

## Urban Mining – Sekundäre Rohstoffgewinnung aus Elektroschrott

Der jährliche Rohstoffbedarf soll sich bis 2050 mehr als verdoppeln – die Reichweite der endlichen primären Rohstoffquellen ist absehbar. Eine Vielzahl von Forschern arbeitet derzeit an effizienten Verfahren zur Aufarbeitung wertvoller Rohstoffe aus ausgedienten Elektrogeräten. Auch an der TU Kaiserslautern sollen Grundlagenforschungen zur mikrostrukturierten Extraktion einen Beitrag zur sekundären Rohstoffgewinnung leisten. Elektroschrott als reichhaltige „urbane Mine“.

### Herausforderungen der Zukunft

Die Weltbevölkerung und der Bedarf nach Technologie in Schwellen- und Dritte-Welt-Ländern wachsen rapide. Allerdings fehlt der ökonomische Anreiz zum Recycling, solange die primären Ressourcen nicht erschöpft sind und der Abbau in den Minen somit kostengünstiger ist. Zudem sind die meisten Recyclingverfahren heute noch relativ teuer, da sehr viele Schritte und Reinigungsstufen notwendig sind, um hochkomplexe Mischungen verschiedener chemisch sehr ähnlichen Elemente in ihre Einzelteile zu zerlegen – und zwar mit einer sehr hohen Reinheit. Insbesondere rohstoffarme Länder, wie Deutschland und die gesamte EU, sind abhängig von Importen wichtiger Rohstoffe, die zum Teil streng reglementiert sind. So besitzt etwa China einen Marktanteil von über 95 % an Seltenen Erden, wobei Exportquoten und Ausfuhrzölle die Marktpreise zusätzlich erhöhen. In der High-Tech-Industrie sind Seltene Erden unabdingbar, da diese ungewöhnliche magnetische und optische Eigenschaften aufweisen und wichtiger Bestandteil in PCs, Handys, Windkraftanlagen, Elektrofahrzeuge etc. sind. Auch das EU-Forschungsrahmenprogramm Horizont 2020 weist auf die Entwicklung effizienter Recyclingverfahren zur Stärkung der Europäischen Union als innovativen Technologiestandort hin. Es existieren einige vielversprechende Ansätze, z.B. (elektro-)magnetische, thermische, chemische oder bioverfahrenstechnische Konzepte, beziehungsweise ein Mix aus diesen als hybride Verfahren. Ein aktuelles Forschungsprogramm an der TU Kaiserslautern befasst sich mit der mikrostrukturierten Flüssig-Flüssig-Extraktion von wertvollen Metallen bzw. Metallionen, z.B. aus Elektroschrott.

Daten und Fakten: Seltene Erden			
Leichte Seltene Erden		Schwere Seltene Erden	
Sc	Scandium	Y	Yttrium
Ce	Cer	Gd	Gadolinium
La	Lanthan	Tb	Terbium
Pr	Praseodym	Dy	Dysprosium
Nd	Neodym	Ho	Holmium
Pm	Promethium	Er	Erbium
Sm	Samarium	Tm	Thulium
Eu	Europium	Yb	Ytterbium
		Lu	Lutetium

**Weltweite Reserven an Seltenen Erden:**  
99.000.000 Tonnen (United States Geological Survey)

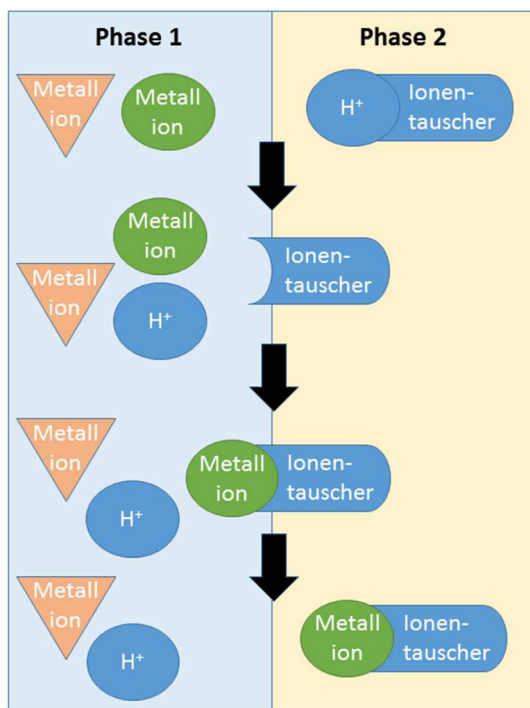
**Förderung in 2009:**  
124.000 Tonnen (davon 120.000 Tonnen aus China)

**Neodym-Preis in 2012:**  
ca. 235 \$/kg (Quelle: HEFA Rare Earth)

### Extraktion von Metallen

Unter Extraktion versteht man das selektive Herauslösen eines Wertstoffes aus festen oder flüssigen Stoffgemischen mit Hilfe flüssiger Lösungsmittel. Das einfachste Beispiel ist das Kaffeekochen. Hierbei wird mit Hilfe des Lösungsmittels Wasser Koffein und Aromastoffe aus der gemahlene Kaffeebohne extrahiert. Die Extraktion beruht auf der guten Löslichkeit der Stoffe im Wasser. Die Menge bzw. das Verhältnis der Konzentrationen (Phasengleichgewicht) der Wertstoffe im Wasser und die zurückgebliebenen Wertstoffe in der Kaffeebohne wird durch die Thermodynamik bestimmt. Dasselbe Prinzip der Extraktion kann natürlich auch auf andere Stoffsysteme übertragen werden: Die Extraktion von Metallionen in wässrigen Lösungen (Phase 1) mit einem organischen Lösungsmittel, z.B. Heptan

(Phase 2). Metallionen entstehen aus Metallatomen durch die Abgabe von Elektronen (Oxidation) und sind positiv geladen. Allerdings besitzen Metallionen keine Eigenlöslichkeit im organischen Lösungsmittel, deshalb muss diesem noch ein sogenannter Ionentauscher beigemischt werden, der an der Phasengrenzfläche der beiden nicht-mischbaren Phasen das Metallion bindet und hierbei ein Proton ( $H^+$ ) im Austausch freisetzt. Somit ist es möglich aus einem komplexen Stoffgemisch verschiedener Metallionen diese selektiv, durch geeignete Wahl des Ionentauschers, aufzuarbeiten und zu trennen.



*Prozess der Metallextraktion: Ionentauscher tauscht an der Phasengrenzfläche selektiv ein spezifisches Metallion mit einem Proton. Nicht passende Metallionen bleiben zurück.*

### Prozessintensivierung durch Mikrostrukturierung

Die Mikroverfahrenstechnik ist eine relativ neue Disziplin, mit dem Ziel konventionelle Verfahren im Mikrometermaßstab abzubilden. Diese Verfahren sollen somit noch effizienter gestaltet werden, man spricht hier von einer Prozessintensivierung. Dies führt soweit, dass ganze Produktionsanlagen in Containern oder Aktenkoffern Platz finden (Stichwort: „Lab-on-a-chip“). Hauptgrund sind hier ein höheres Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis und kürzere (Diffusions)

Wege für den Stofftransport oder anders ausgedrückt, es können mehr theoretische Trennstufen pro Volumeneinheit erzielt werden. Allerdings sind die Durchsätze um ein Vielfaches geringer, weshalb diese Technik nur bedingt Anwendung findet. Auch für Extraktionsprozesse bestehen verschiedene Ansätze zur Mikrostrukturierung, die eine effizientere Trennung bzw. die Aufarbeitung insbesondere niedrig konzentrierter Wertstoffströme ermöglichen soll.

### Computerfestplatte als Wertstoffmine

Handelsübliche Computerfestplatten sind wahre Rohstoffminen für eine Reihe von wertvollen Metallen und Seltenen Erden. Ein besonderes Augenmerk soll hierbei auf die darin verbauten Neodym-Eisen-Bor Magnete im Schreib- und Lesekopf gelegt werden. Zurzeit besteht kein wirtschaftliches Recyclingverfahren zur Rückgewinnung der einzelnen Elemente eines solchen Magneten. Meistens erfolgt nach Datenlöschung lediglich die Zerlegung in einzelne Bauteile, die dann anschließend geschreddert und/oder eingeschmolzen werden. Eine durchschnittliche Festplatte beinhaltet immerhin 10 – 20 g eines solchen Magneten mit einem relativen Anteil von ca. 30 % an Neodym. Zudem werden weitere Elemente wie Dysprosium, Europium, Terbium und Erbium für eine höhere Leistungsfähigkeit beigemischt. Ziel und Herausforderung zugleich ist nun die hochreine Trennung dieser Elemente. Aufgrund der chemisch und physikalisch sehr ähnlichen Eigenschaften dieser Elemente ist die Trennung hochkomplex und mit vielen aufeinanderfolgenden Prozessschritten verbunden. Einer dieser Prozessschritte umfasst nun die selektive Flüssig-Flüssig-Extraktion einzelner Elemente. Zuvor müssen die Metallverbindungen in Lösung gebracht werden, dies geschieht meistens mit Schwefel- oder Salzsäure. Es entstehen verschiedene Metallsalzverbindungen und Metallionen, die zum Teil in nachfolgenden Fällungsreaktionen abgetrennt werden. Neodymionen können auch selektiv herausextrahiert werden. Als Extraktionsmittel dienen organische Lösungsmittel (Petroleum, langkettige Alkane) mit hochspezifischen Ionentauschern, die bevorzugt nur eine chemische Bindung mit dem Neodymion

eingehen. Als Ionentauscher werden z.B. D2EHPA oder PC88A eingesetzt. Um nun diesen Neodym-Ionentauscher-Komplex wieder zu zerstören und das Metallion freizusetzen ist eine Reextraktion mit Säure notwendig, hierbei tauscht der gebildete Komplex nun das Neodym(III)-Ion wieder mit einem Proton der Säure aus, der Ionentauscher ist somit wieder regeneriert und das Neodymion in der wässrigen Phase isoliert. Ein mikrostrukturiertes Apparatekonzept soll diesen Prozess - wie oben beschrieben - effizienter gestalten. Aktuell finden hierzu Grundlagenforschungen im eigens entwickelten Mikroextraktor an der TU Kaiserslautern statt, um einen kleinen Schritt im Gesamtprozess des Metallrecyclings besser zu verstehen.



Apparat zur Mikroextraktion von Metallionen.

## Ausblick

Nicht nur altausgediente Festplatten sind Gegenstand des Urban Minings. Seltene Erden und andere wertvolle Elemente stecken in fast allen Elektrogeräten. Moderne Techniken wie Elektrofahrzeuge und Windkraftanlagen benötigen Seltene Erden Metalle wie Neodym für leistungsfähige Magneten. Die Nachfrage und somit der Preis solcher Metalle wird in naher Zukunft steigen und somit auch der Anreiz des Recyclings als wirtschaftlichen Prozess.

## Literatur

- [1] Fraunhofer-Magazin 2013, Recycling 2.0 – perfekt getrennt.
- [2] Horizon 2020 - Work Programme 2014 – 2015.
- [3] Lee, M.-S.; Lee, J.-Y.; Kim, J.-S.; Lee, G.-S. (2005), *Sep. Purif. Technol.* 46 (1-2), S. 72–78.

[4] Sanchez, J.M; Hidalgo, M.; Salvadó, V.; Valiente, M. (1999), *Solvent Extr. Ion Exch.* 17 (3), S. 455–474.

[5] Sattler, K. (2012), *Thermische Trennverfahren*, Wiley.

[6] Eigene Forschungsarbeiten.