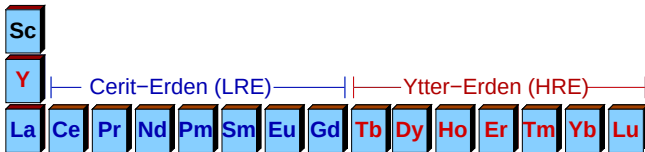


Lanthanoide – Seltene Erden

1. Einleitung



Vorlesung WS 2021/2022



1. **Einleitung**
 - 1.1. Die Elemente: Einordnung ins PSE, Entdeckung und Benennung ✓
 - 1.2. Verwendung und Bedeutung der *Ln*-Elemente (Übersicht)
 - 1.3. Vorkommen/Minerale, Gewinnung, Trennung, Wirtschaftliches (Übersicht)
2. **Atomare physikalische Eigenschaften**
 - 2.1. Elektronenkonfiguration und magnetische Eigenschaften
 - 2.2. Optische Eigenschaften wichtiger *Ln*-Ionen
3. **Chemische Eigenschaften**
 - 3.1. Oxidationsstufen und Redoxpotentiale
 - 3.2. *Ln*-Ionen in wässriger Lösung
4. **Halogenide**
5. **Oxide, Oxidhalogenide und Sulfide**
6. **Salze mit Oxido-Anionen**
7. **Lumineszenz-Materialien**
8. **Metalle und Legierungen**
9. **Komplexe**
10. **Weitere anwendungsrelevante Verbindungen**

① Die Elemente: Einordnung ins PSE, Entdeckung und Benennung

② Verwendung und Bedeutung der *Ln*-Elemente (Übersicht)

③ Minerale/Vorkommen, Gewinnung, Trennung, Wirtschaftliches (Übersicht)

Ln : Einordnung in das Periodensystem

I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII														
1	2																	18													
H																	B	C	N	O	F	Ne									
Li	Be																	Al	Si	P	S	Cl	Ar								
Na	Mg	3															4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
K	Ca	Sc	Cerit-Erden (LRE)														Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Rb	Sr	Y	Ytter-Erden (HRE)														Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							

► PSE: Auffüllung der f -Schale

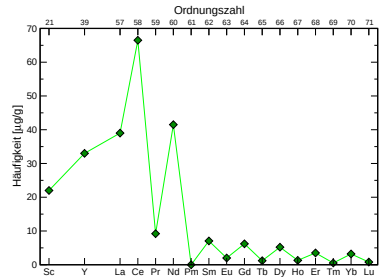
→ $l=3$ → 14 Elemente

► Benennung ?

- Lanthanide: La + Ce–Lu (Ln)
- Lanthanoide: Ce–Lu, Y
- Seltene Erden/Rare Earth (RE),
allerdings → nicht selten

► übliche Gruppierung:

- leichte Ln (Cerit-Erden, LRE):
→ La und Ce–Gd
- schwere Ln (Ytter-Erden, HRE):
→ Tb–Lu und Y
- Sc



≈1800 Aufarbeitung des Minerale

- ▶ Ytterbit $Ln_2FeBe_2Si_2O_{10}$ durch JOHAN GADOLIN
- ▶ Cerit $(Ca,Ce)_{10}Fe^{3+}[SiO_4]_6(OH,F)_5$ durch J. J. BERZELIUS, W. HISINGER (SE) und unabhängig davon M. H. KLAPROTH (DE)

≈1840 weitere Aufarbeitung von Y- und Ce-Erden durch CARL GUSTAF MOSANDER

- ▶ $Ce = La + Ce + 'Di'$
- ▶ $Y = Y + 'Er' + 'Tb'$

≈1880 weitere Zerlegung von 'Di', 'Er' und 'Tb'

- ▶ $'Di' = 'Di' + 'Sm' + 'Gd'$
- ▶ $'Di' = Pr + Nd$
- ▶ $'Sm' = Sm + Eu$
- ▶ $'Gd' = Gd + Tb + Eu$
- ▶ $'Er' = Sc + 'Yb' + 'Er'$
- ▶ $'Er' = 'Ho' + Er + Tm$
- ▶ $'Yb' = Yb + Lu$
- ▶ $'Ho' = Dy + Ho$

1914 Atombau (N. BOHR etc.) $\mapsto$ 7 Elemente !! $\mapsto Z=61$ fehlte

1947 Herstellung von Pm* (Oak-Ridge)

Entdeckung und Benennung der Elemente

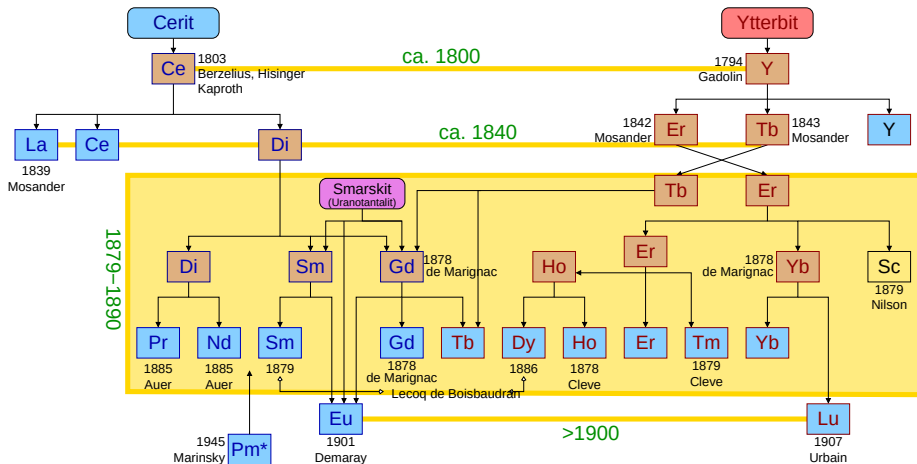


Abb. : Geschichte der Entdeckung und Trennung der 'Seltene Erden'.

Entdeckung und Benennung der Elemente (Forts.)

Z	Name	Jahr	Entdecker	Ursprung Name
Y 39	Yttrium	1794	J. GADOLIN (Åbo, SE; heute Turku, FI)	Ort 'Ytterby'
Ce 58	Cer	1803	J. J. BERZELIUS, W. HISINGER (Västmanland, SE); M. H. KAPROTH (DE)	Asteroid 'Ceres'
La 57	Lanthan	1839	C. G. MOSANDER (Stockholm, SE)	gr. 'lanthano': verborgen
Er 68	Erbium	1842	C. G. MOSANDER (Stockholm, SE)	'Ytterby'
Tb 65	Terbium	1843	C. G. MOSANDER (Stockholm, SE)	'Ytterby'
Ho 67	Holmium	1878	P. T. CLEVE (Uppsala, SE) und J.-L. SORET, M. DELAFONTAINE (Genf, CH)	lat 'Holmia': Stockholm
Yb 70	Ytterbium	1878	J. C. GALISSARD DE MARIGNAC (Genf, CH)	'Ytterby'
Sc 21	Scandium	1879	L. F. NILSON (Uppsala, SE)	lat. 'Scandia': Skandinavien
Tm 69	Thulium	1879	P. T. CLEVE (Uppsala, SE)	'Thule', alter Name für Skandinavien
Sm 62	Samarium	1879	P. E. LECOQ DE BOISBAUDRAN (Paris, FR)	nach Mineral 'Samarskit' (aus Ural)
Gd 64	Gadolinium	1880	J. C. GALISSARD DE MARIGNAC (Genf, CH)	nach 'Johan Gadolin'
Pr 59	Praseodym	1885	C. AUER VON WELSBACH (Wien, AT)	gr. 'prasios': grün + 'didymos': Zwilling
Nd 60	Neodym	1885	C. AUER VON WELSBACH (Wien, AT)	gr. 'neos': neu + 'didymos': Zwilling
Dy 66	Dysprosium	1886	P. E. LECOQ DE BOISBAUDRAN (Paris, FR)	gr. 'dysprositos': schwer zugänglich
Eu 63	Europium	1901	E. A. DEMARCAY (Paris, FR)	'Europa'
Lu 71	Lutetium	1907	G. URBAIN (Paris, FR)	'Lutetia', lat. für Paris
Pm 61	Promethium	1945	J. A. MARINSKY, L. E. GLENDENIN, C. D. CORYELL (Oak Ridge, US)	nach 'Prometheus'

- ① Die Elemente: Einordnung ins PSE, Entdeckung und Benennung
- ② Verwendung und Bedeutung der *Ln*-Elemente (Übersicht)
- ③ Minerale/Vorkommen, Gewinnung, Trennung, Wirtschaftliches (Übersicht)

historische Verwendung von *Ln*-Verbindungen

► bis ca. 1975:

- 'Cer-Mischmetall': billiges Reduktionsmittel
- CeO_2 : HT-Keramik
- Ce: Bestandteil von Zündsteinen (70%Ce+30%Fe)
- CeO_2 : zum Polieren von Glas
- *Ln*/*La*: in niedriglegierten Stählen (Bleche und Rohre) $\rightarrow$ erhöhte Festigkeit
- *Ln*-Mischoxide: als Crack-Katalysatoren in der Petrochemie
- $^{157}\text{Gd}/^{147}\text{Sm}$ -Isotope: in der Kernenergie (hoher *n*-Einfangquerschnitt)



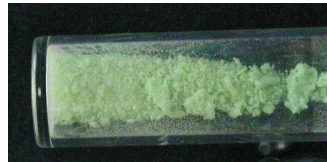
Cer-Mischmetall



Zündsteine

► ab ca. 1975:

- Leuchtstoff in Bildröhren (Y_2O_3 +6 % Eu, rot)
- Festkörperlaser (YAG:Nd)
- Permanentmagnete
(SmCo_5 ab ca. 1975; $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ab 1985)
- NMR-Shift-Reagenzien: Eu^{3+} und Pr^{3+}
- Nd-haltige Gläser für Sonnenbrillen
- $\text{Nd}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ als Farbträger in Kunstgläsern

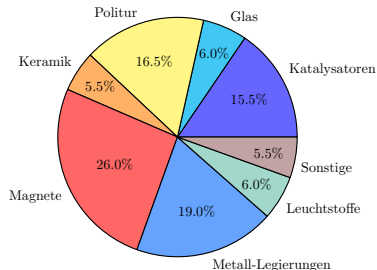


Farbe von Pr_2O_3

► heute viele 'High-Tech'-Anwendungen $\Downarrow$

Verwendung von *Ln*-Verbindungen nach Einsatzbereichen

Bereich	typische Anwendungen
Funktions-keramik	Kondensatoren, Sensoren, Farbmittel, Szintillatoren, Hochtemperaturwerkstoffe
Leuchtstoffe	Displays (CRT, LPD, LCD, PDP), Nachleuchtpigmente, LEDs, Bildgebung (med.), Laser (<u>Y</u> , Eu, Pr, Nd, Er, Yb)
Gläser	Färbung/Entfärbung, hochbrechende und UV-stabile Gläser, Röntgendetektoren, Glasfasern
Politur	f. Gläser, Metalloberflächen etc. (La_2O_3)
Katalysatoren	Erdölverarbeitung (La_2O_3), Auto-Kats (CeO_2), Diesel-Additive, Abgasreinigung
Magnete	Motoren, Generatoren (Festplatten, Mikrofone, Lautsprecher), MRI, Magnetokalorik
Metallurgie	NiMH-Batterien (La-Legierungen), Brennstoffzellen, Stahl, Zündsteine, Super-Legierungen, Al/Mg-Legierungen
Sonstiges	Kernenergie, Wasser/Luftreinigung, Militär, Pigmente, Düngemittel, Supraleiter, ...



Ln-Mengen nach Einsatzbereich (2015)

<i>Ln</i> Hauptmenge	Spezialanwendung	Dotierstoff
Sc Al/Mg-Leichtmetall-Legierungen	Katalysator (ScCl_3) Hg-Dampfampe (ScI_3)	–
Y YAG/YIG-Laser Y_2O_3 :Eu-Leuchtstoffe	Legierungen für Elektroden ZrO_2 :Y in Brennstoffzellen Supraleiter $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Magnete
La LaCo_5 -Magnete hochbrechende Gläser Politur (La_2O_3) Hydrid-Speicher (LaNi_5) LAP-Leuchtstoffe (LaPO_4 : Ce^{3+} , Tb^{3+})	Crack-Katalysatoren (T)EM-Kathode (LaB_6) La-Ti-Legierungen BaTiO_3 :La-Thermistoren	–

Anwendungen der *Ln* II: Ceriterden/*LRE*

<i>Ln</i>	Hauptmenge	Spezialanwendung	Dotierstoff
Ce	Additive für Al- und Fe-Zündsteine (70% Ce, 30% Fe) Legierungen Glaspolitur (CeO_2) Auto-Kats (CeO_2)		Leuchtstoffe (YAG:Ce)
Pr	Magnete ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}^1$)	Magnete (Pr-Fe-Co)	UV-absorbierende Gläser
Nd	Magnete ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}^1$)		farbige Gläser (violett)
Pm	–	^{147}Pm : Permanent-Leuchtstoff ^{147}Pm : Radionuklid-Batterie	
Sm	Magnete ($\text{SmCo}_5/\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$)		IR-absorbierende Gläser Hydrier-Katalysatoren
Eu	–		Leuchtstoffe, rot [$\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}$ (SCAp); $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ (BAM); $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$] Sicherheitspigmente (Banknoten)
Gd	Gd-Fe-Co-Legierungen	MRT-Kontrastmittel CRT-Phosphore	

¹Nd:Pr=3:1

	Massen- Anwendung	Spezialanwendung	Dotierstoff in
Tb	–	Tb-Fe-Co-Legierungen (Tb/Dy)Fe ₂ (Terfenol)	Nd ₂ Fe ₁₄ B-Magnete Leuchtstoffe (grün) Sicherheitsfarben (Banknoten) Laser (CaF ₂ :Tb/SrWO ₄ :Tb)
Dy	–	(Tb/Dy)Fe ₂	Nd ₂ Fe ₁₄ B-Magnete (bis 6% !) Spezialgläser
Ho	–	Ho-Fe-Ni-Co-Legierungen (Magnetblasen-Speicher)	Spezialgläser YAG:Ho-Laser
Er	–	–	IR-absorbierende Gläser YAG:Er-Laser
Tm	–	–	Aktivator in Leuchtstoffen Spezialgläser, Tm ³⁺ (blau)
Yb	–	Yb ₂ Co ₁₃ Fe ₃ Mn-Magnete	Stahl YAG:Yb-Laser
Lu	–	–	Scintillator-Material YAG:Lu für LEDs

? Gliederung der Vorlesung ?

- ▶ nach Elementen ?
- ▶ nach Anwendungsbereichen ?
- ▶ nach Substanzklassen ?
 - ▶ Halogenide (Kap. 4), Oxide (Kap. 5), Salze m. komplexen Anionen, Gläser (Kap. 6)
⇒ Optik, Leuchtstoffe (Kap. 7)
 - ▶ Metalle und Legierungen (Kap. 8)
⇒ Metallurgie (inkl. Elementherstellung), Magnete (inkl. Recycling)
 - ▶ Komplexe (Kap. 9)
⇒ aktuelle Trennverfahren, Imaging-Anwendungen etc.
 - ▶ weitere Verbindungsklassen (B-reiche Boride, Supraleiter etc.)
- ▶ davor:
 - ▶ atomare (magnetische/optische) (Kap. 2) und
 - ▶ allgemeine chemische (Kap. 3) Eigenschaften
- ▶ noch davor (Kap. 1.3.) ↓ Kurzübersicht zu ...
 - ▶ ... Vorkommen/Mineralen (Geochemie)
 - ▶ ... Gewinnung (techn. Chemie)
 - ▶ ... Trennung
 - ▶ ... wirtschaftliche Bedeutung

1. Einleitung

- 1.1. Die Elemente: Einordnung ins PSE, Entdeckung und Benennung ✓
- 1.2. Verwendung und Bedeutung der *Ln*-Elemente (Übersicht) ✓
- 1.3. Vorkommen/Minerale, Gewinnung, Trennung, Wirtschaftliches (Übersicht)

2. Atomare physikalische Eigenschaften

- 2.1. Elektronenkonfiguration und magnetische Eigenschaften
- 2.2. Optische Eigenschaften wichtiger *Ln*-Ionen

3. Chemische Eigenschaften

- 3.1. Oxidationsstufen und Redoxpotentiale
- 3.2. *Ln*-Ionen in wässriger Lösung

4. Halogenide

5. Oxide, Oxidhalogenide und Sulfide

- 5.1. Binärer Chalkogenide: Strukturen und Eigenschaften
- 5.2. Eigenschaften und Verwendung von CeO_2 und La_2O_3

6. Salze mit Oxido-Anionen

- 6.1. Silicate, Carbonate, Phosphate: Minerale und Wirtsstrukturen
- 6.2. Granate
- 6.3. Gläser

Forts.

7. Lumineszenz-Materialien

- 7.1. Emitter mit schwacher Liganden-Wechselwirkung
- 7.2. Emitter mit starker Liganden-Wechselwirkung
- 7.3. Weitere Anwendungen von Lumineszenz-Materialien

8. Metalle und Legierungen

- 8.1. Die elementaren Lanthanoide
- 8.2. *Ln*-haltige Legierungen: Übersicht
- 8.3. *Ln*-Zusätze in Stählen und Leichtmetall-Legierungen
- 8.4. Laves-Phasen und die Magnetmaterialien SmCo_5 und $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
- 8.5. Interstitielles I: Boride, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Magnete
- 8.6. Interstitielles II: Hydride, LaNi_5 etc.
- 8.7. *Ln*-Materialien für die Magnetokalorik, Thermoelektrika, Supraleiter

9. Komplexe

- 9.1. Klassische Komplexverbindungen
- 9.2. *Ln*-Trennung mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion
- 9.3. MRT-Imaging und NMR-Shift-Reagenzien
- 9.4. Metallorganische Verbindungen

10. ... Analytische Chemie, Bioanorganische Chemie, ...

- ① Die Elemente: Einordnung ins PSE, Entdeckung und Benennung
- ② Verwendung und Bedeutung der *Ln*-Elemente (Übersicht)
- ③ Minerale/Vorkommen, Gewinnung, Trennung, Wirtschaftliches (Übersicht)

- ▶ **Carbonat/Fluoride:** Bastnäsit ($(Ln,Y)[CO_3](F)$)
 - ▶ enthält vor allem **Cerit-Erden/LRE**
 - ▶ Mineral für 94% aller *Ln*
 - ▶ Abbau Übertage, vor allem in China
- ▶ **Ortho-Phosphate:** Monazit/Xenotim ($Ln[PO_4]$)
 - ▶ Monazit (*mP24*, eigener Typ, $CN(Ln=9) \mapsto$ **Cerit-Erden/LRE**)
 - ▶ Xenotim $Y[PO_4]$ (*tI24*, ZrO_2 /Zirkon-Typ, $CN(Ln=8) \mapsto$ **Ytter-Erden/HRE**)
 - ▶ Monazit-Abbau Übertage, z.B. in Australien
 - ▶ Verwendung der 'Sande' (verwittertes Mineral)
 - ▶ Problem: Th-Gehalte
- ▶ **Tonminerale:** sog. 'Laterit'-Tone
 - ▶ Al-reiche Schichtverbindungen
 - ▶ gute Quelle für **Ytter-Erden/HRE**
- ▶ viele weitere Minerale $\Downarrow$, auch mit wechselnder Zusammensetzung, durch 'diadochen' Ersatz
 - ▶ $Ln \longleftrightarrow Ca^{2+} \longleftrightarrow Na^+$
 - ▶ $[PO_4]^{3-} \longleftrightarrow [SiO_4]^{4-}$



Bastnäsit-Erz



Kristall von Bastnäsit ($\varnothing$ ca. 1 cm)

Einige *Ln*-haltige Minerale

Mineralname	Formel	<i>Ln</i>	Bemerkung
Bastnäsit	$(Ln, Y)[CO_3](F)$	<i>LRE</i>	für 94% aller <i>Ln</i> ¹
Parisit	$CaLn_2[CO_3]_3(F)_2$		
Synchysit	$CaLn[CO_3]_2(F)$		
Monazit	$(Ln, Th)[PO_4]$	<i>LRE</i>	als 'Sande', AUS
Xenotim	$Y[PO_4]$	<i>HRE</i>	63% Y, Th-haltig
Apatit	$(Ca, Ln)_5[PO_4]_3(F, Cl, OH)$		+ <i>Ln</i> → Fluoreszenz
Churcit/Kolbeckit	$Y[PO_4] \cdot 2H_2O / Sc[PO_4] \cdot 2H_2O$		
Loparit	$(Ln, Na, Ca)(Ti, Nb)O_3$		bis 34% <i>Ln</i> , RU
Fergusonit	$(Ln, Y)NbO_4$		SE, NO, Grönland
Pyrochlor	$(Ca, Na, Ln)_2Nb_2O_6(OH, F)$		bis 12% <i>Ln</i>
Zirkon	$(Zr, Ln)[SiO_4]$	<i>LRE</i> , Th	
Gadolinit	$Y_2Fe^{2+}Be_2[SiO_4]_2(O)_2$	Sc, <i>HRE</i>	s. Historisches
Allanit (Orthit)	$(Y, Ln, Ca)_2(Al, Fe^{3+})_3[SiO_4]_3(OH)$		bis 28% <i>Ln</i>
Thortveitit	$(Sc, Y)[Si_2O_7]$	Sc	NO, Madagaskar
Mosandrit	$(Na, Ca)_3Ca_3Ln(Ti, Nb, Zr)[Si_2O_7]_2(O, OH, F)_4$		s. Historisches
Rinkit (Rinkolit)	$(Ca, Ln)_4Na(Na, Ca)_2Ti[Si_2O_7]_2(O, F)_2$		
Eudialyt	$Na_4(Ca, Ln)_2(Fe^{2+}, Mn^{2+}, Y)ZrSi_8O_{22}(OH, Cl)_2$		Dreiring-Silicat
Imoriit	$Y_2[SiO_4][CO_3]$		Japan
Kainosit	$Ca_2(Y, Ln)_2[Si_4O_{12}][CO_3] \cdot H_2O$		
Steenstrupin	$Na_{14}Ln_6Mn_2Fe_2(Zr, Th)[Si_6O_{18}]_2[PO_4] \cdot 7.3H_2O$	Ce, Th	Grönland

¹Sichuan, Shandong, Innere Mongolei (China, 'Big Six'); Mountain Pass (Kalifornien, USA, Molycorp (bis 2015), ab 2017 MP Materials)

Aufarbeitung der Minerale

• Cerit-Erden; leichte *Ln* (*LRE*), inkl. Ce

- ▶ Brechen und Mahlen der Erze Bastnäsit oder Monazit
- ▶ Dichte und Magnettrennungen, Flotation
- ▶ chemische Weiteraufarbeitung:

1 saurer Aufschluss (beide Erze)

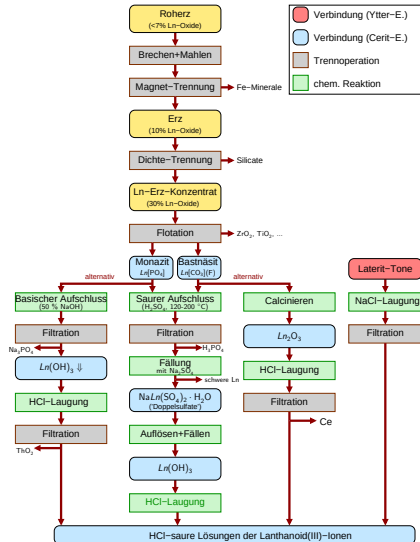
- mit konz. H_2SO_4 , 120-200 °C
- $\mapsto$ unlöslich: SiO_2 , TiO_2 , ZrSiO_4 , FeTiO_3 ; $\mapsto$ löslich: Ln^{3+} , Th
- + $\text{Na}_2\text{SO}_4 \mapsto$ Fällung der Cerit-Erden als 'Doppelsulfate' $\text{NaLn}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

2 basischer Aufschluss des Phosphats Monazit, $(\text{Ln}, \text{Th})[\text{PO}_4]$

- + 50 % $\text{NaOH} \mapsto \text{Na}_3\text{PO}_4$ -Lösung + $\text{Ln}(\text{OH})_3 \downarrow$
- HCl -Laugung $\mapsto \text{ThO}_2 \downarrow$ (!!)

3 Kalzinieren des Carbonats Bastnäsit, $(\text{Ln}, \text{Y})[\text{CO}_3](\text{F})$

- $\mapsto \text{Ln}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$,
- anschliessend HCl -Laugung, CeO_2 bleibt unlöslich, alle anderen Oxide säure-löslich



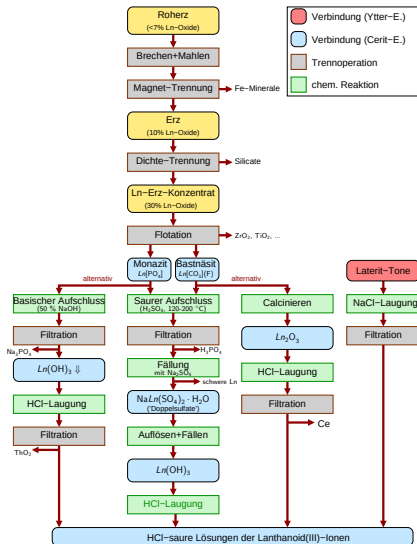
• Cerit-Erden; leichte Ln (LRE), inkl. Ce

- Brechen und Mahlen der Erze Bastnäsit oder Monazit
- Dichte und Magnettrennungen
- Anreicherung mittels Flotation
- chemische Weiteraufarbeitung:

- 1 saurer Aufschluss (beide Erze)
- 2 basischer Aufschluss des Phosphats Monazit, $(Ln,Th)[PO_4]$
- 3 Kalzinieren des Carbonats Bastnäsit, $(Ln,Y)[CO_3](F)$

• Yttererden; schwere Ln (HRE) und Y

- NaCl- oder NH_4Cl -Laugung von 'Laterit'-Tonen



- **Trennung** durch Ausnutzen von Unterschieden in ...
 - ▶ **Redoxpotentiale** (Kap. 2: chemische Eigenschaften)
 - ▶ Eu und Yb: Reduktion mit Zn-Staub zu $\text{Ln}^{2+} \mapsto \text{LnSO}_4 \downarrow$
 - ▶ Ce und Tb: Oxidation mit Peroxidodisulfat ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) zu $\text{Ln}^{4+} \mapsto \text{LnO}_2 \downarrow$
 - ▶ Ln^{3+} : Amalgam-Methode (historisch)
 - ▶ **Löslichkeit** von Salzen (historisch, Kap. 2)
 - ▶ fraktionierte Kristallisation von $\text{Ln}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ (Abnahme der Löslichkeit $\text{Lu} \rightarrow \text{La}$)
 - ▶ **Basizität** (historisch)
 - ▶ fraktionierte Fällung von $\text{Ln}(\text{OH})_3$
 - ▶ fraktionierte Zersetzung der Nitratre
 - ▶ **Komplex-Bildung** (Solventextraktion) $\mapsto$ Kap. 9: Komplexe
 - ▶ **Ionenaustausch** (gekoppelt mit Komplexbildung) $\mapsto$ Kap. 9: Komplexe
- **Recycling**
 - ▶ ökonomisch interessant nur für grosse Magnete (Nd, Pr, Dy, Tb)

Produktion und Reserven nach Ländern

Land	Fördermenge (in t)			Reserven
	2019	2020	2021	
USA	28.000	38.000		1.500.000
Australien	20.000	17.000 ³		4.100.000
Brasilien	710	1.000		21.000.000
Burundi	200	500		NA
China	132.000	140.000	162.000 ¹	44.000.000
Grönland	–	–		1.500.000
Indien	2.900	3.000		6.900.000
Japan	–	–		16.000.000 ²
Kanada	–	–		830.000
Madagaskar	4.000	8.000		NA
Myanmar	25.000	30.000		NA
Russland	2.700	2.700		12.000.000
Südafrika	–	–		790.000
Tansania	–	–		890.000
Thailand	1.900	2.000		NA
Vietnam	1.300	1.000		22.000.000
Sonstige	66	100		310.000
Welt gesamt	220.000	240.000		136.000.000

- [geology.com](https://www.geology.com) zu Produktionszahlen 1994-2020

Daten: USGS; ¹: davon 148.850 *LRE* und 19.150 *HRE*; ²: 2018 entdeckt; Fa. Lynas: Aufarbeitung in Malaysia

Oxid	Preis Dollar/kg				
	2009	2011	2016	2020	10.2021
Tb ₂ O ₃ , 99.99 %	360		415	671	878–1410*
Dy ₂ O ₃ , 99.5 %	109	2400	198	258	424.6
Ho ₂ O ₃					160.9
Pr ₂ O ₃					103
Nd ₂ O ₃ , 99.5 %	15.4	252	40	47	96.7
Er ₂ O ₃					32
Eu ₂ O ₃ , 99.99 %	493	5400	74	31	30.3
Y ₂ O ₃					6.1
Mischmetall, 65 % Ce, 35 % La			5	5	–
CeO ₂ , 99.5 %			2	2	1.43
La ₂ O ₃ , 99.5 %			2	2	1.37

- tradingeconomics.com: Preisentwicklung Nd

* Schwankungen innerhalb von 20 Tagen

- ▶ Allgemeine Literatur
 - ▶ R. Pöttgen, Th. Jüstel, C. A. Strassert (Eds.):
Rare Earth Chemistry, DeGruyter, (2020).
 - ▶ J.-C. G. Bünzli, V. K. Pecharsky (Eds.):
Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Volumes 1-54,
North-Holland, Elsevier, Amsterdam (1978–2020).
- ▶ spezielle Literatur und Links zum Kapitel 1
 - ▶ [Worldview Stratfor](#) (allgemeine Übersicht)
 - ▶ [USGS SE-Infoseite](#)
 - ▶ ['Institut' Seltene Erden](#) (gute Info-Seite, Ln-Elemente einzeln anwählbar, in Deutsch)
 - ▶ [MP Materials](#) (mit US-Reklamefilm)
 - ▶ [Film der Fa. Lynas](#) (Australien/Malaysia)
 - ▶ H. J. Rösler: Lehrbuch der Mineralogie

1. **Einleitung**
 - 1.1. Die Elemente: Einordnung ins PSE, Entdeckung und Benennung ✓
 - 1.2. Verwendung und Bedeutung der *Ln*-Elemente (Übersicht) ✓
 - 1.3. Vorkommen/Minerale, Gewinnung, Trennung, Wirtschaftliches ✓
2. **Atomare physikalische Eigenschaften**
 - 2.1. Elektronenkonfiguration und magnetische Eigenschaften
 - 2.2. Optische Eigenschaften wichtiger *Ln*-Ionen
3. **Chemische Eigenschaften**
4. **Halogenide**
5. **Oxide, Oxidhalogenide und Sulfide**
6. **Salze mit Oxido-Anionen**
7. **Lumineszenz-Materialien**
8. **Metalle und Legierungen**
9. **Komplexe**
10. **Weitere anwendungsrelevante Verbindungen**