



Luitgard Marschall  
Heike Holdinghausen

# Seltene Erden

Umkämpfte Rohstoffe  
des Hightech-Zeitalters

 oekom

Luitgard Marschall, Heike Holdinghausen  
**Seltene Erden**  
Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters  
ISBN 978-3-86581-844-7  
192 Seiten, 14,5 x 23,3 cm, 24,00 Euro  
oekom verlag, München 2017  
©oekom verlag 2017  
[www.oekom.de](http://www.oekom.de)

## Kapitel 1

# Eine gesellige Metallfamilie: Das sind Seltene Erden

Die Seltenen Erden sind die Exoten unter den chemischen Elementen. Lange Zeit waren sie nur Chemikern oder Rohstoffexperten bekannt und auch sie wussten nicht wirklich viel mit ihnen anzufangen. Doch in jüngster Zeit wurden sie für die Industrie immer wichtiger. Heute sind sie eine begehrte und bisweilen sehr teure Rohstoffgruppe. Chinas ehemaliger Staatsführer Deng Xiaoping zeigte früh ein Gespür für ihre Bedeutung, als er sagte: »Der Nahe Osten hat Öl, China hat Seltene Erden.«

Ganz selbstverständlich verfolgen die Medien heutzutage Angebot, Preis und Verwendung der Seltenen Erden sowie den politischen Streit um ihre Verfügbarkeit. In Japan treffend als »Vitamine der Industrie« bezeichnet, wurde den Seltenen Erden vor wenigen Jahren so viel Interesse entgegengebracht wie früher nur Kupfer oder Gold. Und nach wie vor kursieren noch immer viele Mythen über die eigenartigen Metalle – was sie sicher auch ihrem irreführenden Namen verdanken, der, wie so oft, historische Gründe hat.

Naturforscher des 18. Jahrhunderts (und davor) verstanden unter »selten« eben nicht nur Stoffe, die rar waren, sondern auch »seltsam« oder »ungewöhnlich«. Und ungewöhnlich waren die Erze, die sie untersuchten tatsächlich – aber eben nicht »selten«, weshalb das Paradoxon der »nicht seltenen Seltenen Erden« heute gefühlt in jeder dritten Überschrift thematisiert wird, mit der entsprechende Zeitungs- und Zeitschriftenartikel überschrieben sind. Einige von ihnen kommen in der Erdkruste sogar häufiger vor als Blei oder Arsen.<sup>9</sup> Und selbst das seltenste stabile Element der Gruppe – Thulium – findet sich darin noch häufiger als Silber.

Die Metalle sind also nicht selten. Rar machen sie sich trotzdem: Statt geballt in Lagerstätten liegen sie meist großflächig verteilt in äußerst geringen Konzentrationen und immer im Zusammenschluss mit anderen Elementen vor – und sie lassen sich auch nur gemeinsam als Metallfamilie

abbauen. In aufwendigen Prozessen müssen sie daher nach der Förderung voneinander getrennt werden (mehr dazu in Kapitel 5). Lohnende Seltenerdlagerstätten sind daher selten. Das führt dazu, dass der Großteil der abgebauten Seltenen Erden heute als Nebenprodukt anderer Rohstoffvorkommen anfällt, etwa in der größten Mine Bayan Obo in China, in der in der Hauptsache Eisenerz gefördert wird.

### **Verwirrende Namensvielfalt**

Schon die historischen Bezeichnungen für die Metallgruppe waren missverständlich. Und auch heute herrscht eine verwirrende Namensvielfalt: Die Seltenen Erden werden auch als »Selteneroxide« (SEO), »Seltenerdmetalle« (SEM) oder »Seltenerdelemente« (SEE) bezeichnet.

Im Englischen sind die Bezeichnungen »Rare Earth« (RE), »Rare Earth Oxides« (REO), »Rare Earth Metals« (REM) beziehungsweise »Rare Earth Elements« (REE) gebräuchlich.

### **Eng verwandt, doch eigenwillig**

Insgesamt gehören zur Rohstofffamilie der »Seltenen Erden« die 17 Metalle Scandium, Yttrium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium. Die ersten drei, Scandium, Yttrium und Lanthan, finden sich in der dritten Gruppe des Periodensystems. Die restlichen 14 zählen zur Reihe der Lanthanoide, die oftmals als Fußnote ausgekoppelt werden.

Seltenerdmetalle sind chemisch und physikalisch deswegen so interessant, weil sie sich zwar ähneln, jedoch jeweils auch deutliche Eigenheiten besitzen. Deswegen können sie sich zwar in einigen, aber nicht in allen Anwendungen gegenseitig ersetzen.<sup>10</sup> Trotzdem werden sie in entsprechenden Publikationen in der Regel nicht einzeln, sondern als Stofffamilie betrachtet.

Häufig werden die Seltenen Erden in zwei Gruppen eingeteilt, in »leichte« und »schwere«. Entscheidend ist dabei das Atomgewicht, wobei man sich allerdings nicht immer einig ist: In unterschiedlichen Quellen werden ver-

schiedene Einteilungen vorgenommen. In der Regel gelten die Elemente Lanthan bis Europium als »leichte« Seltene Erden, die Elemente Gadolinium bis Lutetium sowie das Yttrium als ihre »schweren« Pendanten. Das ist insofern bedeutsam, als dass die leichten Seltenen Erden in der Erdkruste häufiger vorkommen und – der Name passt – auch leichter gewonnen werden können als die schweren. Insbesondere Letztere sind also gemeint, wenn von einem »knappen« Rohstoff die Rede ist. Im chinesischen Bayan Obo, wo sich eine der wichtigsten Lagerstätten der Welt befindet, gehören über 97 Prozent aller abgebauten Seltenerdoxide zur leichten Gruppe.<sup>11</sup> Es sind allerdings wiederum die schweren Seltenen Erden, die in »grünen Techno-logien« wie Windkraftanlagen oder Elektromotoren verwendet werden.

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026					
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122	Seltene Erden (SE)										Leichte seltene Erden (LSE)					boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305	Schwere seltene Erden (SSE)										aluminium 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948					
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80					
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 101.07	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.6	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29					
cesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	* 57-70	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	wolfram 74 W 183.84	reuterium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]					
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	* *	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [265]	meitnerium 109 Mt [268]	unnilium 110 Uun [271]	ununium 111 Uuu [272]	uubium 112 Uub [277]											
* Lanthanide series		lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.05	lutetium 71 Lu 174.97						
** Actinide series		actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]	lawrencium 103 Lr [260]						

Abbildung 1 Periodensystem der Elemente, darin markiert die Position der Seltenen Erden

Quelle: TU Clausthal

## Gleichmäßig verteilt und schwer zu finden

Die Seltenen Erden sind in der Erdkruste im Schnitt mit einer geschätzten Konzentration von 9.2 ppm (parts per million) vertreten.<sup>12</sup> Doch die Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen sind groß. Der Anteil des

seltensten der stabilen Seltenerdelemente, des Thuliums, in der Erdkruste liegt bei nur 0,28 ppm. Cer kommt mit 43 ppm viel häufiger vor. Zum Vergleich: Kupfer liegt in einer Konzentration von 27 ppm vor, Blei liegt bei 11 ppm.<sup>13</sup> Anders als diese beiden liegen Seltene Erden aber nie als reine (gediegene) Metalle vor.

Über 200 Mineralien sind bekannt, welche Seltene Erden zumindest in Spuren enthalten.<sup>14</sup> Doch fast immer sind sie in ein anderes Gestein eingesprenkt oder vermischen sich, zusammen mit anderen Mineralien, zu Sanden. Darum lassen sich die begehrten Metalle mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten nur aus einigen wenigen Mineralien kommerziell gewinnen: aus Bastnäsit, Monazit und Xenotim. Als potenziell förderwürdig gelten die Minerale Allanit, Apatit und Perowskit.<sup>15</sup> Vor allem in Südchina gibt es darüber hinaus Vorkommen »ionenabsorbierender Tone«, aus denen sich ebenfalls wirtschaftlich Seltene Erden isolieren lassen, und zwar vor allem die schweren Seltene Erden. Diese finden sich auch in Xenotim. Bastnäsit und Monazit hingegen liefern vor allem leichte Seltene Erden.

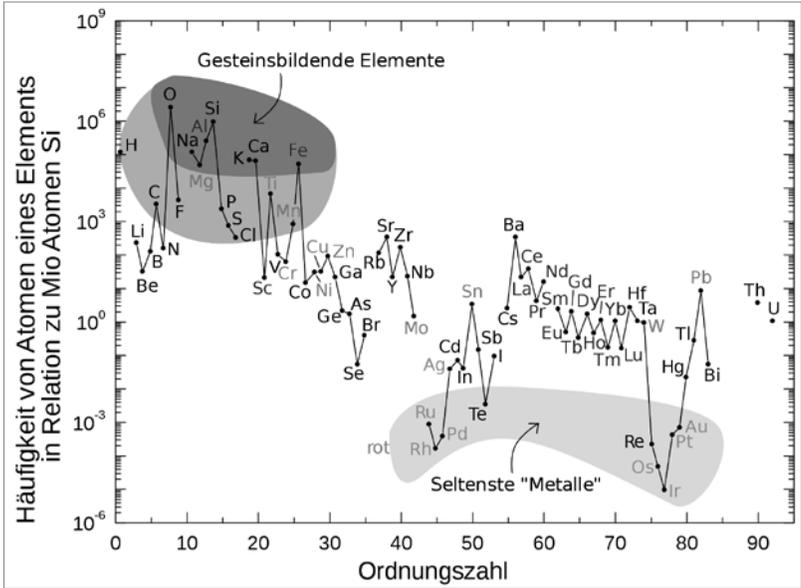


Abbildung 2 Relative Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste  
 Quelle: Haxel et al. 2002

Die derzeit wichtigste Quelle für Seltene Erden ist Bastnäsit-Erz, benannt nach seinem ersten Fundort Bastnäs in Schweden. Unter diesem Sammelnamen vereinen sich verschiedene Lanthanoid-Fluorcarbonate, die reichlich Cer, Lanthan und Yttrium beinhalten.<sup>16</sup> Große Lagerstätten sind derzeit in den USA, in China und in verschiedenen GUS-Staaten bekannt. Beinahe zufällig wurde 1949 ein riesiges Bastnäsit-Vorkommen in Kalifornien entdeckt, das seit den 1960er-Jahren im Tagebau abgebaut wurde. Für über 30 Jahre war die kalifornische Mine Mountain Pass der weltweit größte Produzent von Yttrium, Europium und weiteren Seltenerdmetallen. In den späten 90er-Jahren begann dann China, seine eigenen, riesigen Schätze an Seltenen Erden zu fördern und überholte die USA schließlich mengenmäßig. Die fast monopolartige Stellung Chinas auf dem Seltenerdmarkt ist also noch vergleichsweise neuen Datums.

Bei Monazit-Erzen sieht die Sache etwas anders aus. Auch Monazit ist eine Sammelbezeichnung, mit der verschiedene Lanthanoid-Thorium-Phosphate beschrieben werden.<sup>17</sup> Darin enthalten sind vor allem Cer, Lanthan, Neodym und Praseodym, aber auch, im Vergleich zum Bastnäsit-Erz, etwas mehr schwere Seltene Erden. Monazite enthalten aber auch radioaktive Elemente, bis zu einem Prozent Uran und bis zu 20 Prozent Thorium. Wer an die Seltenen Erden heran will, schafft daher unweigerlich strahlenden Abfall. Um Umwelt- und Gesundheitsrisiken zu vermeiden oder wenigstens so gering wie möglich zu halten, sind in den Bergwerken und Fabriken, in denen Monazit gewonnen und verarbeitet wird, spezielle Sicherheitsvorkehrungen notwendig.

## Von Brasilien bis Cuxhaven

Im Bergbau werden zwei Typen von Lagerstätten unterschieden: Sogenannte primäre und sekundäre. Primäre oder magmatische Lagerstätten haben sich gebildet, als geschmolzenes Gestein erstarrte. Sekundäre oder sedimentäre Lagerstätten sind hingegen entstanden, weil Gesteine verwitterten oder ausgewaschen wurden. Das dabei gelockerte Material ist durch Wasser an andere Orte gespült oder durch den Wind verweht worden. Monazit-Erze finden sich in beiden Typen von Lagerstätten; die westaus-

tralische Mine Mount Weld, die Mine Naboomspruit in Südafrika sowie die schon erwähnten Minen Bayan Obo und Mountain Pass sind primäre Lagerstätten. In ihnen liegen die Seltenen Erden allerdings nur in geringen Konzentrationen und in sehr hartem Begleitgestein vor. Das macht es wenig rentabel, sie zu fördern. Monazit ist ökonomisch eher interessant, wenn es als Sand an Fluss- oder Meeresufern lagert. Diese »Seifenlagerstätten« als Vorkommen sekundären Typs wurden bislang an der Südwestküste Indiens entdeckt, in Brasilien, Madagaskar, Sri Lanka, Thailand und Malaysia. Eine große Tradition haben dabei die Monazit-Seifen in Brasilien und Indien. Es waren die ersten ihrer Art, entdeckt am Ende des 19. Jahrhunderts. Sie stellten lange Zeit die Hauptquelle für Seltene Erden dar, bis die Bergleute in Mountain Pass ihre Arbeit aufnahmen. Monazit-Sande gibt es auch in Europa, beispielsweise an der Nordseeküste bei Cuxhaven und Hanstholm oder in Norwegen und im Ural. Bislang werden sie aber nicht abgebaut.

Die für grüne Zukunftstechnologien sowie für Kommunikationsmittel besonders gefragten schweren Seltenen Erden wie Dysprosium oder Ytterbium sind vor allem in Xenotim enthalten. Diese Mischung aus Lanthanoid-Phosphaten enthält beinahe alles, was ein moderner Flachbildfernseher begehrt: Mit einem Anteil von 55 bis 60 Prozent vergleichsweise viel Yttrium; Dysprosium ist mit etwa neun Prozent vertreten, Ytterbium mit sechs und Erbium mit zirka fünf Prozent. Diese Konzentrationen gelten insgesamt als hoch.<sup>18</sup> Allerdings kommen die Seltenen Erden im Xenotim, wie im Monazit, zusammen mit Uran und Thorium vor, sodass die Lagerstätten in China, Brasilien, Australien und den USA mit Radioaktivität zu kämpfen haben. Dies gilt auch für die Zinngruben von Malaysia, Indonesien und Thailand, in denen das Erz in der Vergangenheit als Nebenprodukt gefördert wurde.

Seltene Erden abzubauen und herzustellen, ist aus mehrerlei Gründen eine schmutzige und bisweilen gefährliche Prozedur (mehr dazu im Kapitel 5). Besondere Probleme hat in den vergangenen Jahrzehnten der Abbau sogenannter ionenabsorbierender Tone bereitet. Sie stellen den Großteil der schweren Seltenen Erden, die derzeit gehandelt werden. Die Tone enthalten zwar nur wenige radioaktive Elemente und können an ihren

Fundorten meist im Tagebau abgebaut werden. In den südchinesischen Provinzen Szechuan, Jiangxi und Fujian, in denen die derzeit bekannten Vorkommen liegen, werden sie aber häufig im »Kleinbergbau« gefördert. Dazu pumpen die Bergleute oder die Anwohner meist Säure und andere Chemikalien in die Erde, um die Seltenen Erden zu lösen. Umweltschutzmaßnahmen werden in diesen meist illegalen Tagebauen nicht getroffen – die Schäden für Mensch und Umwelt sind enorm.

## Zu Wasser, zu Lande – und im All

Besondere öffentliche Aufmerksamkeit genießen Seltenerdvorkommen dann, wenn sie an spektakulären Orten aufgefunden oder vermutet werden. Etwa, wenn Weltraumforscher und Internetmilliardäre verkünden, Asteroiden im All auf ihre Rohstoffvorkommen hin zu untersuchen und sie ökonomisch zu verwerten; oder wenn die Industrieländer sich im nordöstlichen oder im südwestlichen Pazifik die Rechte kaufen, die auf dem Meeresboden liegenden Manganknollen auf ihre wertvollen Inhalte hin zu untersuchen. Auch die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe schickt beständig Forschungsschiffe in die Welt. Allerdings liegen die Knollen, die unter anderem Seltene Erden enthalten, in 3500 bis 6000 Metern Tiefe – und entziehen sich so den heutigen Möglichkeiten der Bergbauingenieure. Dabei muss die Menschheit weder in den Himmel fliegen noch in Meerestiefen tauchen, um auf Seltene Erden zu treffen: In der Erdkruste sind sie schließlich relativ häufig – wenn auch nur selten hochkonzentriert.

In einer guten Eisenerzmine finden Bergbauunternehmen Erze mit einem Eisengehalt von etwa 70 Prozent vor.<sup>19</sup> In Bezug auf Seltene Erden sprechen Geologen schon dann von einer Lagerstätte, wenn die Konzentration der Metalle im Erz größer ist als 0,1 Prozent ist; eine Tonne Gestein enthält dann ein Kilogramm Seltene Erden. Es kommt aber nicht nur auf den Seltenerdgehalt an. Ob eine Lagerstätte rentabel ausgebeutet werden kann, liegt auch an ökonomischen, ökologischen, politischen und sozialen Faktoren. Beispielsweise muss eine leistungsfähige Infrastruktur vorhanden sein, um die gewonnenen Erze oder Metalle abtransportieren zu können.

## Reserven – Ressourcen

### *Reserven*

Reserven sind Vorkommen von Rohstoffen, die in der Erdkruste sicher nachgewiesen sind und mit heute bekannten technischen Mitteln wirtschaftlich abgebaut werden können.

### *Ressourcen*

Ressourcen sind Vorkommen, die aufgrund verschiedener geologischer Hinweise vermutet werden, die aber nicht sicher nachgewiesen sind. Mit bekannten Mitteln sind sie nicht wirtschaftlich zu fördern.

Ändert sich die Weltmarktlage und die Rohstoffpreise steigen oder sinken, oder werden neue Abbautechniken entwickelt, können Reserven zu Ressourcen werden – oder umgekehrt.

Der US-amerikanische Geological Survey (USGS) schätzte die Menge der weltweiten Reserven an Seltenen Erden im Jahr 2015 auf 130.000.000 Tonnen.<sup>20</sup> Für 2014 gibt die Behörde eine weltweite Primärgewinnung von 110.000 Tonnen an. Beruhigende Zahlen, denn nach diesen Berechnungen wäre die Versorgung der Industrie mit Seltenen Erden für die nächsten 1200 Jahre gesichert. Allerdings sind solche Gleichungen mit Vorsicht zu genießen, denn sie zeigen nur die »statische Reichweite« an. Das heißt, sie berechnen die Reichweite aus den derzeit verfügbaren Reserven und dem aktuellen Verbrauch – und bieten damit immer nur eine Momentaufnahme. Weder berücksichtigen sie den steigenden Verbrauch der Metalle, noch ihren Lebenszyklus (also etwa Recyclingraten) oder die Erschließung neuer Lagerstätten.

Rund 43 Prozent der weltweiten Reserven liegen laut Tabelle 1 in China. Die dortigen Lagerstätten sind im Norden vor allem reich an leichten Seltenerdelementen. Im Süden zeichnen sie sich durch besonders hohe Anteile an schweren Seltenen Erden aus.<sup>21</sup> Neben China verfügen auch Brasilien, Indien, Russland, Grönland, Australien, Nordkorea, Kanada und die USA über beträchtliche Mengen an Reserven, deren genaue Seltenerdzusammensetzung von Lagerstätte zu Lagerstätte variiert. Die Begehrlichkeiten von Rohstoffkonzernen wecken vor allem die Vorkommen im Süden

Grönlands (Kvanefeld), die besonders reich an den begehrten schweren Seltenen Erden – und auch an Uran – sind. Problematisch im Hinblick auf die Vorkommen in Russland, Grönland und zum Teil auch in Kanada ist, dass sie in Permafrostböden lagern – es gibt kaum Straßen oder Schienenwege, mit denen sie erschlossen werden können.

**Tabelle1 Weltminenproduktion von Seltenen Erden & Reserven weltweit.**

Länder	Minenproduktion 2014 (Tonnen, gerundet)	Reserven (Tonnen, gerundet)
USA	7.000	1.800.000
Australien	2.500	3.200.000
Brasilien	-----	22.000.000
China	95.000	55.000.000
Indien	3.000	3.100.000
Malaysia	200	30.000
Russland	2.500	**
Thailand	1.100	k. A. v. *
Vietnam	200	**
Andere Länder	k. A. v.	41.000.000
weltweit	110.000	130.000.000
* k. A. v.: Keine Angaben verfügbar; ** enthalten unter »Andere Länder«		

Quelle: USGS 2015

In Europa gibt es – vom rechtlich zu Dänemark gehörenden Grönland einmal abgesehen – keine bedeutenden Seltenerdorkommen. Kleinere Bestände lagern in Norwegen und der Türkei; in Nordschweden werden Seltenerdmetalle als Nebenprodukt des Eisenabbaus gefördert.<sup>22</sup> Auch Sachsen verfügt über eine Lagerstätte: Die 2012 in Storkwitz aufgenommenen Explorationsarbeiten, wo schätzungsweise 40.000 Tonnen Seltenerdoxide bis zu 1200 Meter tief in der Erde lagern, haben damals für viel Aufsehen in den Medien gesorgt. Global betrachtet, handelt es sich nur um ein marginales Vorkommen. Aufgrund der vor einigen Jahren stark angespannten Preis- und Nachfragesituation wurde die Storkwitzer Lagerstätte aber als wichtige strategische Reserve für das importabhängige Deutschland betrachtet und erste Schritte wurden unternommen, sie zu erschließen. Inzwischen hat sich die Lage auf dem Seltenerdmarkt aber deutlich

entspannt. Daher wird in Nordsachsen in absehbarer Zeit wohl kein Selten-  
erdbaubau stattfinden. Die Abbaulizenz wurde 2015 von der zuständigen  
Ceritech-AG an das Sächsische Oberbergamt zurückgegeben.

## **Ähnlich, aber nicht gleich: chemische und physikalische Eigenschaften**

Alle 17 Metalle der Seltenen Erden sind dreiwertig, können also pro Atom bis zu drei Wasserstoffatome an sich binden. Manche von ihnen weisen zusätzlich eine Zwei- oder Vierwertigkeit auf. Bestimmte Eigenschaften der Stoffgruppe verändern sich periodisch, also diskontinuierlich von einem Element zum nächsten, beispielsweise Dichte, Farbe, Schmelzpunkt oder magnetisches Moment. Andere Kennzeichen wechseln hingegen aperiodisch, also stetig und fortlaufend von einem Metall zum nächsten. So nehmen etwa die Ionenradien oder die Basizität mit wachsender Kernladungszahl kontinuierlich ab (siehe auch Abbildung A1 im Anhang, Seite 175).

Herausragendes Merkmal der Elemente sind ihre beinahe identischen chemischen Eigenschaften. Die 1794 entdeckte »Yttererde« wurde von zeitgenössischen Chemikern daher zunächst als ein einzelnes Element eingestuft. Die Metalle ähneln sich deshalb so sehr, weil sie über eine besondere Elektronenkonfiguration verfügen; das heißt, sie verteilen die Elektronen um ihren Atomkern auf eine spezielle Weise. Seltene Erden sind innere Übergangs- beziehungsweise 4f-Metalle. Ihre äußere Elektronenhülle ist jeweils gleich besetzt. Doch weiter innen – in schematischen Darstellungen werden die Aufenthaltsorte für Elektronen, die Orbitale, als Ringe angegeben – unterscheiden sie sich (siehe auch Abbildung A2 im Anhang, Seite 176). Beginnend bei Cer wird das 4f-Orbital sukzessive mit Elektronen aufgefüllt. Bei Lutetium angekommen, ist es schließlich mit 14 Elektronen vollständig besetzt. Da aber für das chemische Verhalten von Atomen vor allem die Besetzung der Außenorbitale ausschlaggebend ist, zeigen Seltenerdmetalle allesamt ein fast identisches Reaktionsmuster.

Das vergleichbare Reaktionsverhalten der einzelnen Elemente wirkt sich auf den Raffinationsprozess bei der Seltenerdherstellung aus und macht ihn

aufwendig und kostenintensiv. Um die einzelnen Metalloxide in Reinform durch die gängige Lösungsmittelextraktion zu erhalten, sind insgesamt weit über 1000 Trennstufen notwendig.<sup>23</sup> Das Seltenerdoxidgemisch wird zunächst in Wasser gelöst und mit verschiedenen organischen Lösungsmitteln vermischt. In den Lösungsmitteln sind Extraktionsmittel enthalten, die sich verschieden stark an die unterschiedlichen Seltenerdoxide binden. Dadurch reichern sich diese in verschiedenen Lösungsmittelphasen an und können so isoliert werden.

Das 4f-Orbital ist auch verantwortlich für die sogenannte »Lanthanoidenkontraktion«, die im Periodensystem der Elemente einzigartig ist. Bei den Lanthanoiden vergrößern sich die Ionenradien nicht – wie sonst üblich – mit zunehmendem Atomgewicht, sondern sie verkleinern sich. Die Ursache ist in den besonderen Eigenschaften der 4f-Orbitale begründet: Da relativ groß und diffus geformt, sind die hier enthaltenen Elektronen weniger stark an einen Ort gebunden als in anderen Orbitalen. Infolgedessen wird die mit zunehmender Ordnungszahl steigende Kernladung immer schlechter abgeschirmt, wodurch die Elektronen der äußeren Orbitale immer stärker zum Kern hingezogen werden. Die Kontraktion lässt die Ionen schrumpfen. Dieser Effekt ist so stark, dass beispielsweise Dysprosium (Ordnungszahl 66) bei doppeltem Atomgewicht den gleichen Ionenradius aufweist wie Yttrium (Ordnungszahl 39). Die Lanthanoidenkontraktion bewirkt, dass alle Seltenerdmetalle ähnlich große Ionenradien haben. Bei der Gesteinsbildung in der Lithosphäre wurden daher alle in die gleichen Mineralien eingebaut, weshalb sie immer vergesellschaftet vorliegen. Auch bestimmte aperiodische Eigenschaften wie die Abnahme der Basizität oder die gesteigerte Komplexbildungstendenz bei wachsender Kernladungszahl lassen sich damit begründen.

## Problematische Gesellschaft

Dass Seltenerdmetalle häufig zusammen mit Calcium, Thorium und Uran vorkommen, liegt an ihren ähnlich großen Ionenradien (siehe Tabelle A1 im Anhang, Seite 176). Im Falle der radioaktiven Elemente Thorium und Uran ist dies bei der Seltenerdgewinnung problematisch, da die gleichzei-

tige Mobilisierung der radioaktiven Elemente beim Abbau zu beträchtlichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken führen kann.

Ein anderes Problem: Im menschlichen Körper können die ähnlichen Ionenradien dazu führen, dass Seltenerdmetalle die Position von Calcium einnehmen und zu dessen Verdrängung führen, etwa in den Knochen.

Auch hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften weisen Seltenerdmetalle gruppenspezifische Besonderheiten auf, die sich auf die 4f-Orbitale zurückführen lassen. Dies betrifft in erster Linie ihre optischen und magnetischen Eigenschaften. So besitzen sie etwa die Fähigkeit zur Fluoreszenz, emittieren also, als Folge einer vorhergehenden nichtthermischen Energieaufnahme, Licht. Diese Eigenschaft lässt sich bei den Seltenen Erden noch durch die Zugabe von Liganden, also Atomen oder Molekülen, die an die Seltenen Erden andocken, verstärken. Aufgrund ihrer fluoreszierenden Eigenschaften sind Seltene Erden wichtige Bestandteile von Leuchtstoffen, die für die Herstellung von Energiesparlampen, Leuchtstoffröhren, Farbfernseher oder Laser Verwendung finden. Außerdem sind Seltene Erden zum Teil sehr magnetisch. In Verbindung mit anderen Metallen bilden sie starke Dauermagnete. Die wichtigsten Grundlegierungen für Permanentmagnete sind Neodym-Eisen-Bor und Samarium-Cobalt. Im Vergleich zu anderen Magneten verfügen sie auch bei geringer Größe über eine enorme magnetische Kraft. Seltenerd-dauermagnete sind in Hightech-Geräten und grünen Technologien wie in bestimmten Typen von Windrädern oder Elektromotoren enthalten. Sie waren eine der stofflichen Voraussetzungen dafür, dass Verbrauchsgüter wie MP3-Player oder Mobiltelefone immer kleiner werden konnten.

## **Viele offene Fragen: Gefahren für Mensch und Umwelt**

Seltene Erden werden erst seit rund 15 Jahren in Hochtechnologiebereichen eingesetzt. Darum gelangen sie auch erst seit kurzer Zeit vermehrt in die Umwelt. Welche Folgen diese Exposition hat, ist bislang weitgehend unklar. Aufgrund der derzeitigen Forschungslage gehen Wissenschaftler davon aus, dass sie für Menschen nicht giftig sind.<sup>24</sup> Allerdings geben einige Stu-

dien Anlass zur Sorge, wenn die Metalle in hohen Dosen auf Mensch oder Tier treffen. Ihr etwaiger Einbau in die Knochenstruktur führt dazu, dass sie für längere Zeit im Körper verbleiben, was die Möglichkeit einer potenziellen Schädigung erhöht. Außerdem können Seltenerdmetalle auch als biologische Gegenspieler von Calciumionen wirken; ihre hohe Affinität zu Phosphationen verändert möglicherweise die Aktivität von Eiweißstoffen im Körper. Bei einer Langzeitexposition mit Seltenen Erden wurden Lungen- oder Leberschäden festgestellt; Yttrium und Lanthan stehen unter Verdacht, Tumore zu verursachen<sup>25</sup>.

In allen Phasen ihres Lebenszyklus können Seltene Erden unkontrolliert in Luft, Wasser und Boden austreten und sich dort fein verteilen. Problematisch für die Umwelt sind dabei vor allem wasserlösliche Verbindungen, da sie sich schnell verbreiten, wie beispielsweise einige ihrer anorganischen Salze, die als Zwischenprodukte gehandelt werden, oder auch Arznei- und Kontrastmittel. Letztere werden nach der Einnahme mit dem Urin ausgeschieden und fließen dann mit dem Abwasser in Kläranlagen. Da sie dort nicht zurückgehalten werden, reichern sie sich in den Oberflächengewässern an. Je nach Konzentration kann dies das Nervensystem oder die Fortpflanzungsfähigkeit von Wasserlebewesen beeinträchtigen.<sup>26</sup> Als Bestandteil phosphathaltiger Mineraldünger werden Seltene Erden direkt in Böden ausgebracht und dort von den Pflanzen aufgenommen. Allerdings nur geringe Mengen, denn die Seltenerdmetallphosphate sind sehr schwer löslich.<sup>27</sup> Die größere Menge verbleibt im Boden. Die US-Umwelt- und Gesundheitsschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency) hat einen umfassenden Überblick über den derzeitigen Wissensstand veröffentlicht.

Zwar legt der heutige Kenntnisstand nahe, dass die Seltenen Erden in der Umwelt nicht besonders gefährlich sind. Allerdings liegen Studien zum Umweltverhalten der Stoffgruppe bislang nur vereinzelt vor – angesichts der rapide steigenden Nutzungsmengen besteht hier dringender Forschungsbedarf. Was fehlt, sind vor allem Langzeitstudien.<sup>28</sup>