruppe der Seltenen Erden

Mathias Lucht (326209)
Raphael Momsen (325266)
Klemens Niemann (323986)
16. April 2014

Fakultät III:
Institut für Technischen Umweltschutz
Fachgebiet Sustainable Engineering
Prof. Dr. Matthias Finkbeiner
Frau Dr. Elisabeth Strecker
Betreuung durch: Stefan Ebelt
Vorstandsvorsitzender ReUse-Computer e.V.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden verschiedene Aspekte zur Rohstoffgruppe der Seltenen Erden untersucht. Es wird ein Überblick zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen, dem Vorkommen und der Verwendung gegeben. Weiterhin wird aufgezeigt welche Rolle die Seltenerdmetalle für die Politik, die Wirtschaft, Unternehmen und verschiedene Organisationen haben. Entstehende Umweltbelastungen sowie deren Kosten führen immer wieder zu globalen Konflikten. Eine Ausweitung des Recyclingpotentials, sowie politische Rahmenbedingungen könnten diese Folgen eindämmen. Extreme Schwankungen auf der Preisebene sind lediglich durch Eigeninteressen zu begründen, welche ferner internationalen Klärungsbedarf haben. Darüber hinaus wird in der Öffentlichkeit von einer Seltenheit gesprochen die in Wahrheit nicht existiert.

Abstract

In this thesis, several aspects of the rare earths elements are investigated. It provides an overview of the scientific background, the occurrence and use. Furthermore, the role of rare earth metals for politics, the economy, businesses and various organizations is shown. Emerging environmental impacts and their costs often lead to global conflicts. An expansion of the recycling potential, and political conditions could reduce these consequences. Extreme fluctuations in the price level are only justified by self-interests, which need to be clarified in a context of international relations. The rarity, which is discussed in public, does not really exist.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Gruppe Seltenerdmetalle	2
2.1.1	Physikalische und chemische Grundlagen	2
2.1.2	Vorkommen	4
2.1.3	Produktion	6
2.1.4	Verwendung	9
2.2	Einzelne Seltenerdmetalle	11
2.2.1	Lanthan	11
2.2.2	Cer	11
2.2.3	Neodym	12
2.2.4	Yttrium	13
3	Untersuchung	14
3.1	Akteure	14
3.1.1	Volksrepublik China	14
3.1.2	Bundesrepublik Deutschland	21
3.2	Umweltbelastungen durch den Abbau	24
3.3	Preisentwicklung	25
3.4	Recycling	27
4	Diskussion	29
5	Fazit	31

Tabellenverzeichnis

2.1	Drei Minerale, die Seltenerdoxide enthalten im Überblick. Alle Prozentangaben sind Richtwerte [5, 306f.], [8] und [9].	4
3.1	Verwendungsverteilung der Seltenen Erden in Deutschland im Jahr 2011. Alle Daten übernommen aus [35].	22

Abbildungsverzeichnis

2.1	Periodensystem der Elemente. Metalle der seltenen Erden sind rot gekennzeichnet.[2]	2
2.2	Periodensystem der Elemente, in dem alle Seltenerdmetalle hervorgehoben sind. Metalle die zu den schweren Seltenen Erden (HREE) zählen sind blau eingefärbt. Metalle, die als leichte Seltene Erden (LREE) kategorisiert werden, sind gelb gefärbt [12].	6
2.3	Weltkarte mit Ressourcen und Produktion von Seltenen Erden ausgewählter Staaten im Jahr 2010[15].	7
2.4	Weltgesamtproduktion von Seltenen Erden im Zeitraum 1950 bis 2012. Anteile der Volksrepublik China (rot) und der USA (blau) sind hervorgehoben [16].	8
2.5	Verwendungsbereiche der Seltenen Erden. Aufschlüsselung nach einzelnen Seltenen Erden. [18].	10
3.1	Karte der Volksrepublik China. Provinzen in denen der Abbau von Seltenen Erden von Bedeutung ist, sind farblich hervorgehoben. Größtes Abbaugbiet ist Bayan-Obo in der Inneren Mongolei [25]	15
3.2	In dieser Tabelle werden drei Abbaugbiete in China nach den Kriterien Jahresproduktion, Mineralvorkommen und Anteil an chinesischer Gesamtproduktion an Seltenen Erden für das Jahr 2008 verglichen. Dazu ist der zusammengefasste Rest (Andere) und der Gesamtbetrag verzeichnet. Ionen-adsorbierende Tone werden besonders in den südlichen Provinzen abgebaut [26, S.8]	15
3.3	Im Kreisdiagramm sind für das Jahr 2011 die Exportziele und deren Anteil am gesamten Exportvolumen von Seltenen Erden aus China zusammengefasst [25]	17

3.4	Chinas Jahresproduktionen an Seltenen Erden im Zeitraum 2006 bis 2011. In der ersten Zeile sind offizielle Zahlen des chinesischen Rohstoffministeriums. in der zweiten Zeile befinden sich Angaben des U.S. Geological Survey. Die Differenz ergibt sich zu großem Teil aus der Produktion illegaler Minen [27, S.19].	18
3.5	Exportquoten für Seltenerdoxide in der Volksrepublik China von 2005 bis 2012. Domestic steht für die Eigenproduktion chinesischer Betriebe. Mit Joint Venture sind Mischkonzerne aus chinesischer und nicht-chinesischer Beteiligung gemeint [25]	18
3.6	Preise für verschiedene Seltenerdoxide im chinesischen und nicht-chinesischen Markt. In der letzten Spalte ist die prozentuale Differenz aufgeführt [25]	19
3.7	Preisentwicklung von Neodymoxid von 01.2001-04.2014 [46] .	26
3.8	Preisentwicklung für Neodymoxid von 04.2013-04.2014 [46] . .	26

1 Einleitung

In den letzten Jahren wird in den Medien immer häufiger von den Seltenen Erden gesprochen. Diese besitzen spezielle physikalische und chemische Eigenschaften und sind mittlerweile in vielen Hochtechnologien unentbehrlich. Computerchips, Windkraftanlagen oder Assistenzsysteme im Auto wären ohne sie nicht denkbar [1]. Das weltweite Interesse für diese Rohstoffe wächst kontinuierlich, wodurch verschiedenste globale Probleme auftreten.

Gegenstand dieser Arbeit ist eine Recherche zu den Rohstoffstrategien der Seltenerdmetalle. Dafür zeigen die drei Autoren ein aktuelles Bild der verschiedensten Themengebiete auf. Zunächst werden naturwissenschaftliche Grundlagen erläutert und ein Überblick über das Vorkommen, die Produktion und die Verwendung dargestellt. Anschließend folgt eine Untersuchung der verschiedenen Akteure die mit den Seltenerdmetallen in Berührung kommen. Es werden vereinzelt tiefere Einblicke in die Politik, die Wirtschaft, die Unternehmen und Organisationen beschrieben. Weiterhin werden die Auswirkungen auf die Umwelt, vermutliche Alternativen und eine mögliche Wiederverwendung behandelt. In einer anschließenden Diskussion werden die Schwierigkeiten und mögliche Lösungsansätze für ein wirtschaftlich umweltfreundliches Kreislaufsystem verdeutlicht. Ebenfalls wird geklärt wie ausgeprägt die internationale Abhängigkeit mittlerweile geworden ist und ob Seltenerdmetalle wirklich „selten“ sind.

Die Bezeichnung Erden, die für Oxide steht, wird verwendet, da die Metalle dieser Gruppe in der Natur lediglich als Oxide vorkommen. Die Umschreibung als selten bezieht sich auf die geringe Anzahl abbauwürdiger Vorkommen, also konzentrierter Ansammlungen in der Erdkruste. Einige der Seltenerdmetalle sind jedoch durchaus in großer Menge vorhanden. Das häufigste Seltenerdmetall ist Cer, das mit 60 parts per million das 25- häufigste Element in der Erdkruste ausmacht [3]. Damit ist Cer z.B. häufiger als Blei (18 parts per million) oder Gold (0,004 parts per million) in der Erdkruste vorhanden [4].

Für die Seltenerdmetalle und insbesondere für die Lanthanoide gilt, dass sie alle ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Bei den Lanthanoiden steigt mit zunehmender Ordnungszahl nicht die Anzahl der Valenzelektronen. Es werden nicht die außenliegenden 5d-Orbitale mit Elektronen aufgefüllt, sondern die auf einem niedrigeren Energieniveau liegenden 4f-Orbitale. Die Auffüllung innerer Orbitale ist verantwortlich für die magnetischen Eigenschaften der Lanthanoide. Außerdem führt dies zu der übereinstimmenden Anzahl von Valenzelektronen, die wiederum ähnliche chemische Eigenschaften hervorrufen. Die magnetischen Eigenschaften der Lanthanoide erfordern weitere Bemerkungen. So weisen viele Lanthanoide hohe magnetische Momente auf. Dabei erreichen Neodym und Praseodym die maximalen relativen magnetischen Momente. Dysprosium und Holmium erzielen dagegen die höchsten absoluten magnetischen Momente[5, S.303ff.]. Durch ihre negativen Standardpotentiale, also die hohe Bereitschaft Elektronen abzugeben, eignen sich alle Seltenerdmetalle als Reduktionsmittel. Für alle Seltenerdmetalle gilt deshalb auch, dass sie unedel sind, also sehr reaktiv in sauerstoff- und wasserhaltigem Milieu. Daher kommen sie nicht rein als Metalle auf der Erde vor, sondern als Oxide. Die Oxide der Seltenerdmetalle (Seltenerdoxide) kommen, bedingt durch ihre ähnlichen Eigenschaften stets vergesellschaftet vor. Diese Vergesellschaftungen verschiedener Oxide der Seltenerdmetalle und anderer Metalloxide bilden diverse natürlich auftretende Mineralien aus. Für die industrielle Nutzung liegen bisher insbesondere Monazit und Bastnäsit im Mittelpunkt. Doch auch Mineralien wie Allanite, Xenotime und Ionen-absorbierende Tone, sowie über 200 weitere Mineralien enthalten Anteile von Seltenerdmetallen [6, S.2-3]. In Mineralien, die Seltenerdmetalle enthalten, kann durch Substitution radioaktives Thorium oder auch Uran eingebaut sein. Dieser radioaktive Bestandteil kann je nach Mineralvorkommen unterschiedliche Ausprägungen annehmen. Als besonders belastet mit Thorium hat sich jedoch Monazit herausgestellt [7].

2.1.2 Vorkommen

Die Seltenerdoxide kommen überall in der Erdkruste vor. Die konzentrierten Vorkommen, die eine Gewinnung durch den Menschen möglich machen sind dagegen tatsächlich selten. Besonders die Mineralien Monazit und Bastnäsit sind aufgrund ihrer hohen Anteile an Seltenerdoxiden, sowie aufgrund von bekannten Vorkommen für den Abbau interessant. In Tabelle 2.1 sind für die beiden Mineralien, sowie für Xenotime Kenndaten in Bezug auf seltene Erden angegeben.

Tab. 2.1: Drei Minerale, die Seltenerdoxide enthalten im Überblick. Alle Prozentangaben sind Richtwerte [5, 306f.], [8] und [9].

Mineral	Anteil Seltenerdoxide am Mineral	Anteil jeweiliger Seltenerdmetalle	bekannte Lagerstätten
Bastnäsit	ca. 55-60%	Cer (ca. 50%) Lanthan (ca. 33%) Neodym (ca. 12%) Praseodym (ca. 4%)	China USA GUS-Staaten
Monazit	ca. 30-35%	Cer (ca. 40%) Lanthan (ca. 20%) Neodym (ca. 16%) Praseodym (ca. 5%)	Australien Brasilien China Indien USA
Xenotim	ca. 55-60%	Yttrium (ca. 60%) Dysprosium (ca. 9%) Ytterbium (ca. 6%) Erbium (ca. 5%)	China USA Brasilien

Der Anteil von Seltenerdoxiden an dem jeweiligen Mineral kann von Lagerstätte zu Lagerstätte variieren, da anstelle der Seltenerdoxide auch andere Oxide (z.B. vom radioaktiven Thorium) vorkommen können. Die Güte einer Lagerstätte wird außerdem von der Konzentration der Mineralien im Vorkommen bestimmt. So kann Bastnäsit zwar einen durchschnittlichen Anteil von Seltenerdoxiden von 50% bis 60% erreichen. Eine hochwertige Lagerstätte wie z.B. Mount Weld in Australien kommt letztendlich aber nur auf einen Anteil von 16% bis 23% Seltenerdoxide auf 1 Millionen Tonnen Ressource [5, 309]. In der dritten Spalte sind die für das jeweilige Mineral typischerweise häufigsten Seltenerdmetalle angegeben. Die Prozentangaben beziehen sich dabei auf den Gesamtanteil an Seltenerdmetallen in dem jewei-

ligen Mineral. Auch bei diesen Werten gilt, dass sie lediglich Richtwerte sind und von Vorkommen zu Vorkommen abweichen können.

Neben den genannten hauptsächlichen Seltenerdmetallen können in den Mineralien immer kleinere Mengen aller anderen, nicht genannten Seltenerdmetalle vorkommen. Es ist also nicht möglich Vorkommen reiner Seltenerdmetalle zu finden und abzubauen. Falls ein bestimmtes Metall der Seltenen Erden abgebaut werden soll, fallen demnach zwangsläufig andere als Nebenprodukt mit an.

Auffällig ist, dass Monazit und Bastnäsit ähnliche Zusammensetzungen haben. Ein wichtiger Unterschied ist, dass beim Monazit der gesamte Anteil an Seltenerdoxiden wesentlich geringer ist, was unter anderem an höheren Thorium- und Urananteilen liegt. Diese Differenz führte dazu, dass Bastnäsit als Quelle für seltene Erden bedeutender ist als Monazit.

Xenotim ist ein Mineral, das ebenso wie Bastnäsit eine hohe Konzentration von Seltenerdoxiden vorweist. Jedoch liegt hier eine grundlegend andere Zusammensetzung vor. Yttrium ist anstatt von Cer oder Lanthan der Hauptbestandteil von Xenotim. Ionen-absorbierende Tone die nicht in Tabelle 2.1 aufgeführt werden, haben eine ähnliche Zusammensetzung wie Xenotime mit dem Hauptanteil Yttrium [5, S.307]

In der Literatur wird häufig zwischen leichten (LREE: light rare-earth elements) und schweren (HREE: heavy rare-earth elements) Seltenen Erden unterschieden. In deutschen Publikationen werden auch die Bezeichnungen Ceriterden für LREE und Yttererden für HREE verwendet [10, S.764]. Die deutschen Namen deuten bereits auf prominente Seltenerdmetalle in den jeweiligen Gruppen. Welche Elemente zu welcher Kategorie gezählt werden, ist in Abbildung 2.2 verzeichnet. Während die LREE vor allem in den Mineralien Monazit und Bastnäsit vorkommen sind HREE häufiger in Xenotim und Ionen-absorbierende Tonen eingebunden. Allgemein gilt das HREE seltener sind. Daher ist die Herstellung in Reinform als Seltenerdoxid oder Seltenerdmetall bei HREE aufwändiger als bei LREE. Anteilig an der globalen Gesamtproduktion an Seltenen Erden nehmen LREE circa 75% ein [11, S.7].

Abbauwürdige Vorkommen an seltenerdhaltigen Mineralien sind in vielen Staaten vorzufinden. In Abbildung 2.3 sind Ressourcen und Produktion von Seltenerdoxiden in verschiedenen Bereichen der Welt vom Stand 2010 dargestellt. Wie im mittleren Kreisdiagramm zu sehen ist, liegen ungefähr die Hälfte der bekannten Ressourcen abbauwürdiger Vorkommen der Seltenerdoxide in der Volksrepublik China. Weitere größere Lagerstätten, die mit 17% angegeben werden, befinden sich in den Staaten der ehemaligen Sowjetunion (im Diagramm mit Russland bezeichnet) und hier besonders in Russland und

1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.003																									
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218	<div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> <div style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 5px;">REE</div> <div style="background-color: yellow; padding: 5px;">LREE</div> <div style="background-color: blue; padding: 5px;">HREE</div> </div>														5 B Bor 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Stickstoff 14.00642	8 O Sauerstoff 15.9994	9 F Fluor 18.998403	10 Ne Neon 20.1797																					
11 Na Natrium 22.989769	12 Mg Magnesium 24.304															13 Al Aluminium 26.981538	14 Si Silizium 28.0855	15 P Phosphor 30.973761	16 S Schwefel 32.065	17 Cl Chlor 35.453	18 Ar Argon 39.948																					
19 K Kalium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titan 47.887	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chrom 51.9961	25 Mn Mangan 54.938044	26 Fe Eisen 55.845	27 Co Cobalt 58.933194	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Kupfer 63.546	30 Zn Zink 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsen 74.9216	34 Se Selen 78.96	35 Br Brom 79.904	36 Kr Krypton 83.80																									
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirkon 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdän 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rheinium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silber 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Zinn 118.710	51 Sb Antimon 121.760	52 Te Tellur 127.60	53 I Jod 126.90447	54 Xe Xenon 131.29																									
55 Cs Cäsium 132.90545	56 Ba Baryum 137.327	57 La Lanthan 138.90547	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodym 140.90766	60 Nd Neodym 144.24	61 Pm Promethium 144.9127	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93402	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.967	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Wolfram 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platin 195.078	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Quecksilber 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Blei 207.2	83 Bi Bismut 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astatin (210)	86 Rn Radon (222)											
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)	119 Uu Ununennium (295)	120 Uub Unbibium (296)	121 Uut Untrium (297)	122 Uuq Unquadrium (298)	123 Uuq Unquadrium (299)	124 Uup Unpentium (300)	125 Uuq Unquadrium (301)	126 Uuq Unquadrium (302)	127 Uuq Unquadrium (303)	128 Uuq Unquadrium (304)	129 Uuq Unquadrium (305)	130 Uuq Unquadrium (306)	131 Uuq Unquadrium (307)	132 Uuq Unquadrium (308)											
90 Th Thorium 232.0377	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (289)	118 Og Oganesson (294)	119 Uu Ununennium (295)	120 Uub Unbibium (296)	121 Uut Untrium (297)	122 Uuq Unquadrium (298)	123 Uuq Unquadrium (299)	124 Uup Unpentium (300)	125 Uuq Unquadrium (301)	126 Uuq Unquadrium (302)	127 Uuq Unquadrium (303)	128 Uuq Unquadrium (304)	129 Uuq Unquadrium (305)	130 Uuq Unquadrium (306)	131 Uuq Unquadrium (307)	132 Uuq Unquadrium (308)

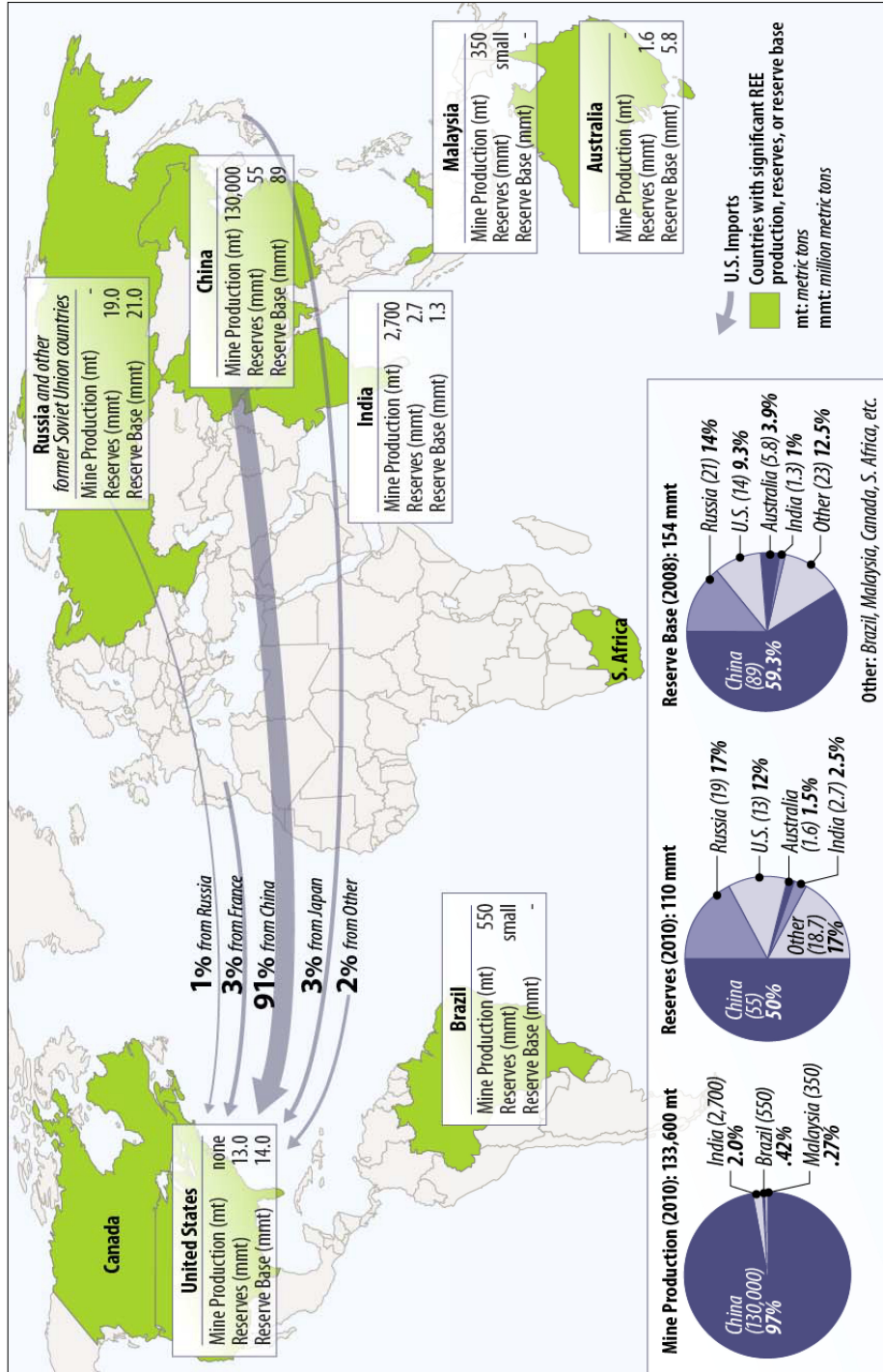
Abb. 2.2: Periodensystem der Elemente, in dem alle Seltenerdmetalle hervorgehoben sind. Metalle die zu den schweren Seltenen Erden (HREE) zählen sind blau eingefärbt. Metalle, die als leichte Seltene Erden (LREE) kategorisiert werden, sind gelb gefärbt [12].

Kasachstan. An dritter Stelle mit 12% der weltweiten Ressourcen liegt das Staatsgebiet der USA. Außerdem gibt es vergleichsweise kleinere Vorkommen in Australien, Indien, Grönland, Kanada, Malaysia, Madagaskar, Südafrika, Thailand und Sri Lanka.

In der BRD gibt es nur ein bekanntes Vorkommen im sächsischen Storkwitz. Die Ressourcen bei Storkwitz werden auf zwischen 20100 Tonnen [13] und 37680 Tonnen [14] geschätzt. Damit erreichen diese ungefähr 20% bis 40% der chinesischen Jahresproduktion von 2013. Auf die genauere Verteilungen bei der Produktion von Seltenen Erden wird im nächsten Kapitel eingegangen.

2.1.3 Produktion

Die weltweite Produktion der Seltenen Erden durchlief seit 1950 grundlegende quantitative und qualitative Wandlungen. In der Abbildung 2.4 sind diese in Grundzügen zu erkennen. In dem Diagramm ist die globale Jahresproduktion an allen Seltenen Erden in Tonnen pro Jahr über den Zeitraum 1950 bis 2012 aufgetragen. Die zeitliche Entwicklung kann dabei in drei Phasen unterteilt werden. Die erste Phase bis etwa 1965 ist durch Jahresproduktionen unter 10000 Tonnen geprägt. In dieser Phase beschränkte sich der Abbau



Source: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2008-2011. (Figure created by CRS.)

Abb. 2.3: Weltkarte mit Reserven und Produktion von Seltenen Erden ausgewählter Staaten im Jahr 2010[15].

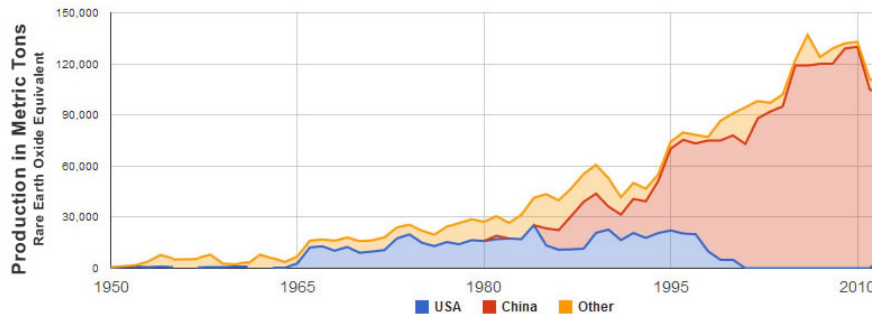


Abb. 2.4: Weltgesamtproduktion von Seltenen Erden im Zeitraum 1950 bis 2012. Anteile der Volksrepublik China (rot) und der USA (blau) sind hervorgehoben [16].

größtenteils auf das Mineral Monazit. Die Hauptlieferanten von Selten Erden produzierten in Indien, Brasilien und Südafrika [16].

Mit der Produktionsaufnahme der Mountain Pass Mine in Kalifornien, USA wurde das Produktionsvolumen deutlich erhöht. Außerdem wurde das Ende der Monazit-Ära eingeläutet. Ab dieser Phase wurde das Mineral Bastnäsit zum Hauptlieferanten für Seltene Erden. Im Diagramm ist ersichtlich, wie die USA in dem Zeitraum 1965 bis 1997 eine näherungsweise konstante Jahresproduktion an Seltenen Erden aufwies. Dieser Anteil ist ausschließlich auf die Produktion der Mountain Pass Mine zurückzuführen, deren Abbaubetrieb im Jahr 2002 vollständig eingestellt wurde [17]. Grund für das Ende der Produktion in der Mountain Pass Mine war nicht etwa die Verringerung der Nachfrage, sondern das Auftreten kostengünstigerer Produzenten aus der Volksrepublik China.

Das Aufstreben der chinesischen Produktion von Seltenen Erden bis hin zur chinesischen Monopolstellung charakterisieren die dritte Phase, die ab ungefähr 1995 beginnt. Neben günstigeren Lohn- und Energiekosten führen vor allem die niedrigen Umweltauflagen in der Volksrepublik zu geringeren Kosten der Produktion als beispielsweise in der Mountain Pass Mine in den USA. In der Abbildung 2.3 sind die nationalen Anteile an der globalen Gesamtproduktion von Seltenen Erden im Jahr 2010 im linken Kreisdiagramm dargestellt. Dabei wird die Monopolstellung Chinas deutlich, das mit ca. 130000 Tonnen 97% der globalen Gesamtproduktion stellt. Nennbarer weiterer Abbau erfolgt in Indien mit 2700 Tonnen (2%) und in Brasilien mit 550 Tonnen (0,42%).

In den Jahren seit 2010 scheint sich ein neuer Umbruch in der Marktstruktur

anzudeuten, da sowohl in Australien (Eröffnung der Mount Weld Mine) als auch in den Vereinigten Staaten von Amerika (Wiedereröffnung der Mountain Pass Mine 2012) die Produktionskapazitäten gesteigert werden [16].

Die Entwicklung der Produktion von Seltenen Erden verlief also qualitativ (Wechsel von Monazit zu Bastnäsit, Wechsel der Abbauggebiete) und quantitativ (Produktionssteigerung).

Die Seltenen Erden werden in zwei Formen hergestellt und gehandelt. Produktform sind entweder Oxide (Seltenerdoxide) oder einzelne Seltenerdmetalle. Die Weltproduktion aller Seltenen Erden teilt sich ungefähr zu 25% in einzelne Seltenerdmetalle und zu 75% in Oxide, also Seltene Erden, die weiterverwendet werden [5, S.307ff.]. Die Seltenerdoxide werden wiederum als Mischungen mehrerer Oxide oder rein nach Element getrennt angeboten. Der Weg von dem Abbau in einer Mine bis zum reinen, gehandelten Seltenerdoxid oder Seltenerdmetall ist energie- und kostenintensiv. Nach der Förderung des Erzes beginnt die Mechanische Zerkleinerung desselbigen. Aufschlussverfahren, bei denen konzentrierte Schwefelsäure und Natronlauge zum Einsatz kommen führen zur Trennung der Seltenerdoxide von anderen Bestandteilen des Erzkörpers [10, S.765]. Die Trennung der Seltenerdoxide untereinander kann durch verschiedene Prozesse erfolgen. Bekannte Verfahren sind Ionentauscher und Flüssig-flüssig-Extraktion [6, S.4-1]. Abbaumethoden, Aufbereitungsschritte und Abfallmengen können je nach Art und Konzentration des Vorkommens variieren [6, S.3-3]. In Kapitel 3.2 wird die Thematik des Abbaus und eventueller Folgen für die Umwelt weiter aufgegriffen.

2.1.4 Verwendung

Die Einsatzgebiete von Seltenen Erden in der Industrie haben sich in den letzten Jahrzehnten stetig erweitert.

Traditionelles Anwendungsgebiet für Seltenerdoxide ist dabei u.a. Mischmetall. Mischmetall besteht aus mehreren Seltenerdoxiden, wobei Ceroxid den größten Anteil ausmacht. Die genaue Zusammensetzung kann variieren und hängt von dem Ausgangsmineral ab. Für die Anwendung als Mischmetall ist eine vorherige Auftrennung in die verschiedenen Seltenerdoxide nicht notwendig. In der Stahlindustrie dient es als metallurgisches Additiv oder als Legierungsbestandteil um bestimmte Eigenschaften des Stahls wie z.B. den Schmelzpunkt zu verändern [5, S.311].

Viele andere Anwendungsbereiche benötigen reine Seltenerdmetalle oder reine Seltenerdoxide als Werkstoff. So zum Beispiel der Neodym-Eisen-Bor-Magnet, der als Permamagnet in vielen elektronischen Produkten notwendig ist.

Die industriellen Bereiche in denen Seltene Erden eingesetzt werden sind

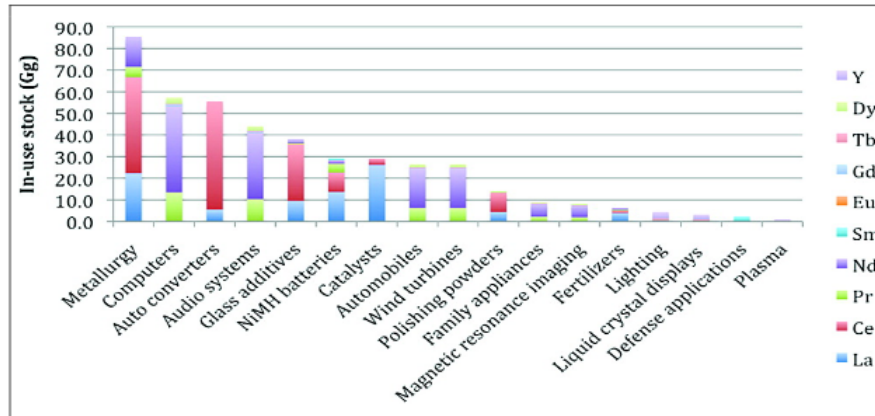


Abb. 2.5: Verwendungsbereiche der Seltenen Erden. Aufschlüsselung nach einzelnen Seltenen Erden. [18].

mannigfaltig. Abbildung 2.5 bietet einen Überblick über diese. Dabei wird der quantitative Verbrauch verschiedener Branchen offenbar. Außerdem ist nach Anteilen einzelner Seltenerdmetallen aufgeschlüsselt. Allgemein gilt, dass die Genauigkeit solcher Darstellung zweifelhaft ist, da keine belastbaren Daten zu dem Handel und zum Verbrauch an Seltenen Erden zugänglich sind.

Große Abnehmer der Seltenen Erden finden sich in den Wirtschaftszweigen Metallurgie (u.a. Mischmetall), Elektronikindustrie (u.a. Magnete in Computern und Audio-Systemen), Petrochemische Industrie (Katalysatoren), Automobilindustrie (u.a. Fahrzeugkatalysatoren und Hybrid-Autos), Glassverarbeitung (u.a. Spezialgläser und Poliermittel) und Windenergiewirtschaft (Magnete für Synchrongeneratoren). Neben diesen Feldern finden Seltene Erden auch Verwendung in Bereichen wie der Agrarindustrie (Tierfutterzusatz), der Medizintechnik (u.a. Magnetresonanz), bei Leuchtmittelherstellern (u.a. Energiesparlampen) und in der Rüstungsindustrie.

Abbildung 2.5 zeigt, wie vor allem Neodym und Praseodym für die Elektroindustrie, die Windenergieanlagen und Autoindustrie (Hybrid-Autos) von großer Bedeutung sind. Dieser Zustand besteht, da in diesen Bereichen die permanentmagnetischen Eigenschaften dieser Elemente von hoher Bedeutung sind.

Cer und Lanthan werden vornehmlich in der (petro)chemischen Industrie in der Automobilindustrie und der Glassverarbeitung eingesetzt. Die schwere Seltene Erde Yttrium wird bei der Leuchtstoffherstellung und der Fertigung

von LC-Displays nachgefragt.

Auf einige einzelne Anwendungen wird im Kapitel 2.2 eingegangen. Erwähnt sei an dieser Stelle noch, dass viele Zukunftstechnologien die spezielle Seltenerdmetalle benötigen derzeit in Entwicklung, Testphasen oder Markteinführungsphasen existieren [5, S.11ff.]. Die Nachfrage nach Seltenen Erden und speziell nach bestimmten Seltenerdmetallen kann demnach sprunghafte Veränderungen erleben bzw. sich verlagern. Je nachdem, welche Technologien sich in der Zukunft durchsetzen, könnten unterschiedliche Seltenerdmetalle an Bedeutung gewinnen.

2.2 Einzelne Seltenerdmetalle

Im Folgenden werden die vier Seltenerdelemente genauer vorgestellt, die derzeit auch als einzelne Oxide oder Metalle größere wirtschaftliche Verwendung finden. Diese sind Lanthan, Cer, Neodym und Yttrium.

2.2.1 Lanthan

Das Metall Lanthan hat die Ordnungszahl 57. Mit den 14 nachfolgenden Elementen bildet Lanthan die Gruppe der Lanthanoide. Lanthan zählt zu den leichten Seltenerdelementen (LREE) und die Gewinnung erfolgt größtenteils aus den Mineralien Bastnäsit und Monazit. In der Erdkruste kommt Lanthan mit 39 ppm vor und ist damit das dritthäufigste Seltenerdmetall [4]. Lanthanoxid wird als Katalysator in der Raffinierung von Erdöl verwendet, als Zusatz bei Speziallinsen in Digital- und Videokameras und ist zweitgrößter Bestandteil in der Mischerde [6, S.2-6]. Besondere Bedeutung gewinnt Lanthan als Reduktionsmittel in Kathoden von Hochtemperatur-Brennstoffzellen und als Wasserstoffspeicher in Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren (NiMH-Akkus). So benötigt ein einziges Hybrid-Automobil Typ "Prius" der Firma Toyota 15kg Lanthan für NiMH-Akkus [19].

2.2.2 Cer

Cer ist das Lanthanoid mit der Ordnungszahl 58 und gehört der Gruppe der leichten Seltenerdelemente (LREE, auch: Ceriterden) an. Hauptquellen der Cergewinnung sind die Mineralien Bastnäsit und Monazit. Mit einer Häufigkeit von 60 ppm [3] ist Cer das häufigste aller Seltenerdmetalle. Cer weist ein weites Anwendungsspektrum in der Metallurgie, als Katalysator und als Poliermittel auf. In der Metallurgie wird Ceroxid z.B. als Hauptbestandteil vom Mischmetall verwendet um Legierungen herzustellen. Als Katalysator findet Cer unter anderem Verwendung in Abgaskatalysatoren

bei Automobilen und in der Raffinierung in der Petrochemie. Cer ist unter den Seltenerdelementen jenes mit den höchsten Produktionsmengen. Dieser Zustand ist erklärbar durch die hohen Anteile von Cer an Bastnäsit und Monazit.

2.2.3 Neodym

Neodym hat die Ordnungszahl 60. Wie die ebenfalls beschriebenen Elemente gehört Neodym zu den Lanthanoiden und somit auch zu den Seltenerdmetallen. Mit 45 ppm ist Neodym das nach Cer meist vertretene Seltenerdelement in der Erdkruste [4]. Neodym zeichnet sich besonders durch seine starke magnetischen Eigenschaft aus. Neben Cer und Lanthan weist Neodym eine hohe Reaktionsfreudigkeit mit Luft und Wasser auf, weshalb es natürlich nur als Erde, als Oxid, vorkommt. Zusammen mit Eisen und Bor ist Neodym bei moderaten Temperaturen stabil und hat eine der höchsten magnetischen Energiedichten. Aufgrund der hohen Nachfrage nach Neodym für Magneten gilt Neodym als der Preistreiber der Seltenen Erden. Wenn größere Mengen Neodyms abgebaut werden, fallen gleichermaßen andere Seltenerdoxide (wie z.B. Ceroxid) an, deren Preis dadurch gedrückt wird [5, S.308].

Neodym als Magnet Neodym eignet sich, aufgrund der Eigenschaften, sehr als Magnet. Die hohe Remanenz (Größe der Magnetisierung) von Neodym in Verbindung mit Eisen und Bor ($Nd_2Fe_{14}B$) macht es zu einem der stärksten Magneten.

Der Neodym-Eisen-Bor-Magnet findet überall dort Anwendung, wo starke und/oder kleine Magneten benötigt werden. Gegenüber herkömmlichen Magneten besteht immer der Vorteil eines geringeren Gewichts und eines kleineren Volumens bei gleichbleibender magnetischer Energiedichte. So findet der Neodym-Eisen-Bor-Magnet Anwendung als Rotor in permanenten Gleichstrommaschinen (Generator/Motor) z.B. in Festplattenmotoren zur Ausrichtung des Lese- und Schreibkopfs, Modellbau oder in permanenten Gleichstromgeneratoren in Windkraftanlagen sowie als Permagnet in kleinen oder hochwertigen Lautsprechern/Kopfhörern. Durch Einbringung von Dysprosium in Neodym-Eisen-Bor-Magneten kann die maximale Betriebstemperatur bedingt durch das Neodym noch einmal erhöht werden.

In Windkraftanlagen kommen generell zwei Umwandlungsformen von mechanischer in elektrische Energie zum Einsatz. Die Unterschiede liegen in der Art des Generators. Ein Asynchrongenerator benötigt zusätzlich zur Umwandlung ein Getriebe. Der Synchrongenerator wird getriebeles betrieben und benötigt lediglich ein fremderregtes Magnetfeld im Rotor. Dies kann durch

Spulen und einen Stromfluss oder durch einen Permamagnet erreicht werden. Der Vorteil der Umwandlung mit Synchrongenerator ist, eine Reduzierung des Gewichts der Gondel und der Wegfall von Umwandlungsverlusten im Getriebe gegenüber der Umwandlung mit Asynchrongenerator. Beim Wegfall des Getriebes verringert sich ebenfalls der Wartungsaufwand der Windkraftanlage sowie das Ausfallrisiko. Diese Vorteile haben im Jahr 2011 zu einem Anstieg des Anteils von installierten Windkraftanlagen mit Synchrongenerator mit Rund einem sechstel beigetragen [20]. Gerade im Offshore-Bereich, wo Zugang und Reparatur an Windkraftanlagen sich schwieriger gestalten als an Land, steigern wartungsarme Anlagen die Stromproduktion.

Für eine Vorstellung der benötigten Mengen sind hier zwei Beispiele aufgeführt: In einer 2MW Windkraftanlage werden nach [21] 372kg Neodym und 60kg Dysprosium verbaut. In einem Toyota Prius sind nach [19] ein Kilogramm Neodym im Generator/Motor enthalten. Auch hier wird der Vorteil einer Synchronmaschine in Zusammenhang mit einer kleinen leichten Bauweise genutzt.

2.2.4 Yttrium

Yttrium ist das Element mit der Ordnungszahl 39. Yttrium ist gleichsam wie Scandium ein Seltenerdelement jedoch kein Lanthanoid. Im Vergleich zu den Lanthanoiden besitzt Yttrium einen kleineren Atomradius und eine geringere Dichte [5, S.305]. Es wird der Gruppe der schweren Seltenerdelemente (HREE) angerechnet und hauptsächlich aus den Mineralien Ionen-absorbierende Tone und Xenotim gewonnen. Mit einer Häufigkeit von 33 ppm in der Erdkruste steht Yttrium an vierter Stelle bei der Gruppe der Seltenerdelemente [4]. Im Jahr 2011 wurden 8900 Tonnen (davon 8800 Tonnen in China) reines Yttrium als Metall und Oxid produziert [22]. Hauptanwendungsgebiete für Yttrium sind neben der Metallurgie, der Verwendung als Leuchtmittel und in LC-Displays auch der Einsatz in der Radartechnologie und als Bestandteil von synthetischen Kristallen in der Festkörper-Laser-Produktion [5, S.305]. Darüber hinaus ist Yttrium in Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid $YBa_2Cu_3O_7$ enthalten, das als Hochtemperatursupraleiter der 2. Generation gilt [5, S.312]. Diese Verbindung erreicht bereits bei 93K (entspricht -180 Grad Celsius) supraleitende Eigenschaften [23, S.3]. Falls die Nachfrage der Elektrizitätswirtschaft nach Supraleitern steigt, so könnte die Bedeutung von Yttrium in naher Zukunft stark anwachsen.

3 Untersuchung

3.1 Akteure

3.1.1 Volksrepublik China

Entwicklung und Struktur der Seltenerd-Wirtschaft in China

„Für China sind Seltene Erden das, was Öl für Saudi-Arabien ist.“

Dieses Zitat des ehemaligen chinesischen Machthabers Deng Xiaoping von 1992 widerspiegelt die Bedeutung, die den Seltenen Erden in der Volksrepublik zugemessen werden [24]. Seit Mitte der 1980er Jahre begann im Reich der Mitte der großangelegte Minenbetrieb zur Erschließung von Seltenen Erden. Die Aufhebung vieler Regularien für diese Minen führte zur preiswerten Produktion [25]. Die Vereinigten Staaten, die zuvor Welthauptproduzent für Seltene Erden waren, erwiesen sich als nicht in der Lage mit diesen Preisen zu konkurrieren. In den 1990er Jahren verringerten sich daher die Kapazitäten der USA. Im gleichen Zeitraum gelang es den chinesischen Minenbetreibern eine kontinuierliche Produktionssteigerung durchzuführen. Letztendlich führte diese Steigerung zur Monopolposition Chinas im Bereich Seltener Erden, die bis heute anhält [26, S.13f.].

Die chinesische Regierung klassifizierte die Seltenen Erden früh als geschützte, strategische Ressource und begann eine staatlich kontrollierte Produktionskette aufzubauen [25]. Die wichtigsten Abbaugelände innerhalb Chinas sind in Sichuan, Shandong, Jiangxi und vor allem in der Inneren Mongolei. In der Abbildung 3.1 sind diese Provinzen (und einige Weitere) farblich hervorgehoben.

Von besonderer Bedeutung ist das Bastnäsit-Abbaugelände Bayan-Obo in der Inneren Mongolei. Aus diesem Gebiet stammen die größten Mengen mit ca. 50% Anteil an der chinesischen Gesamtproduktion an Seltenen Erden (s. Abbildung 3.2). Die Wertschöpfungskette ist hier besonders stark entwickelt und weit verknüpft. So existiert eine Sonderwirtschaftszone ("Baotou National Rare Earths High-Tech Industrial Development Zone") in der Abbau, Aufbereitung, Veredelung und Weiterverarbeitung konzentriert werden [26, S.14]. Außerdem ist hier seit 1963 das Forschungsinstitut "Baotou Research Institute of Rare Earths" angesiedelt, welches weltweit führende Forschungen im Zusammenhang mit Seltenen Erden durchführt [27, S.16]. Neben den Bastnäsitminen bei Bayan-Obo erreichen die Minen in Sichuan beträchtliche Ausbeuten an Bastnäsit mit bis zu 15000 Tonnen an Seltenerdoxid im Jahr 2008 (s. Abbildung 3.2). Die Bastnäsitvorkommen enthalten vorherrschend LREE wie Cer, Lanthan und Neodym (s. Kapitel 2.1.2) und begründen



Abb. 3.1: Karte der Volksrepublik China. Provinzen in denen der Abbau von Seltenen Erden von Bedeutung ist, sind farblich hervorgehoben. Größtes Abbaugbiet ist Bayan-Obo in der Inneren Mongolei [25]

	Bayan Obo Bastnäsit	Sichuan Bastnäsit	Ionen- absorbierende Tone	Andere	Gesamt
in Tonnen	60-70.000	10-15.000	45-55.000	8-12.000	125-140.000
in Prozent	48-50	8-11	36-39	6-9	100

Abb. 3.2: In dieser Tabelle werden drei Abbaugebiete in China nach den Kriterien Jahresproduktion, Mineralvorkommen und Anteil an chinesischer Gesamtproduktion an Seltenen Erden für das Jahr 2008 verglichen. Dazu ist der zusammengefasste Rest (Andere) und der Gesamtbetrag verzeichnet. Ionen-absorbierende Tone werden besonders in den südlichen Provinzen abgebaut [26, S.8]

Chinas Monopolposition im Bereich LREE.

Anders sieht es bei den Ionen-absorbierenden Tönen aus, die vornehmlich HREE, wie Yttrium darbieten. Auch in diesem Bereich erfüllt das Reich der Mitte die Monopolposition. So förderten chinesische Minen zwischen 45000 bis 55000 Tonnen an Seltenerdoxiden aus diesen Vorkommen im Jahr 2008 (s. Abbildung 3.2). Die Fördergebiete an Ionen-absorbierenden Tönen befinden sich vermehrt in den südlichen Provinzen der Volksrepublik.

Neben den großen staatlichen Betrieben wurden in der Entwicklungsgeschichte chinesischer Seltenerdproduktion viele kleine und teilweise illegale Minen und Aufbereitungsbetriebe gegründet. Die illegalen Betriebe entziehen sich jeglicher Regularien, was zu sehr geringen Arbeitsschutz- und Umweltauflagen führt. Der Anteil an der chinesischen Seltenerdförderung durch illegale Minen ist mit 10000 bis 20000 Tonnen durchaus signifikant [28, S.6]. Angaben zu den Mengen, die in illegalen Minen produziert wurden sind schwer zu erheben und mit Vorsicht zu genießen. Die Mengen können dabei abhängig von den Weltmarktpreisen bzw. dem Vorgehen der chinesischen Behörden über die Jahre stark schwanken.

Handelsverbindungen Die Seltenen Erden sind für viele Industriebereichen von hoher Bedeutung. Unternehmen aus der Metallurgie, der Energiewirtschaft, der Elektronikindustrie und weiteren Bereichen erstehen diese Rohstoffe auf dem Weltmarkt. Die Monopolposition Chinas bei Abbau und Aufbereitung impliziert, dass Unternehmen aus aller Welt von chinesischen Herstellern versorgt werden. In dem Kreisdiagramm in Abbildung 3.3 ist festgehalten in welche Staaten wieviele Exporte (anteilig vom Gesamtexportvolumen) an Seltenen Erden aus China ausgeliefert wurden. Hauptabnehmer sind Unternehmen aus Japan, die rund $\frac{2}{3}$ der Exporte veranschlagen. Danach folgen USA, Frankreich, Deutschland und Südkorea mit jeweils unter 10% Anteil an den chinesischen Exporten. Für die Abnehmerstaaten bildet der Import aus China häufig den Großteil der verfügbaren Mengen an Seltenen Erden. So galt z.B. für 2012, dass die USA 91% ihres Verbrauchs an Seltenen Erden über Einfuhren aus der Volksrepublik decken. Für Japan und die Europäische Union sind die Abhängigkeiten vergleichbar [25]. Diese Abhängigkeit kann durchaus als politisches Druckmittel instrumentalisiert werden. So warf die japanische Regierung der Chinesischen im Jahr 2010 im Zusammenhang mit Grenzstreitigkeiten Rückhaltungen von Lieferungen vor [27, S.17].

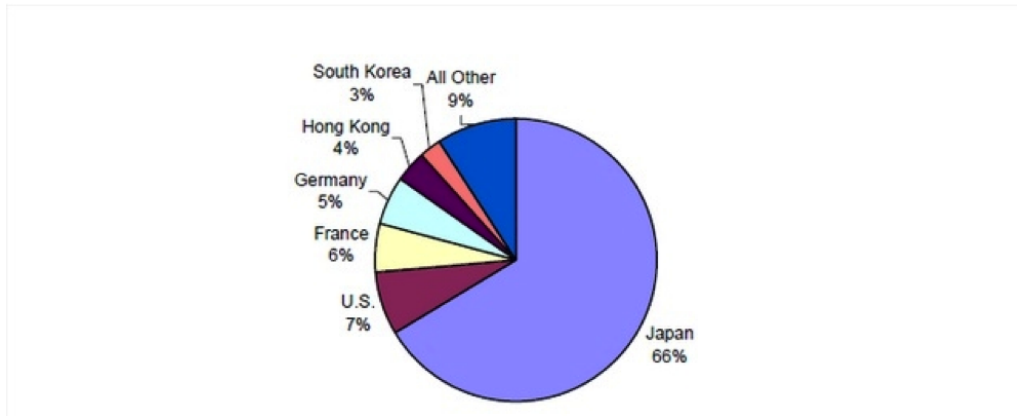


Abb. 3.3: Im Kreisdiagramm sind für das Jahr 2011 die Exportziele und deren Anteil am gesamten Exportvolumen von Seltenen Erden aus China zusammengefasst [25]

Entwicklungen in den 2000er Jahren Die Strategie der chinesischen Regierung ist mithilfe ihres Monopols im Gebiet der Seltenen Erden eine High-Tech Industrie im eigenen Land aufzubauen. Perspektivisch soll dies Ausfuhren der unverarbeiteten Rohstoffe vermindern und Ausfuhren höherwertiger Produkte aus Seltenen Erden steigern [27, S.17]. Gleichzeitig gibt es Bestrebungen die umweltschädlichsten Auswüchse der Seltenerd-Förderung zu unterbinden und insgesamt die Schritte in der Produktionskette besser zu verknüpfen und effizienter, sowie umweltfreundlicher zu gestalten.

Als Maßnahmen um diese Ziele zu erreichen, wurden zunächst die Anstrengungen vermehrt die illegalen Minen, die häufig sowohl ineffizient als auch besonders umweltschädlich arbeiten, zu schließen [26, S.15]. Zudem unterstellte die Exekutive alle Minen und Aufbereitungsbetriebe der Überwachung durch die chinesische Umweltbehörde [25]. Einhergehend mit der Schließung vieler kleiner und illegaler Minen, sowie mit der Einführung höherer Standards beim Umweltschutz sank die Seltenerdproduktion Chinas von 2010 zu 2011 um circa 25000 Tonnen (s. Tabelle in Abbildung 3.4).

Um die gesamten Wertschöpfungsketten, die auf Seltenen Erden beruhen in China aufzubauen, wurden zudem Exportquoten eingeführt, die sukzessive abgesenkt werden. In Abbildung 3.5 ist die Senkung der Exportquoten seit 2005 nachzuvollziehen. Seit 2010 verharren die Quoten bei 30000 Tonnen. Die chinesische Regierung verlautbarte, dass für die nächsten Jahre dieses Niveau stabil gehalten wird [27].

	(metric tons)					
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Official Chinese production quota	86,520	87,020	87,620	82,320	89,200	93,800
USGS reported production	119,000	120,000	120,000	129,000	130,000	105,000

Abb. 3.4: Chinas Jahresproduktionen an Seltenen Erden im Zeitraum 2006 bis 2011. In der ersten Zeile sind offizielle Zahlen des chinesischen Rohstoffministeriums. in der zweiten Zeile befinden sich Angaben des U.S. Geological Survey. Die Differenz ergibt sich zu großem Teil aus der Produktion illegaler Minen [27, S.19].

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Domestic	48.01	45.00	43.57	34.16	31.31	22.51	22.71	N/A
Joint Venture	17.57	16.07	16.07	15.83	16.85	7.75	7.47	N/A
Total	65.58	61.07	59.64	49.99	48.16	30.26	30.18	31.13

Abb. 3.5: Exportquoten für Seltenerdoxide in der Volksrepublik China von 2005 bis 2012. Domestic steht für die Eigenproduktion chinesischer Betriebe. Mit Joint Venture sind Mischkonzerne aus chinesischer und nicht-chinesischer Beteiligung gemeint [25]

Rare Earth Oxide	Chinese Domestic Prices (\$ per kg)	Chinese Export Prices (\$ per kg)	Percent Difference Between Chinese Export Prices and Chinese Domestic Prices
Lanthanum Oxide	18.3	66.5	263.4%
Cerium Oxide	20.7	59.3	186.5%
Neodymium Oxide	122.8	244.2	98.9%
Praseodymium Oxide	107.0	209.6	95.9%
Samarium Oxide	14.5	95.3	557.2%
Dysprosium Oxide	1,085.4	2,032.1	87.2%
Europium Oxide	2,228.4	3,800.0	70.5%
Terbium Oxide	1,765.1	2,973.9	68.5%

Abb. 3.6: Preise für verschiedene Seltenerdoxide im chinesischen und nicht-chinesischen Markt. In der letzten Spalte ist die prozentuale Differenz aufgeführt [25]

Neben den Exportquoten setzte Peking die Erhöhung von Zöllen auf die Ausfuhr von Seltenen Erden um. Im Jahr 2010 stiegen die Zölle um 15 bis 25% (abhängig vom Seltenerdelement). Die Zölle verursachen einen maßgeblichen Preisunterschied zwischen dem chinesischen und dem nicht-chinesischen Markt. Diese Preisunterschiede sind für ausgewählte Seltenerdoxide in Abbildung 3.6 ersichtlich. Die Preisunterschiede und die Versorgungsunterschiede stellen relevante Anreize für viele ausländische Unternehmen dar ihre Produktion in die chinesischen Seltenerdgebiete und besonders in die Sonderwirtschaftszone Baotuo zu verlegen. Die Maßnahmen zur Verstärkung der einheimischen Weiterverarbeitung von Seltenen Erden tragen bereits Früchte. So stieg der Eigenbedarf Chinas in den 2000er Jahren rapide an und betrug 2011 bereits 70000 Tonnen. Innerhalb eines Jahrzehnts ist damit der chinesische Anteil an der weltweiten Nachfrage von 30% auf 70% gestiegen [27, S.4].

Ausblicke Das Seltenerdmonopol und die Ausnützung desselbigen durch die chinesische Regierung ist ein wichtiger Faktor für den wirtschaftlichen Aufschwung und vor allem die Etablierung der Hochtechnologiewirtschaft in China seit den 1980er Jahren. Insofern kann attestiert werden, dass die Strategie der chinesischen Führung erfolgreich war.

Der Abbau und Handel mit den Seltenen Erden in allen seinen Facetten birgt jedoch auch Konfliktpotentiale für die Volksrepublik, die in naher Zukunft offener zutage treten könnten.

Da wären zunächst die Reaktionen der Abnehmerländer USA, Japan und die Staaten der Europäischen Union (vor allem Deutschland) auf die Handelsbe-

schränkungen der 2000er Jahre zu nennen. Die Zölle und die Exportquoten auf Seltene Erden sind die Grundlage einer Klage bei der WTO gegen China [27, S.18]. Im März 2014 kam die WTO zu dem Schluss, dass die Beschränkungen Chinas unfaire Handelspraktiken darstelle [29]. Beim Bearbeitungsschluss dieser Arbeit war noch unklar welche Konsequenzen dieses Ergebnis auslöst. Die Beschränkungen der Auslieferung und der Preisschock von 2011 verunsicherten die Regierungen und Unternehmen der abhängigen Staaten des Westens und Japans. Die Anstrengungen von Staaten wie den USA, Japan, Australien aber auch Deutschlands sich von den Seltenerdimporten aus China unabhängiger zu machen, wurden daher intensiviert. So laufen überall in der Welt neue Minenprojekte an. Die Wiederaufnahme der Produktion in der Mountain Pass Mine in Kalifornien, sowie der Beginn der Produktion in der Mount Weld Mine in Australien sind dabei nur Vorboten. Minenprojekte, die im Zusammenhang mit dem Preisschock von 2011 in Auftrag gegeben wurden, benötigen zwischen 5 und 10 Jahren bis zur Aufnahme der Produktion [27, S.4]. Das chinesische Monopol bei der Förderung von Seltenen Erden könnte also bereits 2020 aufgeweicht werden.

Hier lohnt sich jedoch ein detaillierter Blick. Viele der neuen und zukünftigen außerchinesischen Minen bauen Bastnäsitvorkommen ab. Derartig lockert sich eventuell die Importabhängigkeit vieler Staaten im Bereich der LREE. Die chinesische Vormachtstellung bei den HREE wird allerdings schwieriger zu umgehen sein und länger anhalten. Peking probte bereits im August 2009 den kurzfristigen Lieferstopp mehrerer HREE wie Yttrium [26, S.15]. Für die mittelfristige Zukunft sind folgerichtig weitere internationale Spannungen aufgrund der Handelsfragen bei Seltenen Erden zu erwarten.

Viele Faktoren deuten daraufhin, dass sich der Anstieg chinesischen Eigenbedarfs an Seltenen Erden fortsetzt. Beispielweise existieren ehrgeizige Pläne zum Ausbau der Windenergieleistungen von 12GW 2009 auf 100GW 2020 [27, S.16]. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, sind dafür große Mengen Neodym notwendig. Prognosen für weiterhin stabiles hohes Wirtschaftswachstum der Volksrepublik (vgl. [30]) unterstreichen diese Vermutung. Die Vereinigung chinesischer Seltenerdproduzenten schätzt, dass im Jahr 2015 ein Eigenbedarf Chinas von 130000 Tonnen Seltener Erden vorliegt [27, S.4]. Bei gleichzeitigem Sinken oder Stagnieren der Eigenproduktion um 100000 Tonnen pro Jahr (s. Abbildung 3.4) drängt sich die Möglichkeit auf, dass in einigen Jahren China Seltene Erden importieren muss und die Exportquoten entgegen Aussagen der Regierung weiter sinken werden [31].

Weiteres Konfliktpotential ergibt sich aus den Umweltschädigungen durch den Seltenerdabbau. Im Zuge des rasanten Ausbaus der Kapazitäten seit den 1980er Jahren wurde lange auf Kosten der Umwelt der Herstellungspreis

gedrückt. Widerstände bei der chinesischen Bevölkerung und insbesondere bei den Bewohnern der vom Seltenerdabbau betroffenen Gebiete könnten zunehmen [26, S.17ff.].

Zusammenfassend liegt der Schluss nahe, dass China den Westen in eine ungewohnte Situation bringt. Vom Rohstoffexporteur konnte das Reich der Mitte zum Hochtechnologiestandort aufsteigen, der nun hochwertige Güter an die alten Industrienationen liefert. In naher Zukunft könnten genau diese Staaten, wie die USA oder Australien die Primärrohstoffe nach China exportieren.

3.1.2 Bundesrepublik Deutschland

Ausgangslage In der Bundesrepublik Deutschland werden keine Seltenen Erden gefördert oder aufbereitet. Die Industrie deckt ihren Bedarf zu 100% über Importe und bezieht diese hauptsächlich aus China [32]. Die Metalle und ihre Oxide finden Einsatz in verschiedenen Bereichen der deutschen Wirtschaft und dabei besonders in strategisch wichtigen Zukunftstechnologien, wie der Energieversorgung und der Elektromobilität. Unter Anderem der angestrebte Umstieg auf eine Energieversorgung durch erneuerbare Energien (z.B. Windenergieanlagen) und das Ziel die Elektromobilität auszubauen (s. [33]), erfordern langfristige Versorgungssicherheit mit Seltenen Erden. Für die Wandlung der Wirtschaftsstruktur zu einer „green economy“ sind diese Rohstoffe essentiell [32].

Von 2004 bis 2008 stiegen Import und Verbrauch der Seltenen Erden in Deutschland um 50% [34]. 2011 betragen die Einfuhren der Rohstoffe insgesamt circa 8500 Tonnen [35]. Magnete, Legierungen, (petro)chemische Anwendungen und Poliermittel bildeten dabei die Hauptabsatzfelder in Deutschland. Tabelle 3.1 ist eine Auflistung der Anwendungsgebiete von Seltenen Erden in Deutschland.

Tab. 3.1: Verwendungsverteilung der Seltenen Erden in Deutschland im Jahr 2011. Alle Daten übernommen aus [35].

Verwendung	Anteil am Verbrauch	Anmerkungen und Beispiele
Magnete	19%	Als Nd-Fe-B oder Sm-Co für z.B. Synchrongeneratoren
Legierungen	19%	Als Mischmetall, als Bestandteil in NiMH-Batterien in Elektroautos etc.
(Petro-)Chemie	18%	Als Katalysatoren, v.a. Lanthan- und Cerverbindungen
Poliermittel	17%	
Leuchtmittel	7%	u.a. in Stadionbeleuchtung und in Energiesparlampen
Spezialgläser	6%	u.a. in Kameralinsen
Keramik	6%	
Andere	8%	

Strategien Die Versorgung mit Seltenen Erden wird gleichermaßen als notwendig für die deutsche Wirtschaft und als kritisch bzw. gefährdet in der Beschaffung eingestuft. Sowohl Unternehmen (s. [36]) als auch Politik (s. [32]) befürchten einen Mangel an diesen Rohstoffen.

Welche Strategien existieren, um die Lage zu verbessern? Welche Strategien werden bereits von der Politik umgesetzt?

Prinzipiell kann auf den Rohstoffmangel durch die Erhöhung des Angebots oder die Verringerung der Nachfrage reagiert werden.

Die Zunahme des Abbaus der primären Rohstoffe, sowie die Wiederaufbereitung zu sekundären Rohstoffen (Recycling) sind Mittel zur Steigerung auf der Angebotsseite. In Anbetracht des Misstrauens, welches dem Angebotsmonopolisten China von deutscher Seite zukommt, erweitert sich das Interesse von bloßer Angebotssteigerung zur Diversifizierung der Anbieter. In diesem Sinne schloss die deutsche Regierung sogenannte Rohstoffpartnerschaften mit der Mongolei (2011) [37] und Kasachstan (2012) [38]. Auch Afghanistan rückt in das Blickfeld deutscher Unternehmen. 2013 fand der „Erste deutsch-afghanische Rohstoffdialog“ statt, bei dem die Förderung von Seltenen Erden in Afghanistan Schwerpunktthema war [39].

Die bilateralen Rohstoffpartnerschaften sind praktische Umsetzung der Rohstoffstrategie der Bundesregierung vom Oktober 2010. Dieses Dokument widerspiegelt die Ansätze der Bundesregierung zur Sicherung der Rohstoffver-

sorgung. Neben der anvisierten Diversifizierung von Bezugsquellen und dem Abschluss von bilateralen Rohstoffpartnerschaften, intendiert die Bundesregierung eventuelle Handelshemmnisse abzubauen [32]. Hierfür werden im Fall der Seltenen Erden die Möglichkeiten ausgeschöpft, die im Rahmen der Welthandelsorganisation (WTO) zur Verfügung stehen. Unter dem Dach der Europäischen Union wurde im März 2012 eine Klage gegen die chinesischen Exportbeschränkungen bei der WTO eingereicht [40].

Auch die Produktion der Primärrohstoffe in Deutschland, namentlich im sächsischen Storkwitz wird in Erwägung gezogen (s. Kapitel 2.1.2). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert Forschung im Bereich der Exploration, Gewinnung, Aufbereitung und Metallurgie von Seltenen Erden. Außerdem unterstützt es Bemühungen die Akzeptanz der Bevölkerung für Rohstoffgewinnung in Deutschland zu heben [32].

Ein weiterer Weg die Angebotsseite zu vergrößern, ist der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft. Die Herstellung von Sekundärrohstoffen durch Recycling mindert den Bedarf an Primärrohstoffen. Schätzungen zu den bisherigen Recyclingquoten von Seltenen Erden in Deutschland kommen zu Werten unter 1% (s. [32] und [35]). Auf den Themenkomplex Recycling wird weiter in Kapitel 3.4 eingegangen.

Neben der Sorge um höhere Zufuhren an Seltenen Erden gehen die Vorhaben in die Verminderung der Nachfrage. Hierbei fallen vor allem die Schlüsselwörter Substitution und Ressourceneffizienz.

Im Rahmen des deutschen Ressourceneffizienzprogrammes und der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (Verdopplung der Rohstoffproduktivität von 1994 bis 2020) investiert das Bundesministerium für Bildung und Forschung in die Ressourceneffizienz bei Seltenen Erden. Die derzeitige Fördermaßnahme ist „r4-Innovative Technologien für Ressourceneffizienz“, bei der nichtenergetische, metallische Rohstoffe fokussiert werden [32].

Die Substitution der Seltenen Erden im Produktionsprozess geht bei vielen Prozessen mit einer Effizienzminderung einher. Bei einigen Anwendungen, erstrangig im Bereich Magnete, Leuchtmittel, Katalysatoren und Synchronmotoren ist der Ersatz mit anderen Materialien oder Produkten besonders kritisch bzw. derzeit nicht denkbar [28].

Ausblick Seltene Erden nehmen eine Schlüsselposition in vielen Zukunftstechnologien ein und der Bedarf der deutschen Wirtschaft wird aller Voraussicht nach auch weiterhin steigen. Da China seine Exporte begrenzt und Substitution zu minderwertigeren Gütern führt, bleibt den deutschen Akteuren mittelfristig nur das Ausweichen auf andere Bezugsquellen. In

Betrachtung der Umweltschädigung des Abbaus, der Begrenztheit der Resource und der weiterhin bestehenden Abhängigkeit von Lieferstaaten scheint langfristig nur das Recycling eine sinnvolle Alternative. Doch genau dem Recycling wird im Fall Seltener Erden immer wieder die Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit abgesprochen.

3.2 Umweltbelastungen durch den Abbau

Abgebaut wird meist in einem der drei nachfolgenden Verfahren:

Tagebau Abbau an der Oberfläche bis in Tiefen von 100 Metern.

Bergbau Bergbau in tieferen Gesteinsschichten mit senkrechtem Zugang.

Auslösen durch Chemikalien Einbringen von Chemikalien durch ein Bohrloch. Auslösen der Erze aus dem Gestein. Förderung durch ein zweites Bohrloch [41].

Der meiste Abbau von Seltenerdmetallen erfolgt aus Kostengründen im Tagebauverfahren. Nach dem Abbau erfolgt die Weiterverarbeitung häufig in Umgebung der Mine. Rund um die größte Mine für Seltenerdmetalle Bayan Obo in der inneren Mongolei in China, in der vordergründig Eisen abgebaut wird, hat sich im Lauf der Jahre eine ganze Reihe an Weiterverarbeitungsbetrieben angesiedelt. Teilweise werden auch vorort physikalische und chemische Prozesse angewandt, um die Seltenerdmetalle aus dem Gestein zu lösen. Je nach Extraktionsmethode fallen verschiedene Arten von Schlacken und Rückständen an. Aus einem Artikel von ChinaDaily geht hervor, dass für eine Tonne Seltenerdmetalle in der Weiterverarbeitung 63 000 m³ Abgase kontaminiert mit Schwefel- und Flusssäure, 200 m³ säurehaltiges Abwasser und 1,4 Tonnen radioaktiver Abfall anfallen [42]. In der Stadt Baotou, welche in der Nähe der Bayan Obo Mine liegt sind Chemikalienvergiftungen und Schwarze Lunge die häufigsten Beschwerden. Während die Gase meist unkontrolliert in die Umgebung entweichen, werden die flüssigen Abfälle zum Teil ohne Behandlung in den Yellow River geleitet oder in offenen Abraumbecken umrandet von Dämmen gelagert [43]. Beide Maßnahmen führten in der Vergangenheit zu starker Kontaminierung der Umgebung. Ebenfalls belastet illegaler Abbau und Ausfuhr die Umwelt, da hier keine Umweltauflagen eingehalten wurden. In einer Studie im Bereich einer Mine für Seltenerdmetalle in Südchina, in der Haare von Kindern im Alter von 11-15 Jahre untersucht wurden, fanden die Forscher signifikant höhere Werte für mehrere leichte Seltenerdmetalle als bis dahin in der Literatur angegeben waren und weit höher als in einer Referenzuntersuchung [44].

3.3 Preisentwicklung

Der Preis für die verschiedenen Seltenen Erdmetalle ergibt sich aus Angebot und Nachfrage. Bis heute werden sie nicht an der Börse gehandelt. Seit Erschließung dieser Metalle stiegen der Preis sowie die Nachfrage kontinuierlich an, da immer mehr Hochtechnologieunternehmen auf die besonderen Eigenschaften dieser Erden nicht mehr verzichten können [45, S.4ff.]. Im 20. Jahrhundert war die Höhe des Preises pro Kilogramm überschaubar und das Wort „seltene“ fand für diese Elemente nahezu keine Verwendung. Mit Beginn des 21. Jahrhunderts entstand dann eine dynamischere Preisbildung. Bis zum Jahre 2006 blieb der Preis noch nahezu konstant, doch danach gab es große Schwankungen. In Abbildung 3.7 ist der Preis je Kilogramm am Beispiel Neodymoxid grafisch dargestellt. Der Handel der Metalle findet mit einer mindestens 99 prozentigen Reinheit auf der Oxidebene statt. Die dargestellten Kurven in Dollar und Euro je Kilogramm zeigen den netto, zoll- und umsatzsteuerfreien Verlauf [46]. Bis Mitte 2008 ist beim Neodymoxid ein kleinerer Anstieg aufgrund der steigenden Anzahl der Einsatzfelder zu verzeichnen. Danach fiel der Preis wieder aufgrund der Weltwirtschaftskrise, die bei den Metallen keinen Halt machte. Dies war jedoch nur von kurzer Dauer. Durch Drosselung des Exportes seitens Chinas stiegen die Kosten im Jahre 2010 stark an. China begründete dies mit dem gestiegenen Eigenbedarf und den in Kapitel 3.2 beschriebenen Umweltschäden durch den Abbau [47]. Anfang bis Mitte 2011 erreichten sie dann astronomische Höhen, da sogar die Rede von einem kompletten Exportstopp war. Für Neodym lag der Preis 2004 noch bei etwa 10 \$/kg, nur vier Jahr später, im Jahre 2008, betrug er dann ca. 60 \$/kg und wieder ca. vier Jahre später, Mitte 2011, dann kurzfristig 450 \$/kg. Aufgrund der extrem hohen Kosten und den weiteren Versorgungsunsicherheiten mussten mehrere Unternehmen schließlich ihre Insolvenz beantragen [48]. Diese gigantische Preishöhe war aber nur von kurzer Dauer. Die USA, die EU und Japan verklagten die Volksrepublik China erfolgreich vor der Welthandelsorganisation [49]. Die Einschränkungen des niedrig gehaltenen Exportes wurden für illegal erklärt und der Preis erfuhr wieder einen starken Abwärtstrend. Wie es der Abbildung zu entnehmen ist brach der Wert massiv ein, bleibt jedoch weiterhin auf einem hohen Niveau. Nach heutigem Stand (April 2014) liegt er für das Beispiel Neodymoxid noch bei 84 \$/kg. Abbildung 3.8 stellt die Preisentwicklung von Neodymoxid in den letzten 12 Monaten dar. Hier ist zu erkennen wie stark der Kurs monatlich fluktuiert. Monatliche Schwankungen von 10-20% sind keine Seltenheit, was die weltweit anhaltende Unsicherheit bei diesen Metallen verdeutlicht. Die restlichen Metalle, sowohl LREE als auch HREE, weisen gleichartige

Ausschläge wie Neodym auf. Für explizite Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sollte dennoch jedes Seltenerdmetall für sich einzeln betrachtet werden.

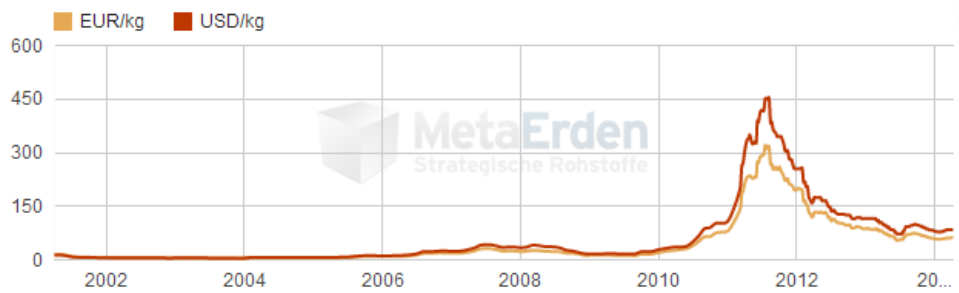


Abb. 3.7: Preisentwicklung von Neodymoxid von 01.2001-04.2014 [46]

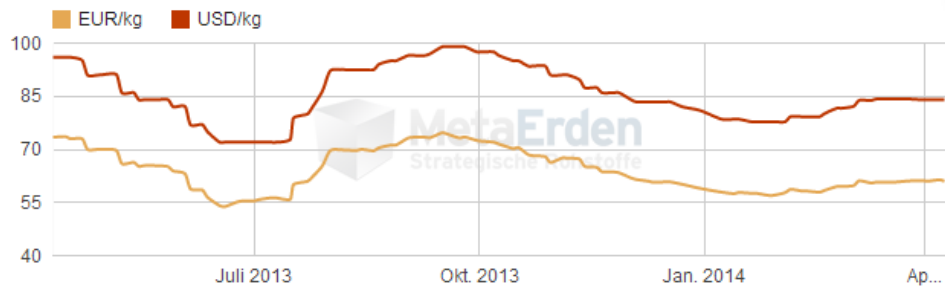


Abb. 3.8: Preisentwicklung für Neodymoxid von 04.2013-04.2014 [46]

3.4 Recycling

Erste Anzeichen von Engpässen bei den Seltenerdmetallen führten zu einem weltweiten Umdenken im Hinblick auf das Recycling von Metallschrott. Bisher gewannen größere Recyclingfirmen lediglich Metalle die im größeren Umfang vorhanden waren zurück, wie z.B. Eisen, Aluminium oder Kupfer. Für die geringen Anteile der seltenen Elemente lohnte sich eine Rückgewinnung nicht, sie landeten in der Schlacke, welche maximal noch als Baustoff verwendet wurde. Doch mit Beginn eines angekündigten Exportstopps der wertvollen Metalle seitens Chinas, stiegen die Preise der Elemente stark an, siehe Kapitel 3.3, wodurch die Industrie aufwachte und erste Recyclingmethoden einleitete. Laut einigen Expertenmeinungen hieß es sogar, dass ohne Rückgewinnung die Vorräte der Seltenen Erden in wenigen Jahrzehnten zu neige gehen würden und viele Hochtechnologiebranchen keine weitere Zukunft hätten [50]. Laut der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover könnte diese alarmierende Prognose für einige Metalle wie Neodym sogar schon vor 2030 zutreffen [51]. Die Forschung an aufwändigen und sehr kostspieligen Rückgewinnungsverfahren begann und so stellte schließlich die Recyclingfirma Rhodia im französischen La Rochelle im Jahre 2012 die weltweit erste Fabrik in Betrieb [52]. Rhodia gelang es Seltene Erdmetalle aus verschiedenen Abfallarten heraus zu lösen, jedoch wird über das genaue patentierte Verfahren bis heute geschwiegen. In Deutschland etablieren sich das Fraunhofer Institut, MORE und die Umicore AG & Co KG im Bereich der Forschung und in den nächsten Jahren soll seitens der Bundesregierung ein neues Institut für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie entstehen, welches sich ebenfalls diesem Problem widmen wird. Bisher konnten aus Leuchtkörpern Yttrium und Europium zurück gewonnen werden und es existieren auch mehrere Verfahren für die Rückgewinnung von Lanthan und Cer aus Akkumulatoren. Die gewonnen Mengen sind jedoch im Verhältnis zum Aufwand sehr klein. Prozentual gesehen konnten die größten Erfolge bei Altmagneten erzielt werden, in denen Neodym, Praseodym sowie Dysprosium enthalten ist [53]. Die erprobten Verfahren laufen pyrometallurgisch und nasschemisch ab und die Palette der recycelbaren Ausgangsmaterialien ist sehr groß. Die Bereitstellung der recycelbaren Materialien weist jedoch häufig Schwierigkeiten auf, da beispielsweise Magnete vor der Behandlung entmagnetisiert werden müssen. Nach den Behandlungsprozessen lassen sich die Elemente dann aber mit nahezu keinen physikalischen Verschlechterungen für die Herstellung neuer Technologien wiederverwenden. Der Chemikalieneinsatz bei den Verfahren, die das Fraunhofer Institut entwickelt hat, ist sehr gering, wodurch eine hohe Umweltfreundlichkeit aufgewiesen werden kann [53].

Auf der unternehmerischen Seite gibt es in Deutschland vom Abfallbetrieb Loser Chemie eine erste Pilotanlage in Hainichen. Dort werden Altmagnete im geringen Umfang mit den genannten Prozessen erfolgreich recycelt. Es muss sich jedoch noch zeigen, ob die Verfahren im Großbetrieb rentabel sein können. Fördergelder unterstützen die weitere Forschung, aber das Recycling von Seltenen Erdmetallen steckt immer noch in den Kinderschuhen. Das Öko-Institut hat deswegen bereits im Jahre 2011 einen Acht-Punkte-Plan für ein effektives Recycling von den seltenen Elementen entwickelt [54, S.7]. Laut diesem Institut sollte zunächst ein Europäisches Kompetenznetzwerk bestehend aus Unternehmen, Herstellern, Behörden und Vertretern aus Wissenschaft und Politik errichtet werden. Die Zusammenarbeit aller Bereiche ist unabkömmlich für einen Erfolg. Die Punkte zwei und drei beinhalten den Ausbau der Grundlagenforschung in Europa, um unabhängiger von China zu werden, sowie eine europäische Stoffstromanalyse, welche ein gemeinsam breites Wissen vorsieht. Patentierte Verfahren, wie sie Rhodia entwickelt hat, müssen für Gleichgesinnte und die Öffentlichkeit frei zugänglich gemacht werden. Punkt vier, fünf und sechs sehen die Identifizierung von Pilotprodukten, den Aufbau eines Sammel- und Vorbehandlungssystems und die Entwicklung von Pilot-Recycling-Anlagen vor. Dort hat sich, wie erläutert, schon einiges getan; die Fortschritte sind jedoch gemächlich. Punkt sieben und acht beinhalten die finanziellen und rechtlichen Aspekte, in denen Wirtschaft und Politik noch Nachholbedarf haben. Laut MORE sollte neben dem Aspekt des Recyclings auch eine Erhöhung der Lebenszeit von Produkten nicht vernachlässigt werden [55]. Eine Reparatur, Wiederverwendung und Aufrüstung sollte einem Neubau immer vorgezogen werden, wodurch die Umwelt im großen Umfang geschont werden kann. Auch die Gesetzgebung muss sich verbessern. Durch illegale Exporte von Elektroschrott in Entwicklungsländer geht Recyclingpotential verloren [56, S.8f.]. Verbesserungen in diesem Bereich sind in den nächsten Jahren unabdingbar. Da die Preise der Seltenen Erden seit 2012 einen Abwärtstrend erfahren, rückt der Recyclinggedanke der Öffentlichkeit wieder etwas in den Hintergrund, obwohl das weltweite Potenzial gigantisch ist. Laut Forschern könnte die Industrie schon heute ca. 20 % des Bedarfs aus recycelten Elementen decken [51].

4 Diskussion

Aus den vorangegangenen Kapiteln wird ersichtlich, dass bis heute der Preis der einzelnen Seltenerdmetalle die größten Auswirkungen auf Umweltbelastungen, Recycling und Substitution hat. China wurde bisher als Monopolist nicht abgelöst. Die technische Entwicklung, in deren Folge sich die Nachfrage einzelner Seltenerdmetalle vervielfachen könnte, ist nicht vorhersehbar [57].

Die großen Mengen an kontaminierten Abraum und Schlacke sind eine Folge der niedrigen Konzentration der Seltenerdmetalle in deren Vorkommen und werden durch illegalen Abbau verstärkt. Das Fehlen und Durchsetzen von Umweltauflagen insbesondere in China, um ein Entweichen von giftigen Gasen und eine Kontamination der Umgebung zu verhindern, führen bis heute zu erheblichen Umweltbelastungen. Richtlinien die weltweit gelten und durchgesetzt werden, um Umweltbelastungen zu verhindern, fehlen.

Insbesondere eine schnelle Substitution einzelner Seltenerdmetalle und eine Weiterentwicklung von Produkten führte in der Zeit nach dem Peak im Jahr 2011 zu einem Preisverfall. Die vielfach befürchteten dauerhaft hohen Preise sind bisher nur vereinzelt bei Seltenerdmetalle vorhanden. Für die Zukunft wird eine preislich starke Aufspaltung zwischen LREE und HREE prognostiziert [57].

In der heutigen Gesellschaft steht der Wirtschaftlichkeitsgedanke immer noch vor dem Thema Umweltverträglichkeit. Ein sinnvoller Plan für eine Recyclingwirtschaft wurde bereits vom Ökoinstitut aufgestellt, siehe Kapitel 3.4. Das Recycling muss von dem rein wirtschaftlichen Gesichtspunkt abgetrennt werden, ein gesetzlicher Rahmen könnte zumindest teilweise das Recycling fördern. Für eine umweltfreundliche Nutzung von Seltenerdmetallen müssten gesetzliche Vorgaben aufgestellt werden, die weltweit gelten. Diese müssten beim Abbau in den Minen beginnen und über die Produktion bis hin zum Recycling reichen. Aus diesen Vorgaben könnte sich ein neuer umweltfreundlicher Preis für Seltenerdmetalle entwickeln, wodurch ein effizientes und umweltfreundliches Verhältnis von Abbau und Recycling entsteht.

Ein Ansatz für einen Rohstoffkreislauf für Seltenerdmetalle in Deutschland wäre die Einführung eines Pfandsystems für alle Produkte mit einer Recyclingrelevanten Seltenerdmetallmenge. Der Pfandpreis könnte sich nach der Masse von Seltenerdmetallen richten. Dieser wäre zusätzlich zum Kaufpreis zu entrichten und würde bei Abgabe wieder eingelöst. Eine Alternative wäre ein System ähnlich dem des Grünen Punkts. Der Hersteller würde dann eine Recyclinggebühr bezahlen und die Recyclinghöfe würden sich ihrerseits zum Trennen und Recyceln verpflichten. So könnte zumindest für Deutschland die Abhängigkeit verringert und die Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit

Seltenerdmetallen gestärkt werden

Die Situation in China zeigt trotz eines weltweiten Marktanteils an Seltenerdmetallen von 92.1 % eine beschränkte Preisspanne [57]. Das Interesse von China liegt bei einem hohen Preis, welcher allerdings kurzfristig zu mehr illegalem Abbau und Schmuggel und langfristig zu mehr globaler Konkurrenz führt. Daher liegt es auch im Interesse von China trotz eines Quasimonopols einen zu hohen Preis zu vermeiden.

5 Fazit

Aus den aufgeführten Erkenntnissen in dieser Arbeit wird deutlich, dass die Seltenerdmetalle nicht selten sind und die 2011 prognostizierten Knappheiten und Preissteigerungen bisher nicht eingetreten sind. Die extremen Preisanstiege traten nur für einen sehr kurzen Zeitraum auf. Anschließend fielen die Preise stark auf ein moderat hohes Level. Für den Preisanstieg im Jahre 2011 war mehrheitlich der chinesische Exportstop der Verursacher, welcher erfolgreich von den USA, Japan und der EU bekämpft wurde. China hatte und hat bisher einen Marktanteil von über 90% und ist damit weiter Quasimonopolist. Die erhofften Preissteigerungen der Volksrepublik durch Exportbegrenzung wurden 2013 nicht erreicht, im Gegenteil wurde die Mengenbegrenzung nicht einmal ausgeschöpft [57].

Am Beispiel von der Mine Bayuain Obo wird deutlich, dass Seltenerdmetalle zum Teil nur Nebenprodukt sind. Die Reaktionen auf den starken Preisanstieg 2011, das Reaktivieren von bereits geschlossenen Minen, zeigen eine Preisobergrenze, sodass die damaligen pessimistischen Preissteigerungen als erheblich zu hoch eingeschätzt werden können. Weiterhin verhält sich der Markt höchst instabil und ist sehr großen politischem Einfluss unterworfen. Die zukünftigen Entwicklungen machen Vorhersagen auf die Preisentwicklung schwer möglich. Generelle jährliche Preissteigerungen im unteren zweistelligen Prozentbereich gelten als wahrscheinlich.

Die Umweltbelastung und deren gesellschaftliche Aufklärung führt zusammen mit der Kernkompetenz beim Thema Seltenerdmetalle zu Verschwiegenheit in den Hochtechnologieunternehmen. Daher war es in dieser Arbeit nicht möglich umfangreiche Ergebnisse bzgl. der Unternehmen zu erarbeiten. Alle Anfragen an Unternehmen, die Abbau betreiben oder Seltenerdmetalle verarbeiten, wurden nicht beantwortet.

Recycling spielt trotz großem Anstoß in Forschung und Entwicklung von Recyclingsverfahren immer noch keine Rolle. Bereits heute könnte unter technischen Gesichtspunkten das Potential für Recycling die jährliche Nachfrage in Deutschland von etwa 20% abdecken. Bisher sind die Verfahren fast alle unwirtschaftlich. Hier ist insbesondere die Politik gefragt, um durch neue Gesetze Anreize für Recycling zu schaffen und den Umweltbelastungen aufgrund des Abbaus von Seltenerdmetallen entgegenzuwirken. Für den Juni 2014 ist ein internationales Treffen anberaumt, beim dem zukünftige Strategien zu dem Thema präsentiert werden [58].

Literatur

- [1] dpa. Seltene Erden bleiben knapp. *Handelsblatt*, 2013. <http://www.handelsblatt.com/finanzen/rohstoffe-devisen/rohstoffe/hightech-metalle-seltene-erden-knapp/9252368.html> (abgerufen am 15.03.2014).
- [2] Periodensystem der Elemente. <http://media0.faz.net/ppmedia/multimedia/interaktiv/4223951733/1.1077306/default/die-superschweren-elemente-111-bis-118.jpg> (Abgerufen am: 5.01.2014).
- [3] James B. Hedrick. Rare-Earth Metals. *U.S. Geological Survey Minerals Yearbook*, -:61.1, 1997.
- [4] David R. Lide. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, chapter Geophysics, Astronomy and Acoustics, page 14. CRC Press, 2005.
- [5] Gerhard Angerer et al. *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [6] United States Environmental Protection Agency. Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues, Dezember 2012. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100EUBC.pdf> (Abgerufen am: 17.01.2014).
- [7] Astid Bergmann und Falk Sander. Lanthanoide. <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/lanthanoide/lanthanoide.htm> (Abgerufen am: 28.02.2014).
- [8] Allanite-(Ce). Mineral Data Publishing, 2001. <http://rruff.info/doclib/hom/allanitece.pdf> (Abgerufen am: 7.01.2014).
- [9] Gewinnung und Trennung von Lanthanoiden. FH Münster. en.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/juestel/juestel/Gewinnung_und_Trennung_von_Lanthanoiden_AntonioLorusso_.pdf (Abgerufen am: 17.01.2014).
- [10] Prof. Dr. Erwin Riedel. *Anorganische Chemie*. Walter de Gruyter GmbH & co. KG, 2004.
- [11] Yiyang Zhang. Peak Neodym - Material Constraints for Future Wind Power Development. Master's thesis, Uppsala University, 2013.

<http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:668091/FULLTEXT01.pdf>
(abgerufen am: 21.01.2014).

- [12] D. Schüler et al. *Study on Rare Earths and their Recycling*. Öko-Institut e.V., Januar 2011.
- [13] Franz Nestler. Seltene Erden erstmals in Deutschland bestätigt. *FAZ*, -:-, 17. Januar 2013. <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/rohstoffe-seltene-erden-erstmals-in-deutschland-bestaetigt-12046040.html> (Abgerufen am: 17.01.2014).
- [14] Seltenerden Storkwitz AG. <http://www.seltenerden-ag.de/projekt-storkwitz/> (abgerufen am 08.04.2014).
- [15] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2008-2011, 2011.
- [16] Horbart King. Ree - Rare Earth Elements and their Uses. <http://geology.com/articles/rare-earth-elements/> (Abgerufen am 07.01.2014).
- [17] Molycorp Mountain Pass, 2012. <http://www.molycorp.com/about-us/our-facilities/molycorp-mountain-pass/> (Abgerufen am: 18.01.2014).
- [18] X. Du und T. E. Graedel. Global in-use stocks of the Rare Earth Elements: a first estimate. *Environmental Science and Technology*, 45:4096–4101, 2011.
- [19] Steve Gorman. As hybrid cars gobble rare metals. Reuters, 2009. www.reuters.com/article/2009/08/31/us-mining-toyota-idUSTRE57U02B20090831 (abgerufen am 20.01.2014).
- [20] Mandy Schoßig. Seltene Erden - Daten und Fakten. *Hintergrundpapier Seltene Erden Öko-Institut e.V.*, -:-, 2011.
- [21] Daniel Grushkin. Alaskas Billion Dollar Mountain. Bloomberg Businessweek Magazine, 2011. http://www.businessweek.com/magazine/_alaskas-billion-dollar-mountain-10272011.html (abgerufen am 13.01.2014).
- [22] Daniel J. Cordier. Yttrium. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Januar 2012. www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2012-yttri.pdf (abgerufen am: 2.02.2014).

- [23] Christian Näther. Darstellung und Charakterisierung des Hochtemperatursupraleiters Yttrium-Barium-Cuprat. Uni Kiel - Institut für Anorganische Chemie. http://www.uni-kiel.de/anorg/bensch/lehre/Dokumente/versuch_f1_yttrium_barium_cuprat.pdf (abgerufen am: 4.02.2014).
- [24] Chris Libuda. Warum Seltene Erden so wichtig sind. Tagesschau - Bericht, 27. Oktober 2010. https://www.tagesschau.de/wirtschaft/rohstoffe102~_origin-309175e6-8a9b-494a-bc5d-d800c5276247.html (abgerufen am: 2.1.2014).
- [25] Introducing the Problem of Availability of Strategic Elements, 2013. <http://web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/problems/limitedaccess.html> (abgerufen am: 22.01.2014).
- [26] Dennis Tänzler et al. Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Risikoreiche Zukunftsrohstoffe? Fallstudie und Szenarien zu China und seltene Erden. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2011. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rohstoffkonflikte-nachhaltig-vermeiden-4> (abgerufen am 05.01.2014).
- [27] Marc Humphries. Rare Earth Elements: The Global Supply Chain. Congressional Research Service, 16. Dezember 2013. <http://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf> (abgerufen am: 05.02.2014).
- [28] Hanns Günther Hilpert und Antje Elisabeth Kröger. Chinesisches Monopol bei Seltenen Erden: Risiko für die Hochtechnologie. DIW Wochenbericht Nr. 19.2011, 2011. http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.372387.de/11-19-1.pdf (abgerufen am: 14.01.2014).
- [29] China verliert Streit um Seltene Erden. Tagesschau - Bericht, 26. März 2014. <http://www.tagesschau.de/wirtschaft/wto184.html> (abgerufen am: 08.04.2014).
- [30] Weltbank senkt Wachstumsprognose für China geringfügig. Reuters, 7. April 2014. <http://de.reuters.com/article/economicsNews/idDEBEEA3601H20140407> (abgerufen am : 07.02.2014).
- [31] China, a Rare Earths Giant, Set to Start Importing the Elements. New York Times, 11. July 2012. <http://www.nytimes.com/2012/07/12/business/global/>

china-a-rare-earths-giant-set-to-start-importing-the-elements.html?_r=0 (abgerufen am: 07.02.2014).

- [32] Bekanntmachung von Richtlinien zur Fördermassnahme "r4 - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe". Bundesministeriums für Bildung und Forschung, 17. Juli 2013. <http://www.bmbf.de/foerderungen/22528.php> (abgerufen am: 04.01.2014).
- [33] Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität. die deutsche Bundesregierung. http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/podcast/_node.html (abgerufen am 08.04.2014).
- [34] Lorenz Erdmann und Siegfried Behrendt. Kritische Rohstoffe für Deutschland. Im Auftrag der KfW Bankengruppe, 30. September 2011. <https://www.kfw.de/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Kritische-Rohstoffe-KF.pdf> (abgerufen am 08.04.2014).
- [35] Seltene Erden - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, April 2014. http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_se.pdf?__blob=publicationFile&v=4(abgerufen am: 08.04.2014).
- [36] Jule Reimer. Bdi-Rohstoffkongress: Rohstoffmangel gefährdet sogar Unternehmen. Tagesschau - Audiodatei, 26. Oktober 2010. <http://www.tagesschau.de/multimedia/audio/audio59924.html> (abgerufen am 2.1.2014).
- [37] Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Mongolei über Zusammenarbeit im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich, 13. Oktober 2011.
- [38] Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Republik Kasachstan über Partnerschaft im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich, 8. Februar 2012.
- [39] Gudrun Kopp eröffnet den "Ersten deutsch-afghanischen Rohstoffdialog" in Berlin. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, 5. Juli 2013. <http://www.bmz.de/20130705-2> (abgerufen am: 08.04.2014).

- [40] Klage gegen China wegen Seltener Erden eingereicht. Tagesschau - Bericht, 13. März 2012. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/erden100.html> (abgerufen am 08.04.2014).
- [41] Paul Lusty and Abigail Walters. Rare earth elements. 2010.
- [42] Li Jiabao and Liu Jie. Rare earth industry adjusts to slow market. *ChinaDaily*, 2009. http://www.chinadaily.com.cn/bw/2009-09/07/content_8660849.htm (abgerufen am 02.12.13).
- [43] Cindy Hurst. China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? *Institute for the Analysis of Global Security (IAGS)*, 2010. [urlhttp://fmso.leavenworth.army.mil/documents/rareearth.pdf](http://fmso.leavenworth.army.mil/documents/rareearth.pdf) (abgerufen am 12.03.2014).
- [44] Shi-Lu Tong, Wang-Zhao Zhu, Zhao-Hua Gao, Yu-Xiu Meng, Rui-Ling Peng, and Guo-Cheng Lu. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Children's Scalp Hair from a Rare Earths Mining Area in Southern China. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 39(9):2517–2532, 2004.
- [45] Hanns Günther Hilpert and Antje Elisabeth Kröger. Chinesisches Monopol bei Seltenen Erden: Risiko für die Hochtechnologie. *Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.*, 2011. www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.372387.de/11-19-1.pdf (abgerufen am 10.01.2014).
- [46] Peter Hilzendegen and Thomas Schmid. Aktuelle Verkaufspreise. *MetaErden*, 2014. <http://www.metaerden.com/news/preisliste/> (abgerufen am 10.04.2014).
- [47] siu/Reuters/dapd. Seltene Erden: China verstärkt Kontrolle über Hightech-Metalle. *Spiegel Online*, 2012. <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/china-gruendet-wirtschaftsverband-fuer-seltene-erden-a-826373.html> (abgerufen am 18.01.2014).
- [48] Christian Schlumpberger. Krise am Markt für Seltene Erden. *Markt und Mittelstand*, 2013. <http://www.marktundmittelstand.de/nachrichten/produktion-technologie/krise-am-markt-fuer-seltene-erden/> (abgerufen am 04.02.2014).

- [49] dpa. Eu und Vereinigte Staaten verklagen China. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2012. <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/seltene-erden-eu-und-vereinigte-staaten-verklagen-china-11682578.html> (abgerufen am 02.02.2014).
- [50] Susanne Donner. Hightech-Metalle aus dem Müll. *Technology Review*, 2013.
- [51] Susanne Donner. Wie sich Seltene Erden recyceln lassen. *Wirtschafts Woche*, 2013. <http://www.wiwo.de/technologie/umwelt/rohstoffe-wie-sich-seltene-erden-recyceln-lassen-seite-all/8784164-all.html> (abgerufen am 17.03.2014).
- [52] Axel Rose. Seltene Erden: Durchbruch beim Recycling? *Markt und Mittelstand*, 2013. <http://www.marktundmittelstand.de/nachrichten/produktion-technologie/seltene-erden-durchbruch-beim-recycling/> (abgerufen am 04.02.2014).
- [53] Fraunhofer IFAM Dresden. Hocheffizienter Recycling-Prozess für seltene Erden aus Magnetwerkstoffen entwickelt. *Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung*, 2013. http://www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/Recycling_Seltener_Erden.html (abgerufen am 02.02.2014).
- [54] Doris Schüler. Seltene Erden - Daten und Fakten. *Öko-Institut e. V.*, 2011. <http://www.oeko.de/oekodoc/1110/2011-001-de.pdf> (abgerufen am 14.01.2014).
- [55] Fenna Bley. Kreislauf statt Mülldeponie. *Pictures of the Future*, 2013. http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-spring-2013/_html_de/neue-recyclingverfahren.html (abgerufen am 10.01.2014).
- [56] Reinhard Bütikofer. Seltene Erden und die Neuentdeckung der Rohstoffpolitik. *Die Grünen - Europäische Freie Allianz*, 2013.
- [57] Harald Elsner. Aktuelle BGR-Recherche: Anteil Chinas an weltweiter Seltene Erden-produktion sinkt nur langsam. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2014. <http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/>

Pressemitteilungen/BGR/bgr-140312_Seltene%20Erden.html
(abgerufen am 25.03.2014).

- [58] Hongpo Shen. China's new round of rare earths stockpiling to boost prices. *Investorintel*, 2014. <http://investorintel.com/rare-earth-intel/chinas-new-round-rare-earths-stockpiling-boost-prices/> (abgerufen am 13.04.2014).