



Luitgard Marschall
Heike Holdinghausen

Seltene Erden

Umkämpfte Rohstoffe
des Hightech-Zeitalters

Dieses Buch basiert auf Forschungsarbeiten zu den Seltenen Erden, die von Fraunhofer ISC/IWKS finanziell unterstützt wurden.



Selbstverpflichtung zum nachhaltigen Publizieren

Nicht nur publizistisch, sondern auch als Unternehmen setzt sich der oekom verlag konsequent für Nachhaltigkeit ein. Alle durch diese Publikation verursachten CO₂-Emissionen werden durch Investitionen in ein Gold-Standard-Projekt kompensiert. Die Mehrkosten hierfür trägt der Verlag.

Mehr Informationen finden Sie unter:

<http://www.oekom.de/allgemeine-verlagsinformationen/nachhaltigerverlag.html>

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Seltene Erden

Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters
in der Reihe »Stoffgeschichten«

© 2018 oekom verlag, München

Gesellschaft für ökologische Kommunikation mbH
Waltherstraße 29, 80337 München

Lektorat: Christoph Hirsch, oekom verlag
Umschlaggestaltung: Büro Jorge Schmidt, München
Umschlagabbildungen: iStock (Handy), Picture Alliance (Probengläser);
FH Münster (Rückseite); die Abbildung zeigt Oxide und Phosphate Seltener Erden),
shutterstock (Kapitelaufmacher)
Innen Layout + Satz: Markus Miller
Druck: GGP Media GmbH, Pößneck

Dieses Produkt ist auf Druckpapier gefertigt, das nach den Richtlinien des Forest Stewardship Council® (FSC®) für verantwortungsvolle Waldbewirtschaftung zertifiziert ist.

Alle Rechte vorbehalten
ISBN 978-3-86581-844-7

Luitgard Marschall
Heike Holdinghausen

Seltene Erden

*Umkämpfte Rohstoffe
des Hightech-Zeitalters*

Stoffgeschichten – Band 10

Eine Buchreihe des Wissenschaftszentrums Umwelt der Universität Augsburg in Kooperation mit dem oekom e.V.

Herausgegeben von Prof. Dr. Armin Reller und Dr. Jens Soentgen

Die Dinge und Materialien, mit denen wir täglich hantieren, haben oft weite Wege hinter sich, ehe sie zu uns gelangen. Ihre wechselvolle Vorgeschichte wird aber im fertigen Produkt ausgeblendet. Was wir an der Kasse kaufen, präsentiert sich uns als neu und geschichtslos. Wenn man seiner Vorgeschichte nachgeht, stößt man auf Überraschendes und Erstaunliches. Auch Verdrängtes und Fragwürdiges taucht auf. Am Leitfaden der Stoffe zeigen sich in scharfer, neuartiger Beleuchtung die ökologischen und politischen Konflikte unserer globalisierten Welt.

Deshalb stellen die Bände der Reihe Stoffgeschichten einzelne Stoffe in den Mittelpunkt. Sie sind die oftmals widerspenstigen Helden, die eigensinnigen Protagonisten unserer Geschichten. Ausgewählt und dargestellt werden Stoffe, die gesellschaftlich, ökologisch und politisch relevant sind, Stoffe, die Geschichte schreiben oder geschrieben haben. Stoffgeschichten erzählen von den Landschaften, von den gesellschaftlichen Szenen, die jene Stoffe, mit denen wir täglich umgehen durchquert haben. Sie berichten von den globalen Wegen, die viele Stoffe hinter sich haben und blicken von dort aus in die Zukunft.

»Seltene Erden« ist der zehnte Band der Reihe. Er befasst sich mit einer Gruppe von 17 Elementen, die in den letzten zwei Jahrzehnten immer wieder die Schlagzeilen beherrschten, weil sie nicht nur für die digitale Welt, für Smartphones und Computer, sondern auch für die Energiewende oder die Elektromobilität unerlässlich sind – ganz abgesehen von ihrer Bedeutung für die Militärtechnologie. In der öffentlichen Diskussion stehen bisher vor allem die technischen und ökonomischen Aspekte im Vordergrund. Dieses Buch deckt demgegenüber auch die ökologischen und politischen Konflikte auf, die im Endprodukt nicht mehr sichtbar sind. Zugleich werden Perspektiven für eine nachhaltigere Nutzung dieser wichtigen Substanzen aufgezeigt.

Inhalt

Einleitung	
Postfossil und digital: Seltene Erden als Metalle unserer Zeit	7
Kapitel 1	
Eine gesellige Metallfamilie: Das sind Seltene Erden	15
Kapitel 2	
Am Anfang war der Glühstrumpf: Geschichte ihrer Nutzung	29
Kapitel 3	
Die »Vitamine« der Industrie	55
Kapitel 4	
Der globale Markt für Seltene Erden	71
Kapitel 5	
Vom Mineral zum Metall: Abbau und Gewinnung	89
Kapitel 6	
Aus der Inneren Mongolei in den Rhein: Feinverteilung über den ganzen Globus	129
Kapitel 7	
Recycling: In der Theorie gut, in der Praxis...	139
Kapitel 8	
Auf der Suche nach ebenbürtigen Alternativen: Substitution	157
Epilog	
Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Versorgung	170
Anhang	
Chemisch-physikalische Eigenschaften der Seltenen Erden	175
Anmerkungen	177
Literaturverzeichnis	182
Über die Autorinnen	191

Einleitung

Postfossil und digital: Seltene Erden als Metalle unserer Zeit

Der wichtigste Rohstoff der deutschen Industrie ist der Erfindungsgeist ihrer Ingenieure. Dieses oft verwendete Bonmot ist natürlich richtig, aber ganz ehrlich ist es nicht. Denn ohne Eisen und Stahl, Kupfer und Aluminium, Wolfram, Neodym und Lithium kommt auch der klügste Ingenieur nicht weit. Was sich banal anhört, war in Unternehmen und Öffentlichkeit erstaunlicherweise lange Zeit kein Thema. Für die Wirtschaft schien es selbstverständlich zu sein, garantiert und zu akzeptablen Preisen über notwendige Stoffe verfügen zu können.

Doch dann kam das Jahr 2008, in dem fast alle wichtigen Rohstoffe sehr schnell unglaublich teuer wurden. Kurz danach stürzten die Preise stark ab. Die Unternehmen mussten sich wohl, urteilten Experten, künftig auf weniger stabile, vielmehr stark schwankende Preise einstellen. Zwei Jahre später, Unternehmen und Staaten kämpften mit der Wirtschafts- und Finanzkrise, gab China bekannt, dass es den Export Seltener Erden einschränken werde. Schon vorher hatte sich angedeutet, dass das Riesenreich andere Pläne hatte, als seine kostbaren Metalle zu Spottpreisen an die Industrienationen zu liefern; lieber würde die Regierung sie für eigene politische und wirtschaftliche Zwecke verwenden. Nun waren Industrie und Politik in den USA und Europa ernsthaft alarmiert, denn die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen insgesamt schien nicht mehr sicher. So gelangte das Rohstoffthema ganz oben auf die wirtschaftspolitische Agenda. Der amerikanische Präsident drohte China mit einem Verfahren vor der Welthandelsorganisation WTO und tatsächlich kam es bald darauf zu einem langen Handelsstreit. Die deutsche Bundeskanzlerin Angela Merkel thematisierte die Seltenen Erden auf einer Chinareise und mahnte offene Märkte an. In Deutschland meldeten sich besorgt die Unternehmen zu Wort: »Bosch befürchtet Engpass bei wichtigen Rohstoffen«, meldete eine Nachrichtenagentur, eine andere sah »Reserven nur noch für vier Wochen«.¹

Die Metalle der Seltenen Erden standen im Zentrum für diese Entwicklung. Obwohl sie meist nur in kleinsten Mengen verwendet werden und ihre weltweite Jahresproduktion mühelos in einem Massengutfrachter Platz hätte, besitzen die meisten der 17 Metalle, die unter der Bezeichnung »Seltene Erden« zusammengefasst werden, eine große strategische Bedeutung – etwa in der Militärtechnologie oder der Kommunikations- und Energietechnik. Einzelnen betrachtet, finden einige von ihnen häufiger Verwendung, etwa die supermagnetischen Elemente Neodym und Praseodym in Windturbinen. Andere haben geringe(re)n praktischen Nutzen, etwa metallisches Lutetium, das in kleinen Mengen als Katalysator in der Erdöl-Raffination eingesetzt wird.

Egal, ob sie häufig oder weniger häufig gebraucht, ob sie in kleinen oder sehr kleinen Mengen eingesetzt werden: Seltene Erden sind »Enabler« – »Möglichmacher« – von bestimmten Produkten und somit unverzichtbare Grundlage ganzer Industriezweige. Aufgrund ihrer besonderen Materialeigenschaften finden sie sich in zahllosen Produkten, in Mobiltelefonen, Laptops, elektrischen Zahnbürsten, Windrädern, Hybrid- und Elektroautos; sie sind in Lasersystemen und Beleuchtungsmitteln verbaut, von der Energiesparlampe bis zum Leuchtkugelschreiber. Darüber hinaus ermöglichen sie als Katalysatoren den reibungslosen und effizienten Ablauf vieler Produktionsprozesse, vor allem in der Erdöl- und Chemieindustrie. Ohne sie zu bemerken, gestalten wir unseren modernen Alltag von früh bis spät mit Hilfe der Seltenen Erden.

Von der Ankündigung Chinas – Quasi-Monopolist in der Produktion der Seltenen Erden – den Export der Metalle zu begrenzen oder gar einzustellen, fühlten sich die Industriegesellschaften also zu Recht existenziell bedroht.

War da was?

Umso erstaunlicher ist die Lage fünf Jahre später: »Der Hype um die Seltenen Erden ist vorbei«, heißt es 2015 lapidar in der Presse.² Die US-amerikanische Mine Mountain Pass, nach Jahren des Stillstands 2010 unter großer öffentlicher Aufmerksamkeit als Konkurrenz zu China wieder eröffnet, hat

ihren Betrieb inzwischen schon wieder eingestellt; die Anleger an der Börse sitzen auf einmal auf schlechten Rohstoffpapieren. Das so besorgniserregende Thema hat fünf Jahre später scheinbar seine Wirkung verloren. Neue Vorkommen wurden entdeckt, die Industrie habe durch den Ersatz Seltener Erden durch andere Metalle oder durch neue Technologien große Mengen an Seltenerdmetallen eingespart, heißt es. Wichtiger als die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen sei für die Unternehmen inzwischen, den Eintritt in das digitale Zeitalter, die »Industrie 4.0«, nicht zu verpassen.³

Die große Aufregung und das nachfolgende Desinteresse passt gut zu den Metallen der Seltenen Erden, denn ihre Geschichte war schon immer voller Missverständnisse und Fehldeutungen. Chemiker aus Schweden, Finnland, Deutschland, Frankreich, Österreich und der Schweiz, die angetreten sind, um die Rätsel um die Seltenen Erden zu lösen, kämpften seit dem 18. Jahrhundert mit dürftigen Kommunikationsmöglichkeiten und unzweckmäßigen Analyse- und Trennmethode.⁴ Sie arbeiteten zur gleichen Zeit an denselben Fragestellungen, ohne sich austauschen zu können; immer wieder warfen ungenaue und fehlerhafte Experimente und Berichte den Erkenntnisprozess zurück. Zum Teil verschwendeten die Wissenschaftler viel Zeit und Energie, um ihre Ansprüche als Erstentdecker oder Namensgeber durchzusetzen.

Insgesamt vergingen mehr als 150 Jahre, ehe alle 17 Elemente entdeckt und beschrieben waren. Heute bezeichnet die »International Union of Pure and Applied Chemistry« (IUPAC) mit dem Sammelnamen »Seltene Erden« oder »Seltenerdmetalle« Elemente des Periodensystems mit den Protonenzahlen 21 und 39 sowie 57 bis 71. Letztere tragen auch noch den alten Namen »Lanthanoide«, verliehen durch das Element mit der Ordnungszahl 57, das Metall Lanthan. In der Gruppe der Seltenen Erden werden jedenfalls folgende Metalle mit teils exotisch klingenden Namen zusammengefasst: Scandium, Yttrium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium.

Es begann in Ytterby

Ende des 18. Jahrhunderts – in Paris braute sich die Französische Revolution zusammen, überall in Europa wurden die Ideen der Aufklärer diskutiert – war der Soldat Carl Axel Arrhenius in dem Festungsstädtchen Vaxholm in den Schären vor Stockholm stationiert. Er interessierte sich für die Naturwissenschaften, besonders für Mineralogie und Chemie. 1787 reiste er nach Paris und traf dort den berühmten Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier, der die moderne Chemie als Naturwissenschaft mitbegründete. Lavoisier war darüber hinaus Jurist – und einer der Inspektoren der Französischen Schießpulverfabriken. In diesem Amt sollte ihm Arrhenius in Schweden später nachfolgen – so, wie er der »neuen Chemie« Lavoisiers folgte, die sich u. a. auf überprüfbare Messmethoden gründete.

Kurz vor seiner Reise hatte der Hobbymineraloge ein kleines Bergwerk in der Nähe der heimatlichen Festung durchstöbert, in dem seit dem frühen 18. Jahrhundert Feldspat für die Porzellanindustrie abgebaut wurde. Die »Ytterby gruva«, die »Grube Ytterby«, hielt neben Silikat-Mineralen viele Überraschungen bereit. So fand Arrhenius 1787 einen auffällig schweren und pechschwarzen Stein. Aus diesem, nach seinem Fundort benannten »Ytterbit«, isolierte der finnische Chemiker Johan Gadolin 1794 – Arrhenius hatte längst im Militär Karriere gemacht – die bis dahin unbekannte »Yttererde«. Unter einer »Erde« verstanden Chemiker damals das Oxid eines Metalls – daher auch der Name »Tonerde« für Aluminiumoxid. Mit unserer heutigen Vorstellung von »Erde«, in die wir Blumen pflanzen, hat der Name also nichts zu tun.

In der Folge entpuppte sich die Yttererde indes als etwas anderes, nämlich als ein Gemisch *verschiedener*, eng miteinander verwandter Metalloxide. Wie viele es waren, blieb lange unklar, weil geeignete Trennmethode fehlten. Immer wieder erwies sich ein vermeintlich neu nachgewiesenes Metall als weiteres Gemisch unterschiedlicher Metalle. Erst 1843 gelang es dem schwedischen Chemiker Carl Gustav Mosander, die Elemente Yttrium und Terbium in Reinform zu gewinnen und zu beschreiben. Seinen Landsmann Arrhenius hatte man zu diesem Zeitpunkt, als Major und Mitglied der schwedischen Akademie der Wissenschaften, schon lange beerdigt.

Und erst 1949 wurde das letzte Seltenerdelement aufgespürt: Promethium, ein radioaktives Spaltprodukt des Uran. Jacob Marinsky, Lawrence Glendenin und Charles Coryell entdeckten es im Oak Ridge National Laboratory in Tennessee. Mit seiner kurzen Halbwertszeit von 18 Jahren kann es in der Natur nicht nachgewiesen werden.⁵

Seltenerdchemie

Mitte des 20. Jahrhunderts waren also alle Seltenerd-Elemente entdeckt – doch längst nicht alle Unklarheiten beseitigt. Noch immer galt die Seltenerdchemie als schwieriges und experimentell extrem anspruchsvolles Gebiet, auf dem die sonst üblichen Nachweis- und Trennverfahren versagten, da sich die einzelnen Elemente in ihrem chemischen und physikalischen Verhalten zu ähnlich sind. So stöhnte der britische Chemiker und Physiker Sir William Crookes 1902: »Diese Elemente verblüffen uns in unseren Untersuchungen, widersprechen unseren Annahmen und verfolgen uns in unseren Träumen. Sie erstrecken sich wie ein unbekanntes Meer vor uns, spottend und rätselhaft murmeln sie seltsame Offenbarungen und Möglichkeiten.«⁶ Bertram Boltwood, ein Radiochemiker aus den USA, schloss sich drei Jahre später an: »Hinsichtlich korrekter Aussagen ist ihre Radium-Familie eine Sonntagsschule, verglichen mit den Seltenerd-Elementen, deren chemisches Verhalten einfach empörend ist. Es ist absolut entmutigend, irgendetwas mit ihnen zu tun zu haben.«⁷

Jedenfalls verursachte es viel Arbeit und verschlang massenhaft Zeit, die einzelnen so kapriziösen Metalle in Reinform zu gewinnen. Denn bis etwa 1950 war die fraktionierte Kristallisation (eine Vorgehensweise, die sich aus mehreren Tausenden Arbeitsschritten zusammensetzte, die es auf äußerst akribische Weise durchzuführen galt) die einzige Möglichkeit, die Elemente – im reinen Zustand silbrig-weiße Metalle, die sich aufgrund ihres ausgeprägten Reaktionsvermögens schnell mit einer weißen Oxidationsschicht überziehen⁸ – zu erhalten.

Inzwischen gibt es effizientere und schnellere Methoden – doch die Gewinnung der Metalle ist noch immer ausgesprochen aufwendig. In der Natur kommen sie stets vergesellschaftet vor. Wer reines Neodym, Cer

oder Praseodym verwenden will, muss es zunächst von seinen Geschwistern trennen und dazu jede Menge Energie und Chemie einsetzen. Dies ist eine der Ursachen für die schwierige Stellung der Seltenen Erden in den Umweltbilanzen von Produkten. Einerseits sind sie wichtiger Bestandteil in »grünen Zukunftstechnologien«, andererseits sind ihr Abbau und ihre Gewinnung wenig nachhaltig. So leiden Menschen und Umwelt in den Regionen, in denen die Metalle abgebaut und produziert werden; zum Teil unter den radioaktiven Beistoffen, die bei der Gewinnung mobilisiert werden, zum Teil unter den giftigen Chemikalien, die in den Bergwerken und Raffinationsanlagen eingesetzt werden.

Umso wichtiger wäre ein bewusster Umgang mit den Metallen, der ihren gesamten Lebensweg immer im Blick hat. Doch daran mangelt es: Von der Weltproduktion von 123.000 Tonnen im Jahr 2010 gingen schätzungsweise rund 110.000 Tonnen durch Feinverteilung verloren, ihre Dissipationsrate liegt demnach zwischen 90 und 100 Prozent. Dissipation oder Feinverteilung bedeutet, dass sich die Metalle durch den menschlichen Gebrauch in feinsten Form und nicht mehr rückholbar in der Umwelt verteilen – etwa als Zusatz von Düngern, Tierfutter oder Medikamenten, als Abrieb von Bremsen oder Katalysatoren, als winziger Bestandteil elektronischer Geräte. Wirksame Strategien, diese punktuell kleinen, insgesamt aber immensen Verluste zu vermeiden oder die feinverteilten Partikel aus Boden, Wasser oder Luft zurückzugewinnen, fehlen bis heute.

Auch die Erkenntnis, dass Europa über keine nennenswerten natürlichen Vorkommen an den Metallen verfügt, hat nicht dazu geführt, die eigenen »anthropogenen Lager« bislang zu nutzen. Diese Reservoirs aus ausrangierten Laptops, alten Handys oder kaputten Energiesparlampen werden weder systematisch aufgebaut noch statistisch erfasst oder genutzt. Noch nicht einmal ein Prozent der darin enthaltenen Seltenen Erden wird recycelt. Zu klein sind die eingesetzten Mengen in zahlreichen Produkten, als dass sich ein Recycling lohnen würde, zu verworren die Wege, die die Produkte im Laufe ihrer Nutzung nehmen, und vor allem danach. Der Schock über mögliche Versorgungsengpässe hat zwar weltweit viele Forschungsprojekte auf dem Feld des Recyclings angestoßen. Bislang haben sie aber kaum Eingang in die Unternehmen gefunden.

Metalle für den Erfindergeist

Bei der Substitution sieht das anders aus. Die Anstrengungen, die monopolartig produzierten Metalle durch weniger knappe Rohstoffe zu ersetzen, waren erstaunlich schnell von Erfolg gekrönt. Dabei wendeten die Unternehmen unterschiedliche Strategien an. So ersetzten sie etwa die Seltenen Erden durch andere Metalle, die über ähnliche Eigenschaften verfügen – bisweilen aber auch ähnlich knapp sind. Oder sie entwickelten neue Technologien, die mit deutlich weniger oder ganz ohne Seltenerdmetalle auskamen, etwa die Leuchtstoffindustrie. Der enorme Nachfragerückgang, beispielsweise von Terbium, Europium und Yttrium, ist vor allem darauf zurückzuführen, dass moderne LEDs die Energiesparlampen sehr schnell vom Markt verdrängten und, im Unterschied zu ihnen, fast ohne die Seltenen Erden leuchten.

Da ist er wieder, der Erfindergeist, der offenbar auf jede Krise eine technische Antwort findet. Anders als Kupfer und Eisen prägen die Seltenen Erden Wirtschaft und Kultur des Menschen erst in jüngster Zeit, und der Mensch drückt dem Metall erst seit einigen Jahren seinen Stempel auf. Die Seltenen Erden stehen wie kaum ein anderes Metall für die großen Themen unserer Zeit – sei es die Energiewende, sei es die Industrie 4.0. Weder die High-Tech-Strategie der Bundesregierung noch ihre Digitale Agenda oder ihre Nachhaltigkeitsstrategie lassen sich ohne Dysprosium, Cer und Lanthan umsetzen. Es lohnt sich also, die Seltenen Erden im Blick zu behalten – unabhängig von Marktpreis und Versorgungslage, denn die Metallfamilie erzählt eine faszinierende Geschichte unserer modernen Industriegesellschaft.



Seltene Erden finden in zahlreichen Gegenständen und Bereichen Verwendung: in alltäglichen Produkten wie dem Smartphone ebenso wie in der Militärtechnologie.

Die Abbildungen, welche die Kapitel in diesem Buch eröffnen, vermitteln davon einen visuellen Eindruck.

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.⁹ 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 »Seltenerdoxide« (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.¹⁰ 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.¹¹ 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	krrypton 36 Kr 83.80					
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirkon 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdän 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rodium 45 Rh 101.07	paladium 46 Pd 106.42	silber 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	zin 50 Sn 118.71	antimon 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.6	blei 53 Pb 207.2	beryllium 54 Be 9.0122					
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	* 57-70	hafnium 71 Hf 178.49	tantalum 72 Ta 180.95	wolfram 73 W 183.84	reynoldium 74 Re 186.21	osmium 75 Os 190.23	iridium 76 Ir 192.22	platin 77 Pt 195.08	gold 78 Au 196.97	quecksilber 79 Hg 200.59	thallium 80 Tl 204.38	blei 81 Pb 207.2	bismut 82 Bi 208.98	polonium 83 Po [209]	astat 84 At [210]	radon 85 Rn [222]					
franzium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	* * 89-102	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]	amerikium 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]					
* Lanthanide series		lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodym 59 Pr 140.91	neodym 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]	amerikium 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.¹² 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.¹³ 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.¹⁴ 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.¹⁵ 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.

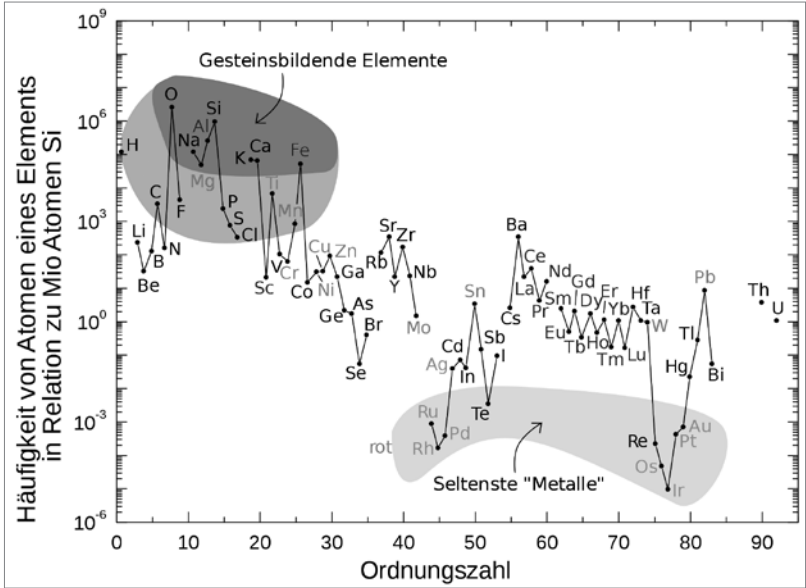


Abbildung 2 Relative Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste
 Quelle: Haxel et al. 2002

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.¹⁶ 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.¹⁷ 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.¹⁸ 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