

Keine Energiewende ohne seltene Elemente?

Alex Bradshaw
*Max-Planck-Institut für Plasmaphysik,
Garching/Greifswald und Fritz-Haber-Institut
der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin*



© 2007 MP-TEC GmbH & Co. KG



Foto: AMB



Foto: Wikimedia Commons



Foto: Siemens



Werden Rohstoffe knapp?

IPP

Frankfurter Allgemeine
ZEITUNG FÜR DEUTSCHLAND

02.02.2011

Vorsorge gegen Rohstoffknappheit

02.02.2011 · EU will Förderung auf eigenem Gebiet verbessern

Hmk. BRÜSSEL, 2. Februar. Die EU soll ihre Versorgung mit knappen Industrierohstoffen durch eine gezielte Handelspolitik und die Förderung auf eigenem Gebiet verbessern. Die Europäische Kommission hat die Mitgliedstaaten am Mittwoch in Brüssel bei der Vorstellung ihrer neuen Rohstoffstrategie aufgefordert, die Hürden für die Genehmigung des Abbaus

Handelsblatt

21.06.2012

Rohstoff-Knappheit bedroht Deutschlands Industrie

Deutschlands Industrie ist auf die Versorgung mit Rohstoffen angewiesen. Doch die Ressourcen sind knapp, die Preise von wichtigen Grundgütern steigen. Die Abhängigkeit von Importen bedroht die heimische Wirtschaft.

Düsseldorf. Für Deutschlands Unternehmen wäre es ein Horrorszenario: Die Versorgung mit Rohstoffen ist abgebrochen, die Energiequellen versiegt. Binnen kürzester Zeit stünden die Bänder in den Fabriken still, die Produktion würde zum Erliegen kommen. Am Ende geht beim Exportweltmeister Deutschland das Licht aus.

07.12.2011

Bloomberg Our Company | Professional | Anywhere

HOME QUICK NEWS OPINION MARKET DATA PERSONAL FINANCE TECH POLITICS S

Lithium, Cobalt Among Minerals Facing Chronic Shortage, PwC Says

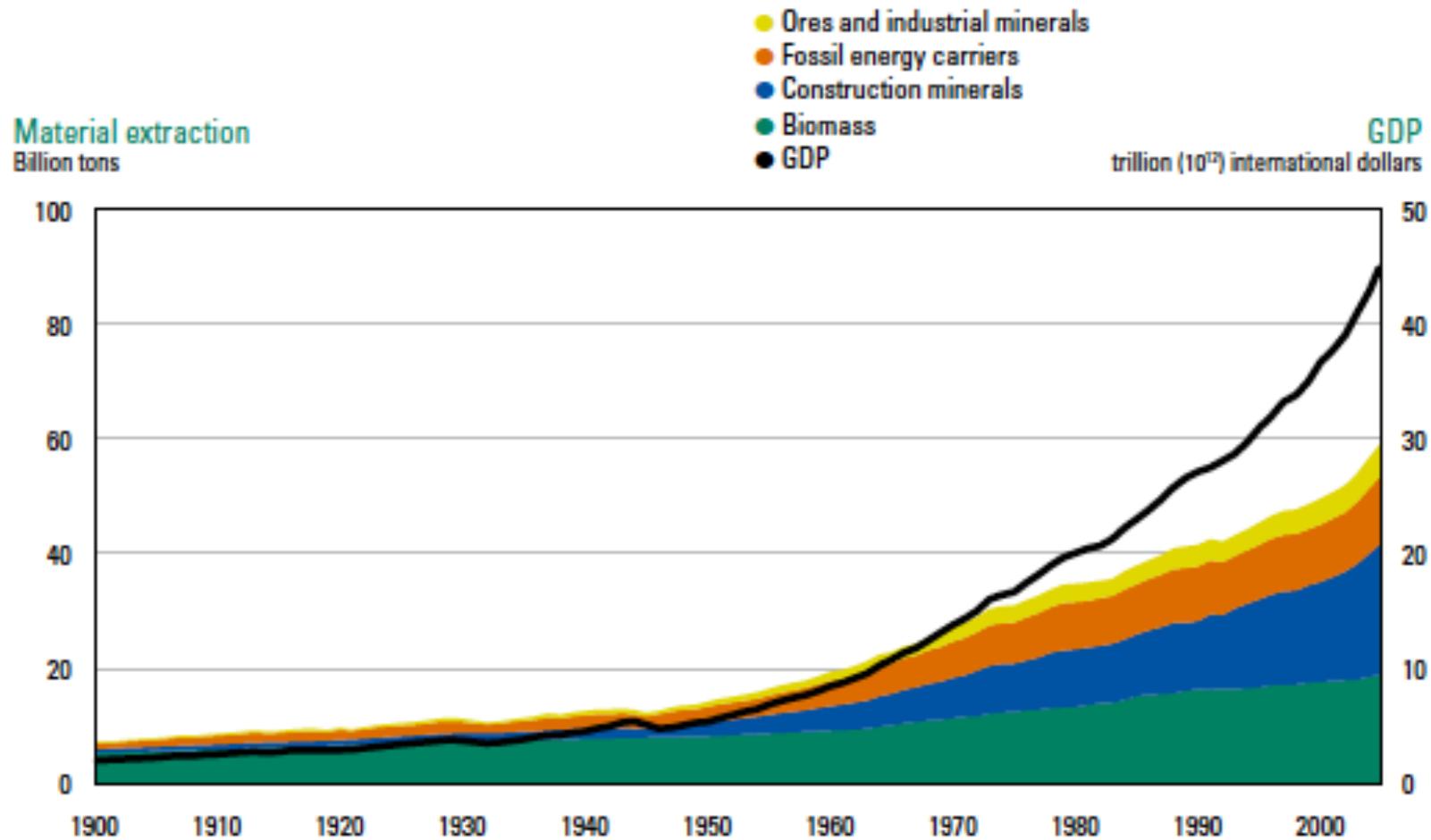
By Jesse Riseborough - Dec 7, 2011 1:00 AM GMT+0100

f t in +1 0 COMMENTS + QUEUE

Global manufacturers may face a critical shortage of 14 raw materials over the next five years affecting industries including chemicals, aviation and renewable energy, according to PricewaterhouseCoopers LLP.



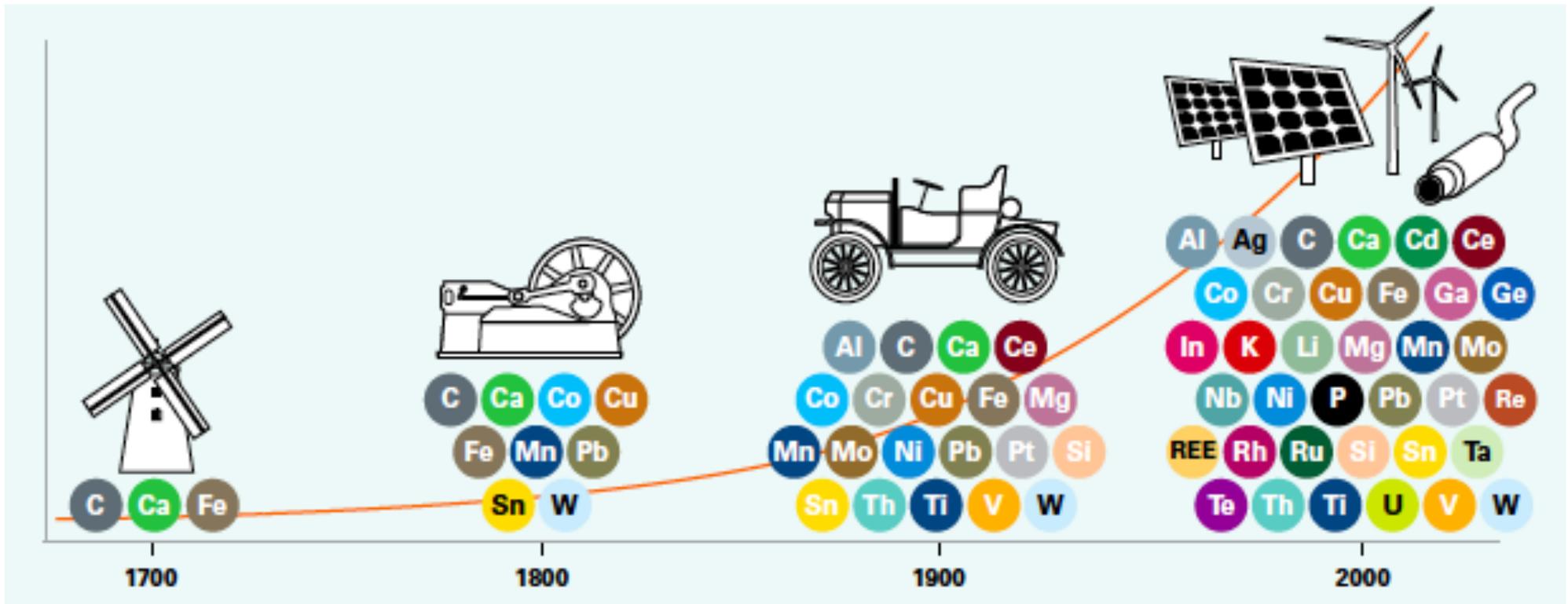
Globaler Verbrauch von Rohstoffen 1900 - 2005



Quelle: Krausmann et al, Ecological Economics 68 (2009) 2696; Graphik: UNEP Report 2011



Anzahl der Elemente für die Erzeugung, Verteilung und Speicherung von Energie



Graphik: Achzet et al, *Materials critical to the energy industry*, Universität Augsburg (2011)



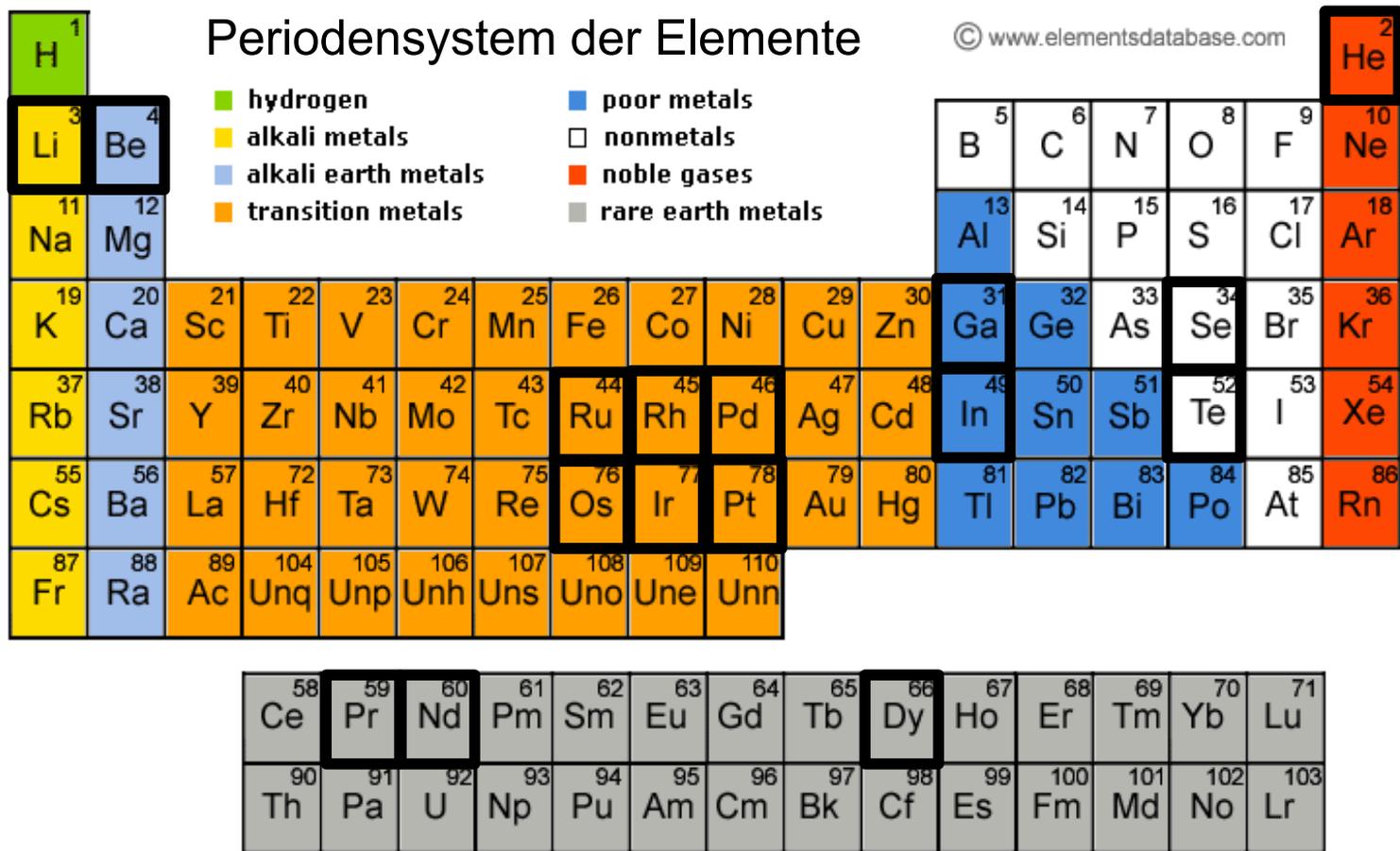
Periodensystem der Elemente

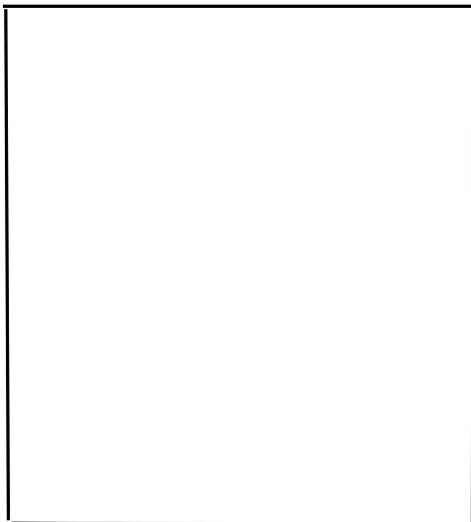
© www.elementsdatabase.com

1 H																	2 He														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne														
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn														
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn																						
																		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
																		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



So genannte „energie-kritische“ Elemente





In den letzten Jahren stieg der Verbrauch seltener Elemente auch in anderen Sparten, vor allem in der Informationstechnologie und Kommunikation : Neben Cu zusätzlich kleine Mengen an Au, Ag, Pt, Pd, In, Ta, W, Li, Sn, Cr, Mn, Co, Ga, As, Sr, Y, Zr, Mo, Ru, Sb, etc.

Im UNEP-Bericht *Recycling rates of metals* (2011) wird geschätzt, dass ein Mobiltelefon mindestens 60 verschiedene Elemente beinhaltet!



Geochemisch reichlich vorhandene Elemente:

Al, Fe, Mg, Mn, Si, Ti

Konzentration in der Erdkruste höher als 0.1% Gewicht
(1000 ppm)

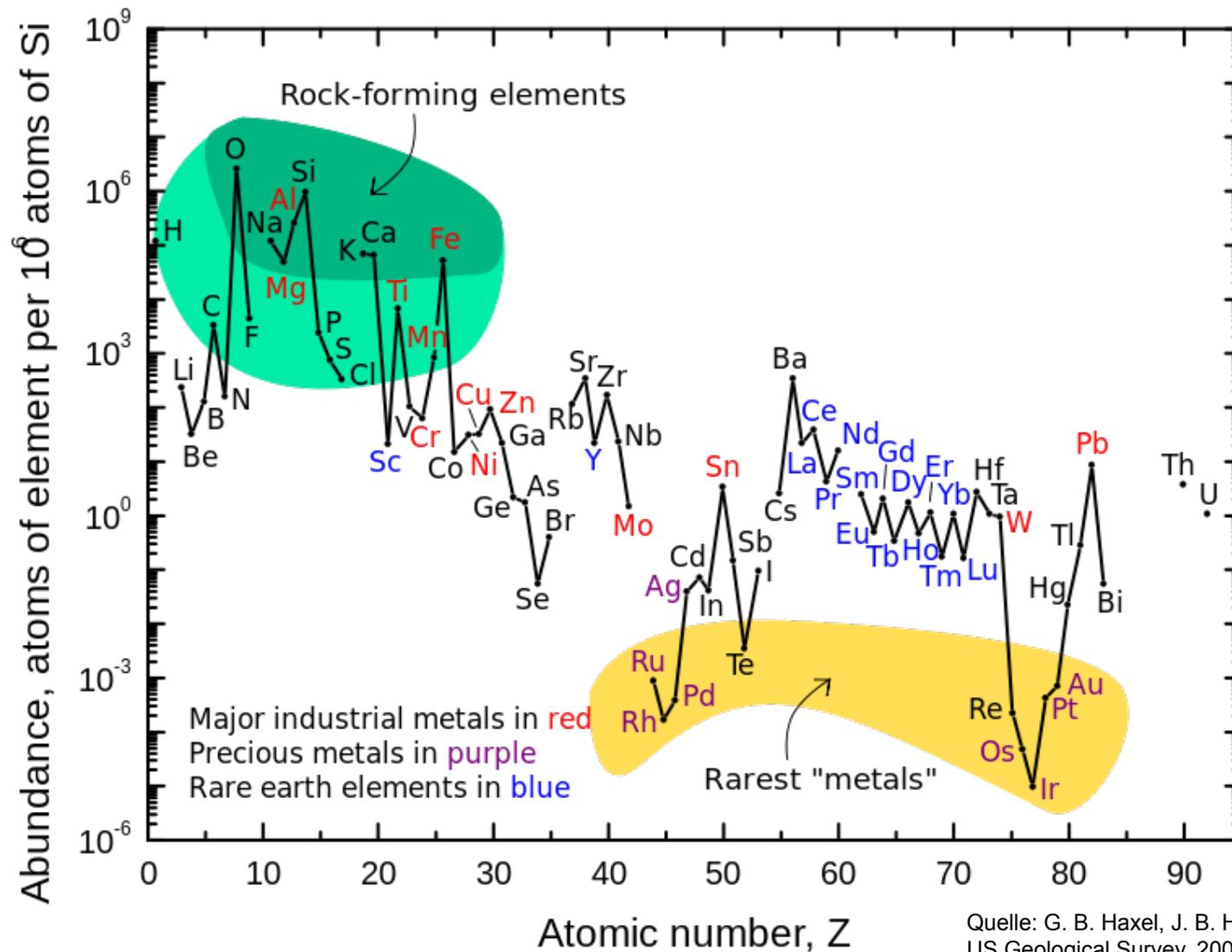
Geochemisch seltene Elemente (weniger als 1000 ppm):

- Ferrolegierungsmetalle, z.B. Co, Ni, W
- unedle Metalle, z.B. Cu, Pb, Hg
- Edelmetalle, z.B. Au, Ag, Pt
- Sondermetalle, z.B. Li, In, Ta, Seltene Erdelemente

Aber wie selten sind seltene Elemente wirklich?



Geochemische Häufigkeit der Elemente in der kontinentalen Erdkruste (bezogen auf Silizium)





Beispiel: Kupfer, viele große Lagerstätten



Häufigkeit in der
Erdkruste ca. 50 ppm

Chuquibambilla, Chile:
Weltgrößtes Übertage-
Kupferbergwerk.
Tiefe 900 m; Länge 4.5 km

Foto: Wikimedia Commons

Beispiel eines seltenen Elements, das in großen Lagerstätten (hauptsächlich als CuFeS_2 and Cu_2S) in Konzentrationen von 0.3 - 0.9% vorkommt.



„Artisanal mining“

Coltanerze –
Blutdiamanten
unserer Zeit?



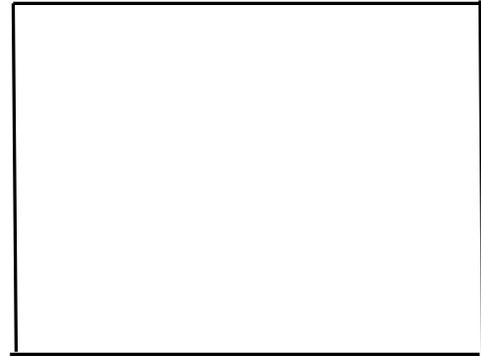
Quelle: Manuel Ziegler, IT-Consultant



Kinderarbeit Beim Abbau von Coltan
[Columbit-Tantalit, $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Sb})_2\text{O}_6$]
im Kongo.



Abbau von Wolframit
(FeWO_4) im Kongo

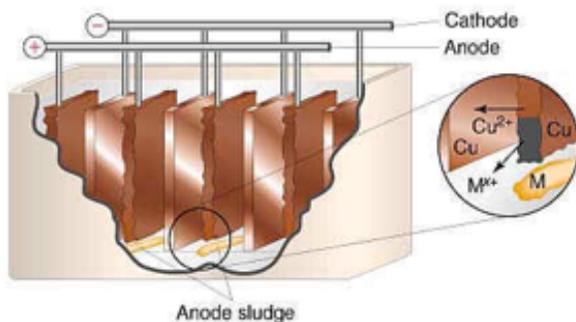


Handwerklicher Bergbau
("artisanal mining") in
einer chinesischen
Seltene-Erden-Mine

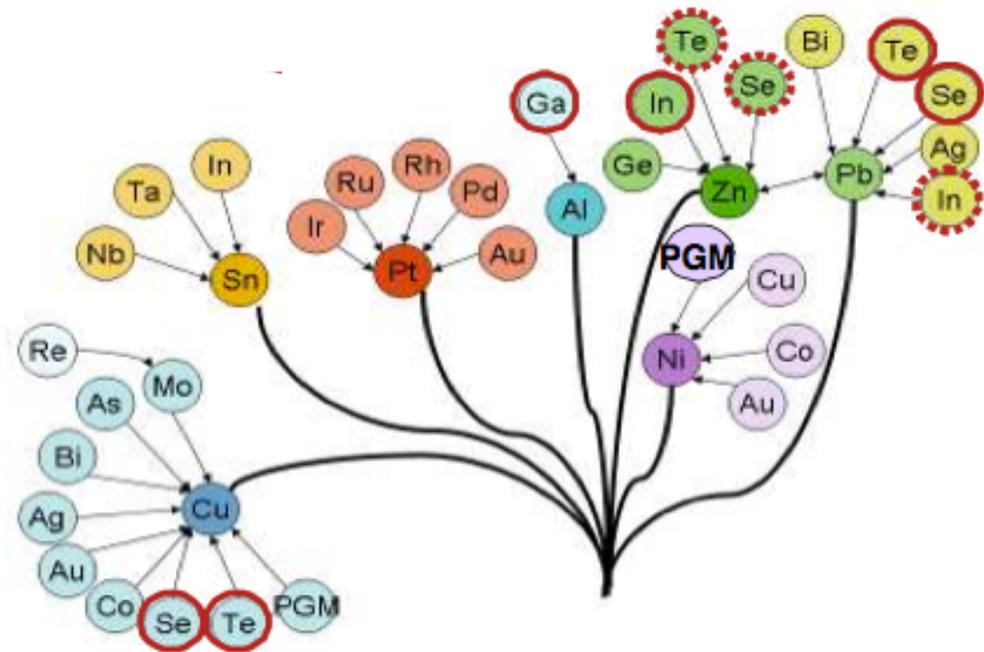


Viele (seltene) Metalle sind “Nebenprodukte” bei der Gewinnung von Kupfer, Zinn, Zink, Blei, Nickel, Platin und Aluminium.

Tellur wird hauptsächlich aus dem Anodenschlamm bei der elektrolytischen Raffination von Kupfer gewonnen.
1 t Cu produziert 1 g Te.



Graphik: corrosion-doctors.org



Graphik: Hagelüken und Meskers, Umicore



Trotz starken Rückgangs des fossilen Brennstoffverbrauchs wird es dennoch weiterhin einen hohen Bedarf an Rohstoffen geben. Viele von diesen werden für die Erzeugung, Transmission, Speicherung und Verwendung von Energie aus erneuerbaren Quellen – in manchen Ländern auch aus der Kernenergie – benötigt.

Beispiele für “Energiermaterialien”:

- Seltene-Erdelemente für Windturbinen und Elektroautos
- CdTe und CIGS für Solarzellen
- Lithium und Kobalt für Batterien
- Beryllium, Helium für die Kernfusion



Foto: Siemens



Foto: Wikimedia Commons



CdTe-Dünnschicht-Photovoltaik (7% Marktanteil 2011)

Cadmium: Selten. Wird auch für Ni-Cd-Batterien verwendet, aber kaum noch in der EU. Nebenprodukt beim Abbau von Zn (0.3% in Sphalerit, ZnS). Reserven (USGS) 640 kt, Ressourcen \approx 5 Mt.

Tellur: Sehr selten. Nebenprodukt bei der Gewinnung von Cu und Pb. Jährliche Produktion \approx 500 t. Reserven (USGS) 24 kt, Ressourcen \approx 0.1 Mt (?).

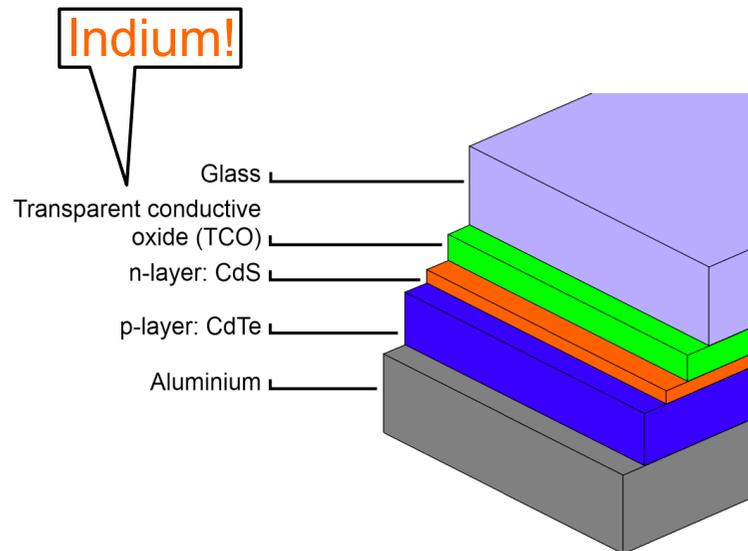


Foto: Solar Power Plant Information Center

Waldpolenz Solar Park, Sachsen
CdTe (First Solar)



Neodym, Praseodym, Dysprosium

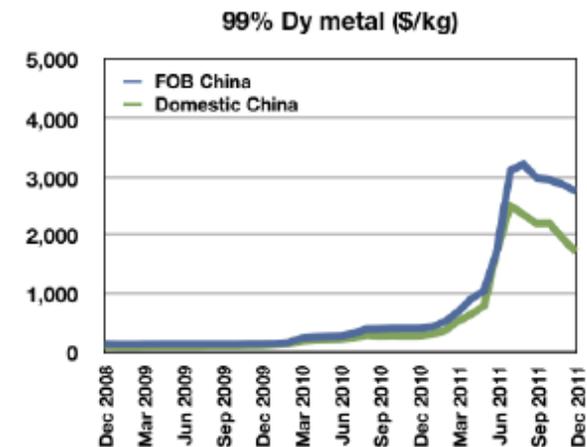
SEE kommen hauptsächlich in den Mineralen Monazit, $CeYPO_4$, und Bastnäsit, $CeFCO_3$ vor. Sind sie wirklich knapp? Eigentlich nicht so selten, aber wenig „gute“ Lagerstätten. Reserven (USGS): 110 Mt (aber nur 1% davon Dy). Ressourcen sehr viel größer.

$Nd_2Fe_{14}B$ wird als Dauermagnetwerkstoff für *synchrone* Generatoren bzw. Motoren in Windturbinen (2011: 14% Marktanteil) und in der Elektromobilität vorgezogen. Erfahrungswert: ca. 100 - 200 kg pro MW.



The rare earth mine in Bayan Obo, Inner Mongolia autonomous region.

Foto: Wu Changqing (China Daily)

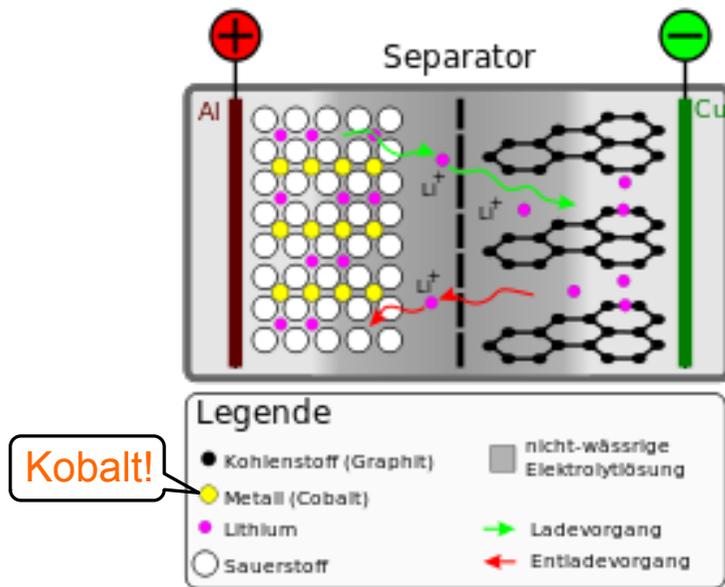


Quelle: Gareth P. Hatch, Technology Metals Research, LLC



Lithium

Es gibt zwei Quellen für Lithium: Minerale, z.B. Spodumen, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_4$ und Salzlauge unter den “Salaren” in den Anden und im Himalaya. Verwendung: Glas- und Keramikindustrie 29%, **Batterien 27%**. Jährliche Produktion: 34.000 t (2011). USGS: Reserven = ca. 13 Mio. t. Ressourcen = ca. 30 Mio. t



Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie (positive Elektrode: LiCoO_2 ; negative Elektrode: Li-Graphit).
Source: <http://www.stromtip.de>

Salar de Uyuni, Bolivia: 5 Mio. t Lithium



Foto: SGW@raphme

Aber Lithium wird man auch für die Kernfusion brauchen!



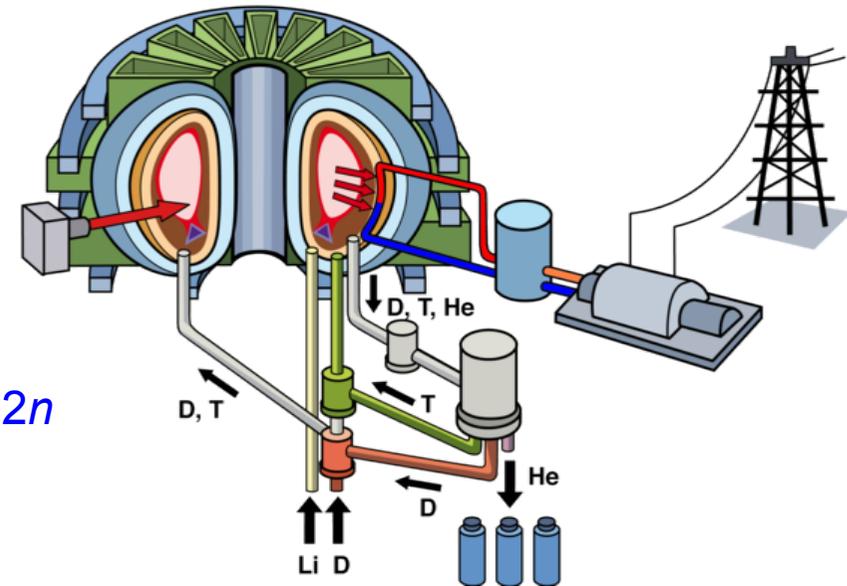
Fusionsreaktion:



Erbrütung von Tritium:



Dafür wird ein Neutronenvervielfacher benötigt (Be or Pb), e.g. ${}^9\text{Be} + n = {}^{12}\text{C} + 2n$



Beryllium

Nicht sehr selten (ca. 2 ppm in der Erdkruste), aber kaum Lagerstätten vorhanden. Jährliche Produktion: 240 t (2011). Ressourcen: 80.000 t.

Helium

Gewonnen durch die fraktionierte Destillation von Erdgas (Konzentration zwischen 0,01 und 1 %). Benötigt für die Kernfusion (supraleitende Magnete und Kühlmittel) und in manchen G4-Spaltungsreaktoren.



Annahme: 60 % Beitrag der erneuerbaren Energien zur globalen Energie-Produktion (entspricht dem Ziel der deutschen „Energiewende“, allerdings nur für Deutschland – *Energiekonzept*, BMWi, 2010) → ca. 150 000 TWh

Weitere Annahme: Portfolio setzt sich aus 30 % Wind, 30 % PV (ein Drittel jeweils CdTe and CIGS), 30 % Solarthermie, 10 % Anderen zusammen.

Wind

Installierte Kapazität wäre ca. 10 TWp mit „capacity factor“ von 50 %.
100 – 200 kg MWp⁻¹ Nd, Pr und Dy werden für synchrone Generatoren mit Permanent-Magneten benötigt. → 1 – 2 Mt „in-use stock“ 2050

Photovoltaik

Installierte Kapazität wäre jeweils 6 TWp für CdTe und CIGS.

Ergibt „in-use stock“ 2050 →

Cd, Te ca. 0,5 Mt In ca. 0,1 Mt, Ga ca. 0.04 Mt, Se ca. 0.3 Mt



Sind Mineralressourcen in der Erdkruste begrenzt? Gibt es bereits eine Knappheit? Könnten sie sogar zur Neige gehen?

Was ist Knappheit? Kann nur ökonomisch definiert werden: Die Nachfrage kann nicht vom Angebot gedeckt werden, was zu höheren Preisen führt. Mehrere Gründe können dafür verantwortlich sein:

- Sprünge in der Nachfrage: durch z.B. schnelles wirtschaftliches Wachstum, neue Anwendungen, Spekulation
- Angebotsseite: Investitionshemmnisse
- Naturkatastrophen, geopolitische Faktoren, Umweltbedenken
- gewünschtes Element ist ein Nebenprodukt
- **geochemische Knappheit**

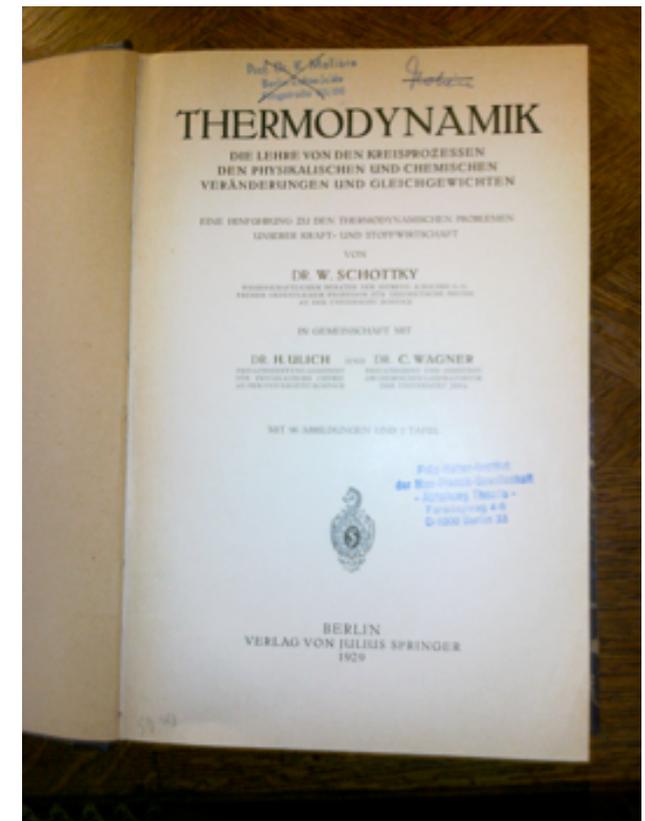
„Mineral depletion“ (zur Neige gehen der Ressourcen) könnte eine Rolle spielen: Die inflationsjustierten Preise steigen, und gleichzeitig fällt die durchschnittliche Konzentration des Metalls im Erz.



Sind Mineralressourcen in der Erdkruste begrenzt? Gibt es bereits eine Knappheit? Könnten sie sogar zur Neige gehen?

W. Schottky, 1929

„Die Zeit des unbedenklichen Wirtschaftens mit den Energiequellen und Stofflagern, die uns die Natur zur Verfügung gestellt hat, wird wahrscheinlich schon für unsere Kinder nur noch die Bedeutung einer vergangenen Wirtschafts-epoche haben. Dass die Optimisten recht behalten, die auf die Erschließung ungeahnter neuer Wege zur Energiegewinnung und Stoffumwandlung hoffen, wollen wir wünschen....“





Meadows and “The Limits to Growth” 1972

IPP

D. Meadows et al, 1972. *The Limits to Growth: A report for the Club of Rome’s project on the predicament of mankind*

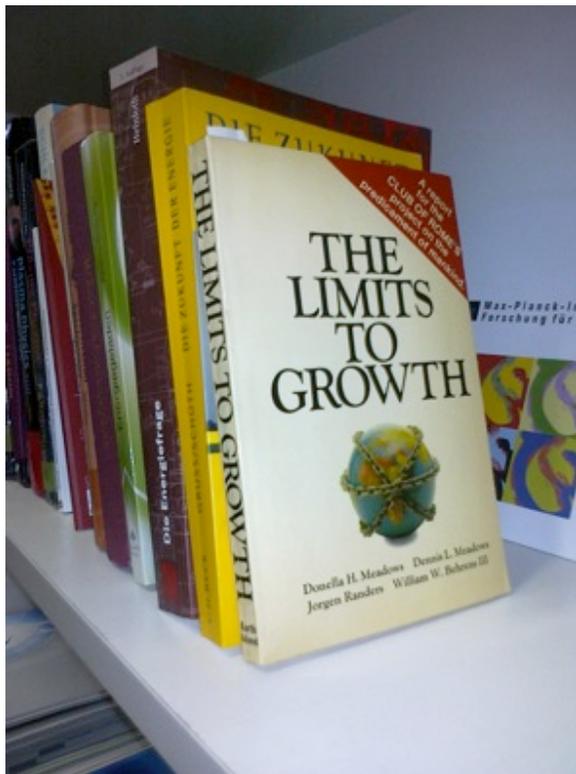


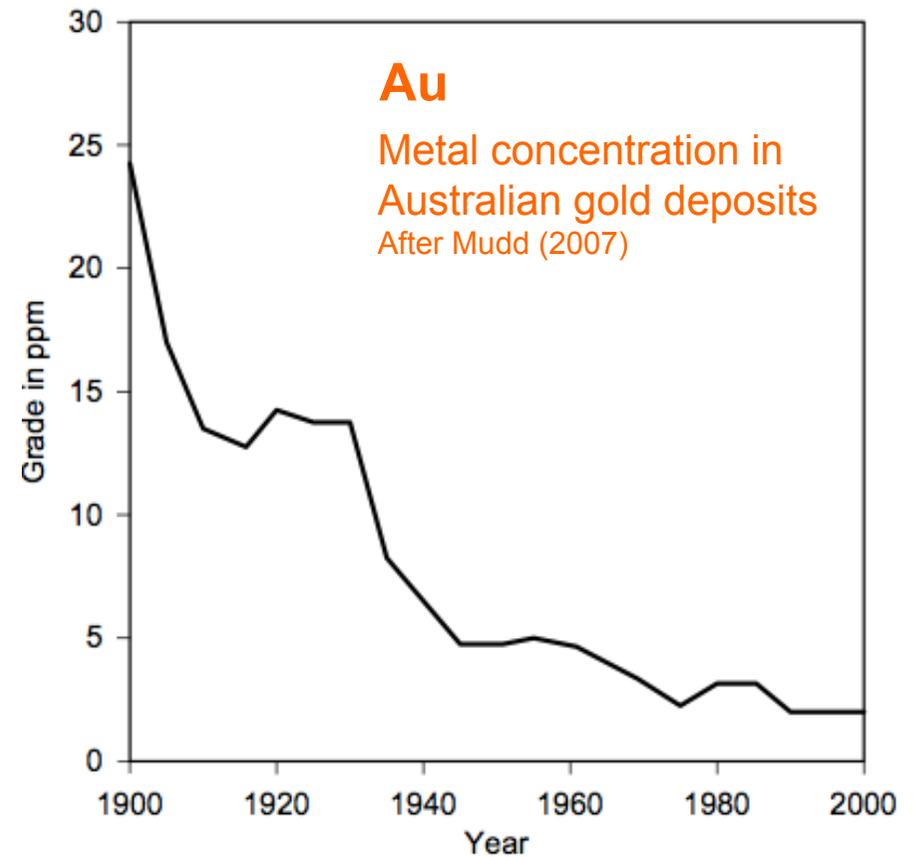
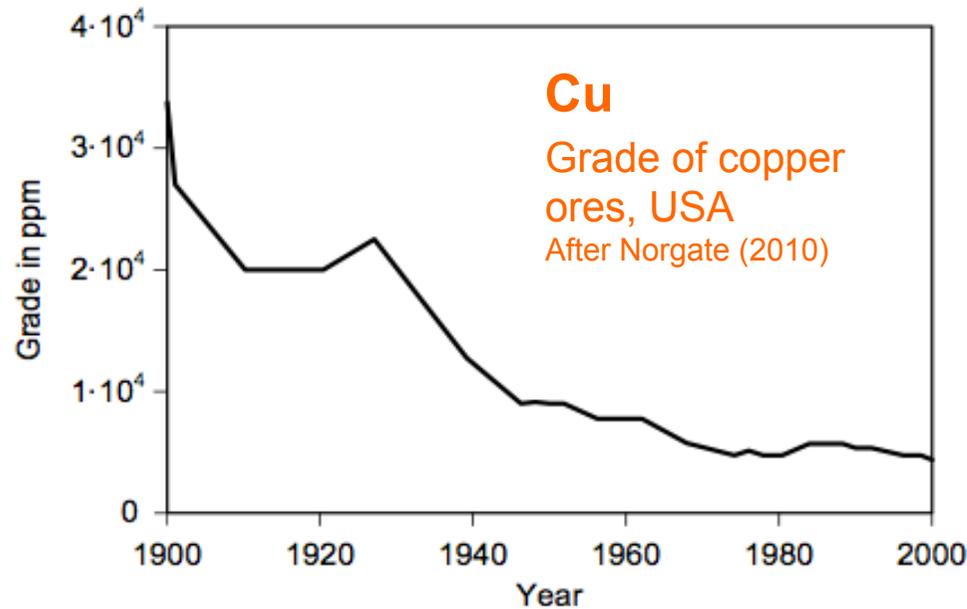
Photo: AMB

Meadows und seine Koautoren haben für 19 Rohstoffe (einschließlich Kohle, Erdöl und Erdgas) die “dynamic lifetime”, oder “dynamische Lebensdauer”, berechnet.

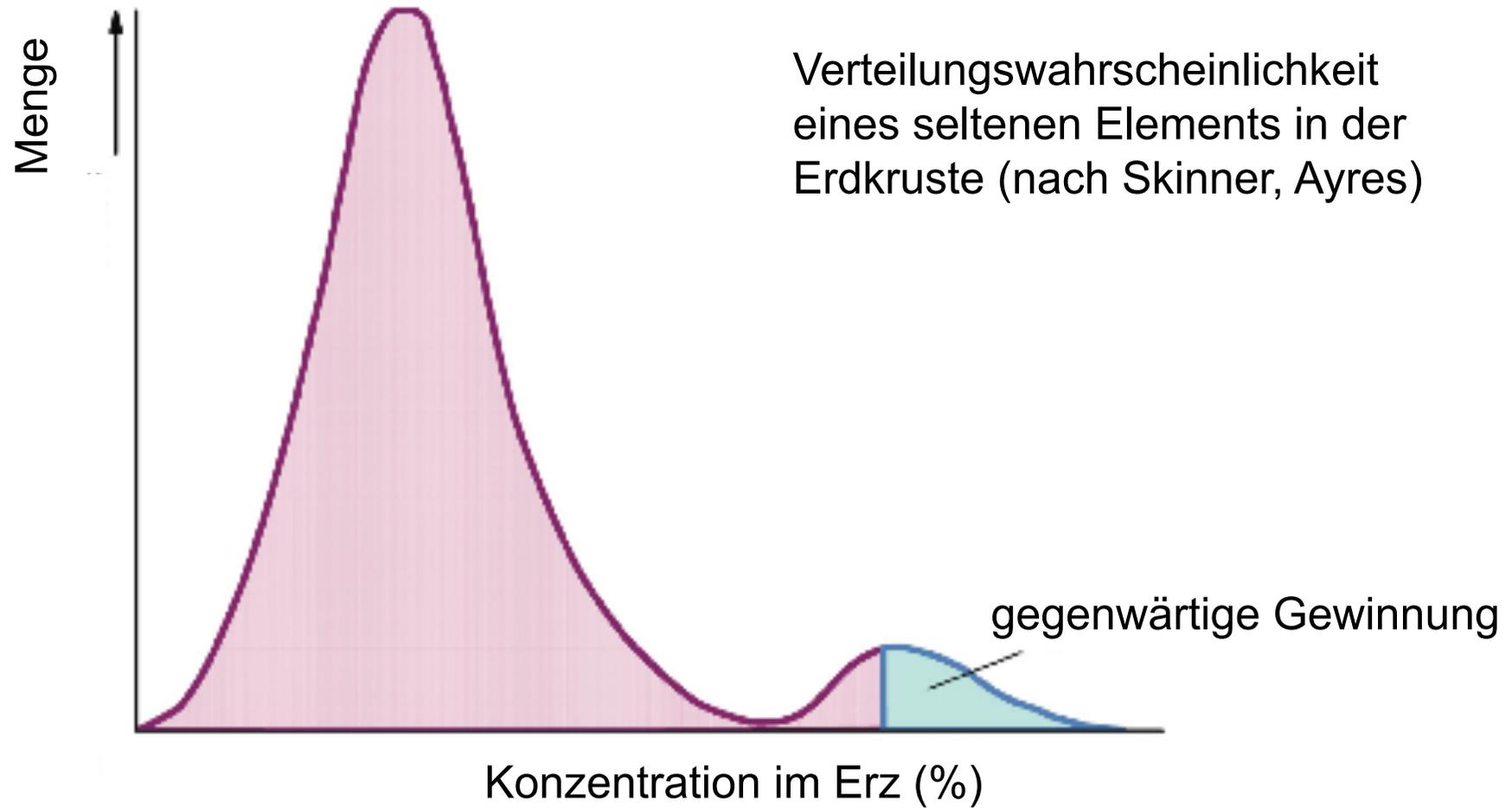
Ihre Schlussfolgerung: *“Auf der Basis des gegenwärtigen Ressourcenverbrauchs und seiner projizierten Steigerungsrate wird die überwiegende Mehrheit der jetzt wichtigen nicht-erneuerbaren Ressourcen in 100 Jahren extrem teuer sein.”*



Abnahme der Mineralbestände



In einem Land oder in einer Region nimmt als Funktion der Zeit die durchschnittliche Konzentration des Erzes ab, da die "besten" Lagerstätten als erste ausgebeutet werden.





Sollten wir uns über zur Neige gehende Mineralressourcen Sorgen machen? - JA

Eine komplette Mineralerschöpfung wird nie stattfinden. Minerale in der Erdkruste oder in den Ozeanen wird es immer geben. Jedoch wird der Zeitpunkt kommen, wenn – auf Grund der Notwendigkeit, Erze zunehmend niedrigerer Konzentration zu gewinnen – die benötigte Energie (und möglicherweise auch die Wassermenge) zu hoch und die damit zusammenhängenden Umweltschäden zu groß sein werden, so dass die Gewinnung von vielen Rohstoffen zu einem Ende kommen wird. **Dies gilt auch für viele „Energie-Materialien“.**

Dürfen wir eine solche Situation zukünftigen Generationen hinterlassen?

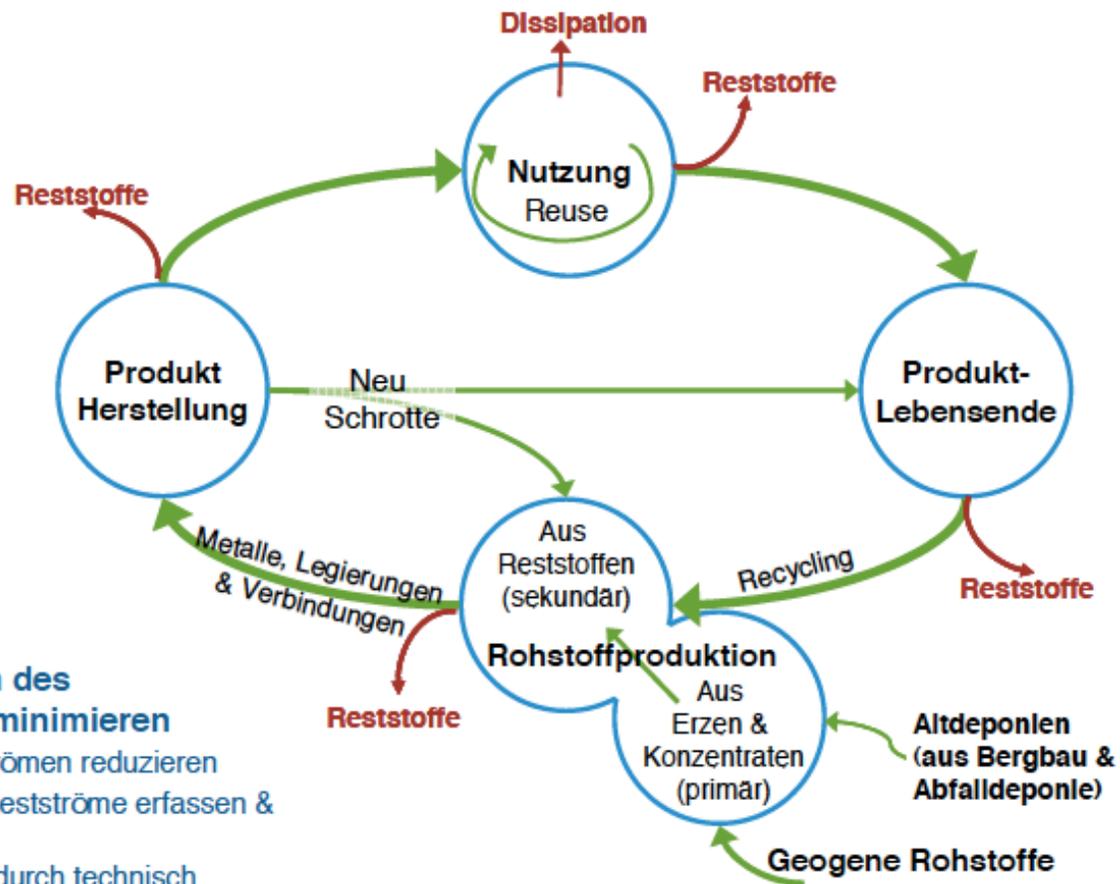


Wie können wir Rohstoffe effizienter nutzen?

- Höhere Effizienz beim Abbau, bei der Verarbeitung und Nutzung
- (Verwertung vom bisherigen Abfall)
- „Re-use“ und Recycling, einschließlich recycling-orientiertes Produktdesign.
Wie erfolgreich ist Recycling zurzeit? UNEP-Report!
- Substitution
- Verhaltensänderung



- Metalle können ohne Qualitätsverlust „unendlich oft“ recycelt werden



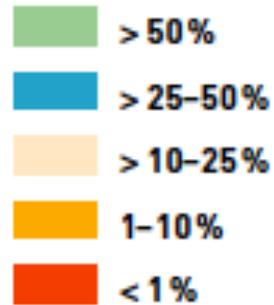
C. Hagelüken
UMICORE
2012

Metallverluste über alle Stufen des Lebenszyklus minimieren

- Anfall von Restströmen reduzieren
- Unvermeidbare Restströme erfassen & recyceln
- Metallausbeuten durch technisch hochwertige Verfahren optimieren



End of Life Recycling Rate (EoL-RR) für 60 Metalle



1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Sg	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uug	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

Graphik: T. Graedel, C. Hagelüken et al, *Recycling Rates of Metals*, UNEP Report (2011)

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Recycling

Nicht so ...



Recycling von Elektronik-Schrott in Neu-Dehli
Quelle: Wikimedia Commons



Arbeiter in einem Recycling-Hof
in China
Quelle: Euronews

Sondern so ...



UMICORE: Neue Batterie-Recycling-Anlage, Hoboken, Belgien



Wie können wir Rohstoffe effizienter nutzen?

- Höhere Effizienz beim Abbau, bei der Verarbeitung und Nutzung
- (Verwertung vom bisherigen „Abfall“)
- „Re-use“ und Recycling, einschließlich recycling-orientiertes Produktdesign.
Wie erfolgreich ist Recycling zurzeit? UNEP-Report!
- Substitution
z.B. Si (a- oder c-) an Stelle von CdTe oder CIGS, Cu an Stelle von SSE!
- Verhaltensänderung

Acknowledgements: Thomas Hamacher (Institut für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TU München) und Benjamin Reuter (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München)

