

**1. Bedeutung von Seltenerdmetallen**  
 Seltenerdmetalle (SEM; engl.: Rare Earth Elements, REE) sind eine Gruppe von je nach Definition 15 (Lanthanoide: Lanthan bis Lutetium) oder 17 (mit Yttrium und Scandium) chemisch und physikalisch ähnlichen Elementen. Sie sind aufgrund ihrer vielseitigen Verwendung in Zukunftstechnologien von grosser wirtschaftlicher Bedeutung. In Hochtechnologieanwendungen kommen SEM meist nur in geringen Mengen in einzelnen Bauteilen vor (Abb. 1).

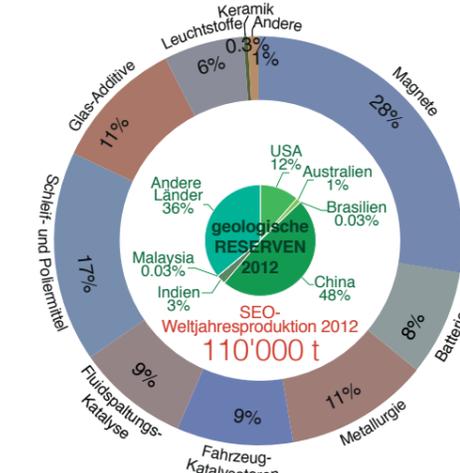


Abb. 1 Schätzungen für Seltenerdmetalloxid-Reserven (1), Weltjahresproduktion (1) und Verwendung (6).

In Produkten wie Computern, Mobiltelefonen und Medizintechnologien sind SEM wichtige Funktionsträger und aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften nicht einfach zu substituieren. Die Weltproduktion von ca. 110 000 Tonnen Seltenerdmetalloxiden (SEO, engl.: Rare Earth Oxides, REO) im Jahr 2012 (Abb. 1) stammte zu über 86% aus China.<sup>1</sup> Zunehmende globale Nachfrage (Abb. 2) und Chinesische Exportrestriktionen, begründet durch Umweltbedenken und wachsenden Eigenbedarf, führten im Zeitraum 2005-2011 zu Preisanstiegen einzelner SEM um Faktoren 10 bis 100 (vgl. Abb. 7). Diese Angebotsverknappung wird dadurch verschärft, dass China in Anbetracht seiner eigenen Industrialisierung vom Exporteur zum Importeur werden könnte. Mögliche Engpässe haben in anderen importabhängigen Industrienationen wie auch in der Schweiz eine Diskussion über Versorgungsrisiken (Stichwort Kritikalität) ausgelöst.<sup>2-4</sup>

Obwohl SEM nicht zu den seltensten Elementen der Erdkruste gehören, sind wirt-

schaftlich nutzbare geologische Anreicherungen selten.<sup>5</sup> Dies, sowie weitere Faktoren wie die geographische Verteilung, Geopolitik, steigende Nachfrage, Umweltschäden bei der Gewinnung, Ökonomie, fehlende Substitutionsmöglichkeiten u.v.m. führt dazu, dass SEM allgemein als (versorgungs-) «kritische» Elemente gelten.

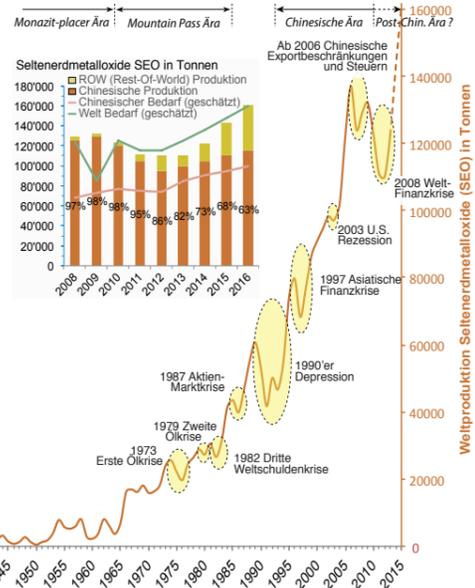


Abb. 2 Historische Entwicklung der SEO-Produktion (1900-2012) (1,7) sowie Prognose bis 2015 (8,9). Neue Produktion im Ausland reduziert den chinesischen Produktionsanteil (kleines Diagramm); Der chinesische Eigenbedarf steigt weiterhin (8,9)

## 7. Gesellschaft

Gesundheitsschäden und Todesfälle bei Minen- und Raffineriearbeitern, insbesondere im Zusammenhang mit illegalem und unkontrolliertem Abbau von SEO, sind ein bekanntes Risiko.

Derzeit gibt es weder in der Schweiz noch in der EU Gesundheitsgrenzwerte für SEM,<sup>54</sup> in den Niederlanden wurde jedoch eine Empfehlung, basierend auf natürlichen Wasser-, Boden- und Sediment-Hintergrund-

SEM-Toleranzgrenzwerte			
Ce(IV)-oxid CeO <sub>2</sub>	RfC	0.0003	mg/m <sup>3</sup>
Ce(III)-oxid Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RfC	0.0009	mg/m <sup>3</sup>
Eu(III)-chlorid EuCl <sub>3</sub>	RfD	0.03	mg/kg/Tag
Eu(III)-oxid Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RfD	0.002	mg/kg/Tag
Gd(III)-oxid Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RfC	0.002	mg/m <sup>3</sup>
La(III)-carbonat	RfD	0.5	mg/kg/Tag
La(III)-chlorid LaCl <sub>3</sub>	RfD	0.005	mg/kg/Tag
La(III)-oxid La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RfD	0.02	mg/kg/Tag
Lu(III)-chlorid LuCl <sub>3</sub>	s-RfD	0.0009	mg/kg/Tag
Nd(III)-chlorid NdCl <sub>3</sub>	s-RfD	0.5	mg/kg/Tag
Pr(III)-chlorid PrCl <sub>3</sub>	s-RfD	0.5	mg/kg/Tag
Sm(III)-chlorid SmCl <sub>3</sub>	s-RfD	0.5	mg/kg/Tag
Sm(III)-nitrat	s-RfD	0.00002	mg/kg/Tag
Sc(III)-oxid Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RfD	0.005	mg/kg/Tag
Y(III)-chlorid YCl <sub>3</sub>	RfD	0.004	mg/kg/Tag

konzentrationen,<sup>55</sup> publiziert. Toxikologische Studien haben sowohl akute als auch chronische Auswirkungen auf Tiere nachgewiesen, wobei diese stark von der Aufnahmeform und -rate sowie der Konzentration abhängen.<sup>56</sup> Für SEM-Chloride beispielsweise scheint Lutetium die höchste und Praseodym und Neodym die tiefste Toxizität zu haben, und die mittlere letale Dosis LD<sub>50</sub> bei Mäusen für eine orale Aufnahme liegt bei 300-600 mg/kg, wogegen eine tägliche Aufnahme von 0.6 mg/kg/Tag als ohne Auswirkungen betrachtet wird.<sup>56</sup>

Die ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) hat für Yttrium 1964 einen Inhalations-Grenzwert von 1 mg/m<sup>3</sup> Luft festgelegt, welcher als für alle SEM plausibel betrachtet wird.<sup>56</sup> Für orale Aufnahme liefert Tab. 1 eine Zusammenstellung von Grenzwerten der humantoxikologischen Eigenschaften.

Die leichten SEM (kleinere Ordnungszahlen Z und grösserer Atomradius r) sind löslicher und lagern sich eher in der Leber ab, wogegen schwere (Z grösser, r kleiner)

Tab. 1 Zusammenstellung von Grenzwerten der human-toxikologischen Referenzdosis der lebenslang tolerierbaren täglichen Aufnahmemenge (55) für orale Einnahme (RfD) und für Inhalation (RfC). Für subchronische orale Exposition (kürzer als 10% der mittleren Lebenserwartung) werden s-RfD Werte angegeben.

## 8. Ressourcenmanagement: Das Ganze im Überblick

Die Rückgewinnung von SEM ist bezüglich Umweltbelastung, Treibhausgas-Emissionen und Primärenergieverbrauch vorteilhafter als die primäre Produktion. Durch die Gewinnung in nur wenigen Ländern, vor allem in China, ist eine Abhängigkeit von diesen Produzenten vorhanden. Es gibt eine Reihe von Ansätzen um das Versorgungsrisiko von «kritischen» Elementen wie den SEM zu verringern.

Die Recyclingquote von SEM bewegt sich im einstelligen Prozentbereich. Neue Arten von Kollaborationen sind erforderlich, um von Abfallentsorgung auf Abfallverwertung umzustellen.<sup>60</sup>

Aufgrund der geringen Konzentrationen in den meisten Produkten und der sich entspannenden Versorgungslage aus der Primärextraktion ist eine rein marktgetriebene Rückgewinnung ohne weitere Massnahmen (z.B. Umweltschutzgesetzgebung) nur in beschränktem Ausmass zu erwarten. Der Rahmen für das SEM-Recycling muss so gesetzt werden, dass sich die Rückgewinnung ökonomisch betreiben lässt. Es wird daher als sinnvoll angesehen das Zusammenführen der

Abfallfraktionen mit relativ hoher Konzentration zu fördern. Im Zentrum des Interesses stehen Permanentmagnete und Leuchtstoffmittel.

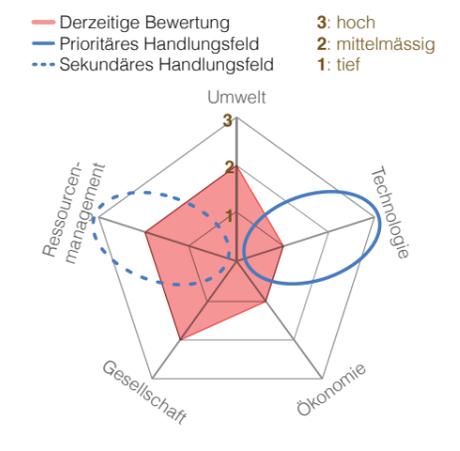
Die Schweiz hat im internationalen Vergleich sehr hohe Arbeits- und Umweltstandards, welche auch für das Abfallmanagement gelten. Die Primärproduktion von SEM und das Recycling in Entwicklungsländern hingegen ist oft schlecht reguliert. Für eine nachhaltige Versorgungssicherung mit SEM sind die im Ausland anfallenden Gesundheits- und Umweltschäden zu berücksichtigen und inländisches Recycling zu unterstützen.

Die Kommunikation des erarbeiteten Wissens und der verbleibenden offenen Fragestellungen ist zentral für eine Verbesserung der SEM-Rückgewinnungsraten (Abb. 9).

Abb. 9 Beurteilung des Urban Mining Potenzials von SEM aufgrund qualitativer Experteneinschätzung. Kriterien: Umwelt: Fortschritte bezüglich Umweltverträglichkeit; Technologie: nur beschränkt im industriellen Massstab; Ökonomie: kleine Konzentrationen und Mengen, Preisfluktuation; Gesellschaft: schlechte Arbeitsbedingungen Primärproduktion, jedoch grosse Fortschritte; Ressourcenmanagement: Versorgungskritikalität, gezielte Sammelsysteme fehlen, internationale Kooperation erforderlich.

### Offene Fragen:

- Gehalte in Produkten und Materialflüssen
- Verbesserung Import / Exportstatistiken
- Ökobilanzdaten für Primärproduktion und Recycling je nach Produzent / Herkunft
- Braucht es bessere Sammelsysteme für Permanentmagnete und Leuchtstoffmittel?
- Zukünftige Prognose SEM-Einsatz CH
- Stand der Rückgewinnungstechnologien und Möglichkeiten der internationalen Zusammenarbeit



## 2. Systemverständnis

Der grösste Teil (83%) der geologischen SEM-Vorräte liegen in China, Russland, den USA, Indien und Australien.<sup>10</sup> Weltweite Produktionsdaten weisen je nach Autor erhebliche Diskrepanzen<sup>11</sup> auf und lagen im Jahr 2012 gemäss USGS bei etwa 110 000 t (Abb. 1). Die leichten SEM La, Ce, Pr und Nd machen dabei über zwei Drittel der Weltgesamtproduktion aus. Dies widerspiegelt die natürliche Elementverteilung in geologischen Lagerstätten, führt jedoch aufgrund der pro Element unterschiedlichen Nachfrage (vgl. Abb. 4) zum sog. Gleichgewichtsproblem<sup>12</sup> und damit zu sehr unterschiedlichen Preisen (vgl. Abb. 7).

In der Schweiz sind keine ökonomisch nutzbaren geologischen SEM-Vorkommen bekannt. Im Gegensatz dazu wächst das anthropogene Lager (Abb. 3, vgl. Abb. 8) durch Importe von SEM-haltigen Halbfertig- und Fertigprodukten kontinuierlich an. Unterschiedliche funktionelle Eigenschaften einzelner SEM implizieren signifikant unterschiedlichen Bedarf; für genaue Verbrauchszahlen gibt es nur wenige weltweite<sup>6,13,14</sup> und keine Schweizer Schätzungen.

Es gibt ferner keine Informationen über den sektorspezifischen Industriebedarf, da diese Zahlen nicht rapportiert werden müssen. Import-Exportstatistiken sind nicht bis

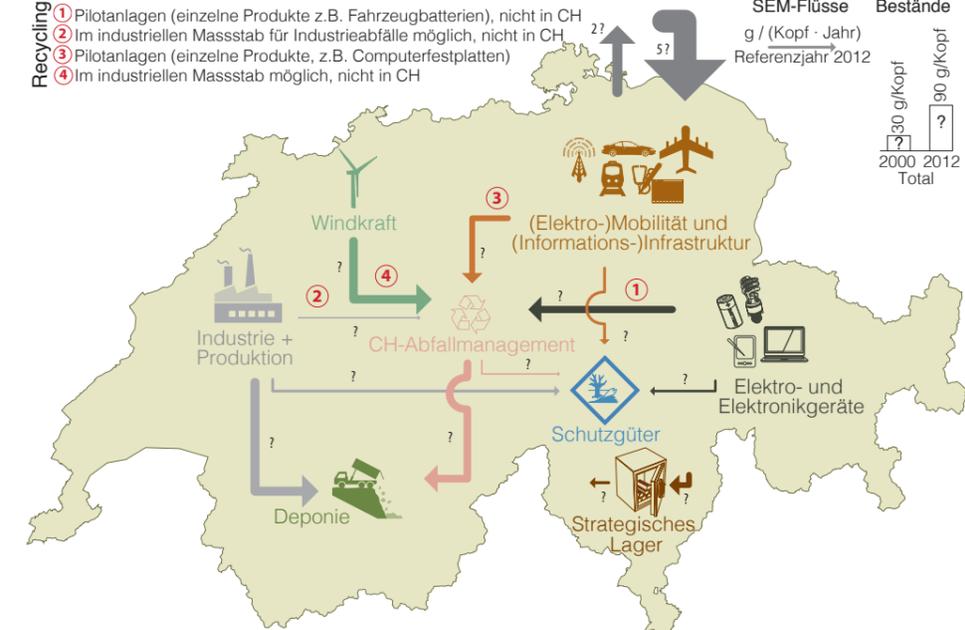


Abb. 3 Provisorisches Stoffflussdiagramm der Schweiz: Die Massenflüsse und Lager können derzeit nicht quantifiziert werden. Hochrechnungen der anthropogenen pro-Kopf-Bestände aus Zoll- und Bevölkerungsstatistiken (15,16) sind fragwürdig.

auf einzelne SEM aufgeschlüsselt<sup>15</sup> und die in diversen Import- und Exportgütern versteckten Materialflüsse schwierig abzuschätzen. Es kann angenommen werden, dass SEM in reiner Form für eine Verarbeitung in der Schweiz nur in beschränktem Mengen von einzelnen Unternehmen importiert werden. Einige wenige Händler (zum Beispiel

die SMH Schweizerische Metallhandels AG) importieren SEM physisch, teilweise auch zur strategischen Lagerhaltung. Aufgrund fehlender Daten (Angaben und Gehalte in verschiedenen Produktklassen variieren stark, was Hochrechnungen erschwert)<sup>11</sup> wurde bis dato für die Schweiz kein SEM-Stoffflussdiagramm erstellt.

**3. Primär-/Sekundärrohstoffe**

Geologisch betrachtet ist die durchschnittliche Konzentration von SEM in der Erdkruste um fast vier Grössenordnungen höher als zum Beispiel diejenige von Gold oder Platin.<sup>17,18</sup> Die Exploration und Entwicklung neuer Minen erfordert 10 bis 15 Jahre und eine Entspannung der Lieferengpässe, entweder durch Produktionssteigerung und die Erschliessung neuer Lagerstätten oder nachfrageseitig durch Bedarfsreduktion mit technologischen Innovationen, Recycling und Substitution wird noch ein paar Jahre dauern.

Geologische Lagerstätten können eher mit «leichten» SEM (LREE), häufig in den Mineralien Bastnäsit ((Ce,La,Y)CO<sub>3</sub>F) und Monazit ((Ce,La,Th,Nd,Y)PO<sub>4</sub>), oder mit «schweren» SEM (HREE), vor allem in dem Mineral Xenotim ((Y,REE)PO<sub>4</sub>) und in Ionen-Adsorptions-Tonen, angereichert sein. SEM sind aufgrund ihrer ähnlichen chemischen Eigenschaften einerseits meist als Mischung in Mineralien in geringen Konzentrationen enthalten und andererseits schwer voneinander zu separieren, was ihre Aufbereitung sowie auch ihr Recycling aufwändig und kostspielig macht.

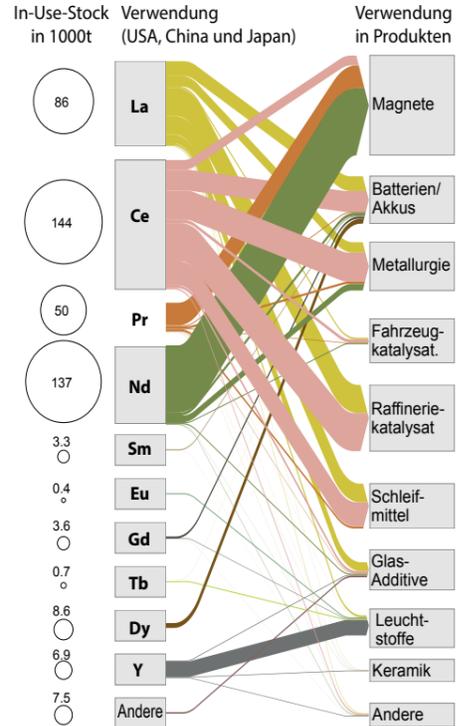
In der Schweiz werden keine SEM aus Erzen gewonnen. Anreicherungen wie zum Beispiel die Eisen-Manganzorkommen

in den Bündner Alpen<sup>19,20</sup> sind kleinräumig und haben tiefe Gehalte<sup>21</sup>, weit unter den für nutzbare Erze typischen SEO-Summenkonzentrationen von >5% SEO<sup>22</sup>. Schweizer Vorkommen sind daher, anders als Lagerstätten wie jene der Mountain Pass Mine in Californien (29 Mt mit 8.9% SEO, also ca. 2.6 Mt SEO),<sup>22</sup> nicht von wirtschaftlichem Interesse.

Derzeit findet in der Schweiz keine Rückgewinnung von SEM aus Abfällen statt, alle verwendeten SEM (In-Use Stock) wurden und werden aus dem Ausland importiert. SEM in End-of-Life (EOL)-Produkten und Abfällen (Abb. 4) werden deponiert oder, beispielsweise als Cerium (Ce)-Beimengungen in Fahrzeugkatalysatoren, wieder exportiert. Sie gehen meist bei der Rückgewinnung anderer Stoffe mit grösserem Wertstoffpotenzial verloren. Das SEM-Recycling aus Schlacke von Kehrlichtverbrennungsanlagen lohnt sich in keinem Fall, da die gemessenen Konzentrationen (Gd=0.75 ppm, Nd=7.26 ppm, Pr=1.9 ppm, Y=7.85 ppm)<sup>23</sup> sogar unter denen der mittleren Erdkruste liegen, und um Grössenordnungen unter jenen wirtschaftlicher Lagerstätten.

Die am besten realisierbaren Recyclingpotenziale liegen bei Nd-Fe-B-Permanentmagneten, Ni-MH-Akkumulatoren und Leuchtstoffmitteln, welche vor allem Europä-

um (Eu), Terbium (Tb) und Yttrium (Y), und zu geringeren Mengen auch Cer (Ce), Gadolinium(Gd), und Lanthan (La) enthalten.



**Abb. 4** Geschätzte weltweite Menge einzelner SEM im Gebrauch (In-Use-Stocks) (14) sowie die Materialflüsse (massstabsgetreu) der jeweiligen Verwendung in verschiedenen Produkten in den USA, Japan und China (6).

**4. Umwelt**

Über human- und ökotoxische Effekte der SEM, welche zu den Schwermetallen gezählt werden, ist wenig bekannt. Sie sind jedoch (ausser für gewisse Methan-abbauende Bakterien)<sup>24</sup> keine essentiellen Spurenelemente und in hohen Dosen toxisch.

SEM-Spezifizierung in wässriger Lösung hängt stark von pH und Gehalt an organischen Verbindungen ab, wobei SEM bei tiefem pH löslicher sind und bei höheren pH Werten zunehmend Verbindungen mit Huminsäuren bilden<sup>25</sup>. Die im Rheinwasser in der Nähe einer Abwasserzuleitung eines Katalysatorproduzenten gemessene punktuelle Maximalkonzentration (Summe) der SEM von über 50 mg/kg ist mehr als 50-mal höher als die Grenzkonzentration für welche toxische Auswirkungen bekannt sind.<sup>26</sup>

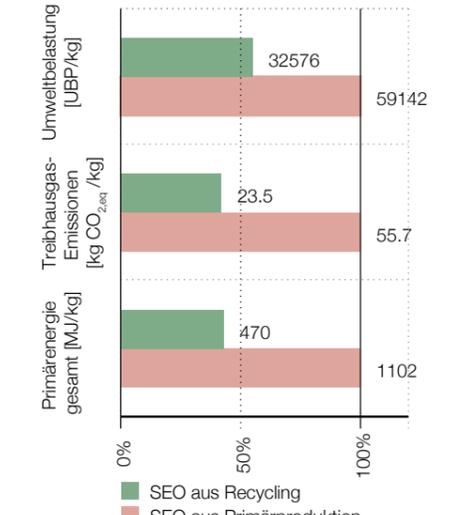
In sehr tiefen Dosen können SEM das Wachstum und die Gewichtszunahme von Lebewesen positiv beeinflussen, was einer zunehmenden metabolischen Funktion als Reaktion auf einen Stressfaktor (hormetischer Effekt)<sup>27</sup> zugeschrieben wird. Daher werden SEM auch Tierfutter und Düngemitteln beigemischt.

In SEM-haltigen Erzen und Mineralien treten häufig die Radionuklide Uran und Thorium sowie weitere potenziell umweltschädliche Stoffe wie Arsen, Barium, Cadmi-

um, Mangan, Fluorverbindungen, Blei und andere Schwermetalle auf.<sup>28</sup>

Der Abbau von SEM ist folglich umwelttechnisch aufwändig und mit der Produktion von radioaktivem Abfall verbunden. Verschärft wird dieses Problem dadurch, dass die Gewinnung zu einem grossen Teil in Ländern mit unvollständigen und schlecht durchgesetzten Umweltregulierungen stattfindet (vgl. Abb. 1). Im Jahr 2009 wurden aus China, dem Hauptproduzenten, von den geschätzten 68 000 t etwa 20 000 t illegal abgebaut und exportiert.<sup>29</sup> Es wird angenommen, dass im Jahr 2012 nach wie vor bis zu 15% der leichten SEM und 50% der schweren SEM aus unkontrolliertem Abbau und illegalem Export stammten.<sup>30</sup> Zu den gut dokumentierten Umweltschäden des SEM-Abbaus gehören Oberflächen- und Grundwasserverschmutzung, Erosion, Schwermetallkontamination und Versauerung von Böden, Vegetationsschäden und abnehmende Landwirtschaftserträge sowie Naturgefahren wie Erdbeben.<sup>31,32</sup> Chinesische Bestrebungen zur Reduktion von Umweltbelastungen beinhalten die Einführung von Ziel- und Grenzwerten für den chemischen Sauerstoffbedarf sowie CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Phosphor, Fluor, Thorium,<sup>32</sup> Schwermetalle und Feinstaubpartikel;<sup>31</sup> die Durchsetzung ist jedoch noch unvollständig.

Die Ökobilanz von SEO<sup>33</sup> zeigt einen klaren Nutzen bei der Rückgewinnung von SEM gegenüber der Primärproduktion (Abb. 5): Bei der Rückgewinnung aus Produkten fallen keine radioaktiven Stoffe an und Umweltausträge können verringert werden. Die strengen Umweltvorschriften von Industrieländern verstärken diesen Effekt, da Recyclingunternehmen an sie gebunden sind.

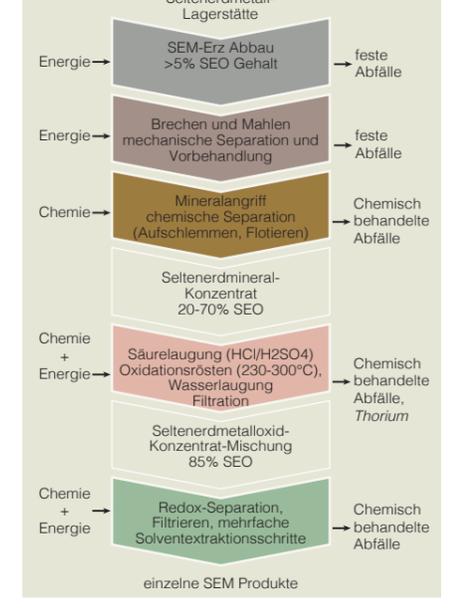


**Abb. 5** Eine grobe Abschätzung der Ökobilanz (33) für die Primär- und Recyclingproduktion von SEO zeigt im Vergleich den deutlichen Vorteil von Recycling; jeweils skaliert auf 100% Primärproduktion.

**5. Technologie**

Die Gewinnung von SEM aus den drei Hauptlagerstättentypen ist je nach Geologie und Mineralogie unterschiedlich.<sup>5,35</sup>

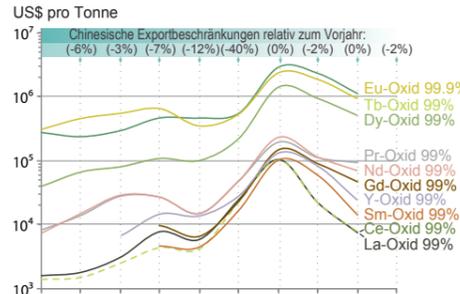
1. Festgesteinslagerstätten erfordern aufwändige Aufbereitung des Gesteins. SEM-Hauptminerale sind Bastnäsit (z.B. Bayan Obo in China, Mountain Pass in den USA) sowie komplexe SEM-Mineralvergesellschaftungen (z.B. Mt. Weld in Australien).



**6. Ökonomie**

Grundsätzlich ist die Gewinnung von SEM aus geologischen Vorkommen sehr kostspielig da sie komplizierte und lange (je nach Geologie einzelner Lagerstätten unterschiedliche) Prozessketten erfordert. So betragen die Investitionskosten der Lynas Advanced Materials Plant («LAMP» in Malaysia) ca. 800 Millionen US\$.<sup>46</sup>

Die LAMP ist mit einer geplanten Leistung von 22 000 Tonnen pro Jahr (tpa) nach Molycorp (USA, 40 000 tpa<sup>1</sup>) die derzeit zweitgrösste Raffinerie für SEM ausserhalb von China (ca. 95 000 tpa im 2012<sup>1</sup>).<sup>47</sup> Sie wurde vor allem zur Verarbeitung des Konzentrates der Mt. Weld Offen-Tagebau Mine in Australien konzipiert, welche einen



**Abb. 7** Jährliche SEM-Preise (log. Skala) von Januar 2005 bis Januar 2014 (53). Deutlich erkennbar sind die Preisanstiege durch Chinesischen Exportrestriktionen und die Preisverfälle durch die Wirtschaftskrisen (2008, 2013/4).

2. Schwermineral-Sedimentlagerstätten (SEM-Hauptminerale sind Monazit und Xenotim: z.B. Schwermineralsande in Indien) erfordern lediglich Aufbereitung der SEM-Minerale.

3. Ionen-Adsorptions-Tone (z.B. südchinesische Provinzen Guangdong, Guanxi, Hunan, Jiangxi und Fujian) erfordern den geringsten Aufwand zur SEO-Extraktion.

Der derzeitige Hauptanteil der Weltproduktion stammt aus Festgesteinslagerstätten (China, USA, Australien) und wird durch hydrometallurgische Prozesse gewonnen (Abb. 6). Dabei entstehen neben chemisch behandelten Prozessrückständen in der Regel auch radioaktive Abfälle (Uran, Thorium).<sup>32</sup>

Auch auf der Recyclingseite ist die Zusammensetzung der Produkte und Materialstoffströme für die in Betracht kommenden Rückgewinnungsverfahren bestimmend. Der vielfältige Einsatz von SEM in unterschiedlichsten Materialien und Komponenten von Produkten (vgl. Abb. 4) wird durch die Schnellebigkeit von Technologien beeinflusst, was eine Rückgewinnung aus einzelnen Produkttypen erschwert.

Der Produktzyklus von Entwicklung und Planung, über Anlagenbau bis hin zum

**Abb. 6** Der Produktionsprozess von SEM von der Lagerstätte bis zu einzelnen SEO ist mit hohem Energieaufwand und grossen Umweltbelastungen verbunden (5,35).

geplanten End-Ausstoss von 66 000 tpa Seltenerdmineral-Konzentrat haben soll.<sup>47</sup>

Der Zeitfaktor (von der Exploration bis zur Inbetriebnahme einer Mine: 10 bis 15 Jahre) ist für die Ökonomie der SEM-Lagerstättennutzung und des Recyclings von primärer Bedeutung. Durch schnelllebige Technologiezyklen verursachte (teilweise nur kurzfristige) Bedarfsanstiege stehen langfristigen hohen Investitionskosten für Exploration, Technologie-Entwicklung und Anlagenbau gegenüber. Preisanstiege aufgrund vorübergehender Versorgungsengpässe dürfen nicht als Berechnungsgrundlage für die ökonomische Evaluation der Abbau- / Recyclingwürdigkeit herangezogen werden, da Investitionen in grossindustrielle Anlagen sich über einen Zeitraum vieler Jahre amortisieren müssen.

Von weltweit über 400 SEM-Explorationsprojekten befinden sich 43 im fortgeschrittenen Stadium (mindestens Bohrkampagnen und Extraktions-Tests),<sup>48</sup> und die Produktionskapazitäten bestehender Anlagen werden laufend auf- und ausgebaut. Folglich ist langfristig eine Entspannung des Nachfrageüberhangs und ein Preiszerfall zu erwarten, was eine Konsolidierung des Angebotsmarktes mit sich führt und viele Projekte unrealisierbar werden lässt. SEM-Recycling muss, rein ökonomisch betrachtet, mit der

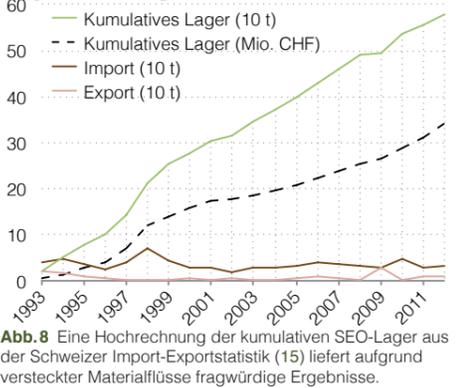
Betrieb einer SEM-Recyclinganlage muss entsprechend langfristig vorhersehbar oder flexibel anpassbar sein. Die Mengen, Konzentrationen und Residenzzeit von SEM in einzelnen Stoffströmen und Lagern müssen bei der Beurteilung des Rohstoffpotenzials von Recyclingströmen zwingend berücksichtigt werden.

Technische Lösungen zur physikalischen Separation sowie hydro- und pyrometallurgische Verfahren zur Rückgewinnung von SEM waren vor wenigen Jahren noch weitgehend unerforscht,<sup>36</sup> werden derzeit jedoch intensiv untersucht.<sup>34,37-39</sup> Recycling kommt vor allem für jene Materialflüsse in Frage, die isoliert, und bei denen einzelne SEM-haltige Produktkomponenten separiert und angereichert werden können. Dies ist zum Beispiel bei Abfällen industrieller Produktionsprozesse<sup>40</sup>, Nd-Fe-B-Magneten<sup>38,41</sup>, Ni-MH-Akkumulatoren<sup>42</sup> und durch Separatsammlung sortierter Leuchtstofflampen<sup>43,44</sup> der Fall. Bei Fahrzeugkatalysatoren (Ce-haltig) wäre ein Recycling zwar möglich, da sie separat gesammelt werden, ist jedoch aufgrund des tiefen Ce-Preises (vgl. Abb. 7) nicht attraktiv.<sup>45</sup>

Primärproduktion zu Weltmarktpreisen (Abb. 7) konkurrieren, sofern keine weiteren Mechanismen wie beispielsweise Umweltgesetzgebungen das Recycling begünstigen.

Mehr als 70% des Wertes des SEM-Markts wird durch Permanentmagnete (38%) und Leuchtstoffmittel (32%) gebildet<sup>49</sup>, weshalb jene für Recycling ein hohes Potenzial haben. Bezüglich der Kritikalität von SEM kann zum Beispiel das Recycling von Permanentmagneten einen Beitrag zur Dämpfung kurzfristiger Preisschwankungen leisten und Lieferrisiken reduzieren.<sup>50,51</sup>

Obwohl eine Abhängigkeit der Schweizer Industrie von SEM vorhanden ist (Abb. 8), betrachten Schweizer Unternehmen das Risiko als gering.<sup>4,52</sup> Ein europaweiter Wissensvergleich widerspricht dem.



**Abb. 8** Eine Hochrechnung der kumulativen SEO-Lager aus der Schweizer Import-Exportstatistik (15) liefert aufgrund versteckter Materialflüsse fragwürdige Ergebnisse.