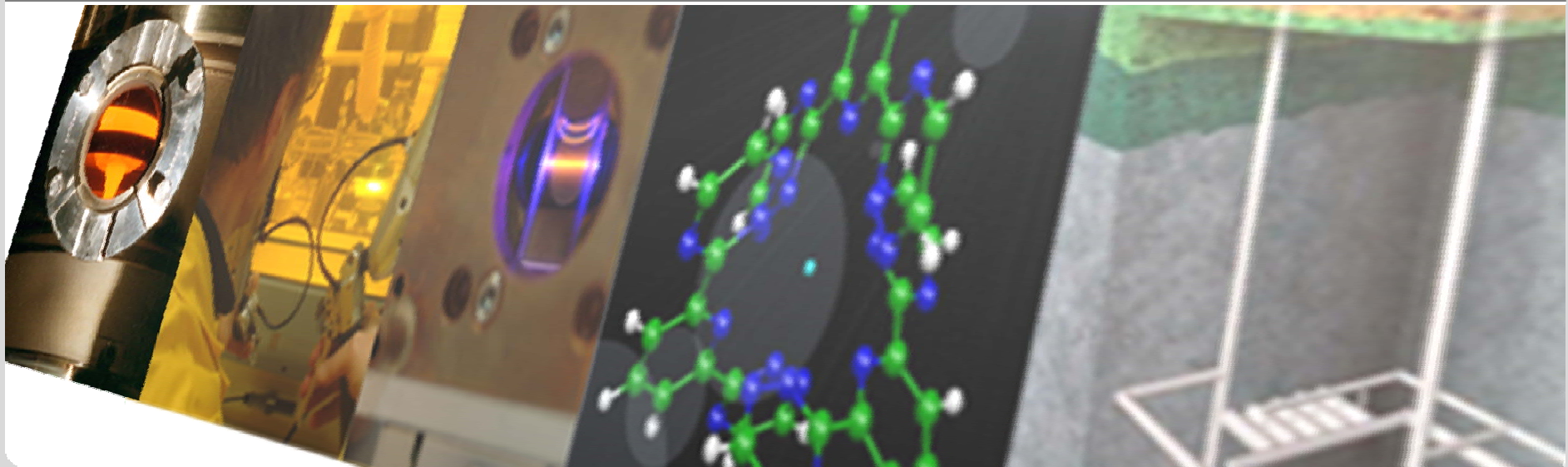


## Streitpunkt Kernenergie:

# Das Problem der Nuklearen Entsorgung und Lösungsvorschläge aus der Chemie

INSTITUT FÜR NUKLEARE ENTSORGUNG (INE)



# Radioaktiver Abfall

## Abgebrannter Kernbrennstoff / HAW-Glas

Bis ca. 2020 (Ausstiegsbeschluss) + ca. 12 Jahre Laufzeitverlängerung:

Abfälle mit vernachlässigbarer  
Wärmeentwicklung:  
(Schwach-, mittelradioaktiv)



277.000 m<sup>3</sup>  
+ 9.180 m<sup>3</sup>

Wärmeentwickelnde Abfälle:  
(Hochradioaktiv)

29.000 m<sup>3</sup>

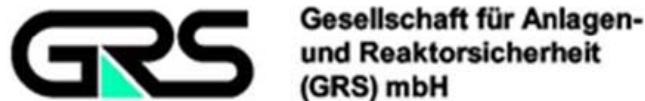
abgebrannter Kernbrennstoff  
wiederaufgearbeitet →  
HAW-Glas



17.400 t + 4.440 t  
6.900 t  
ca. 2.750 t

(BfS, 2010)

# Streitpunkt Kernenergie:

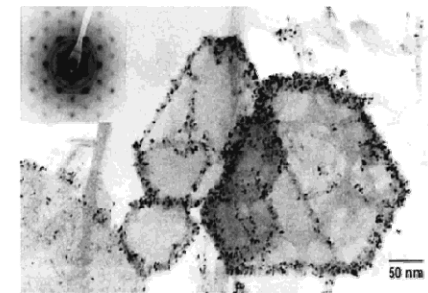
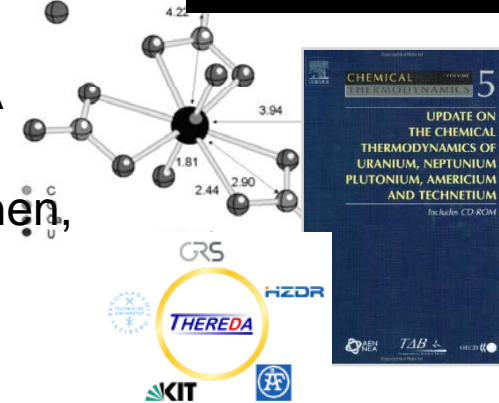
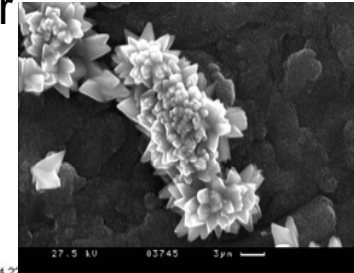


... **ausschließlich** die Isolation dieser Abfälle durch den sicheren **Einschluss in einer tiefen geologischen Formation** eine sichere Lösung darstellt und als **einzig** realisierbarer **Entsorgungsweg** in Frage kommt.

GRS, 247, 30.09.2008

# 40 Jahre chemische/geochemische Endlagerforschung

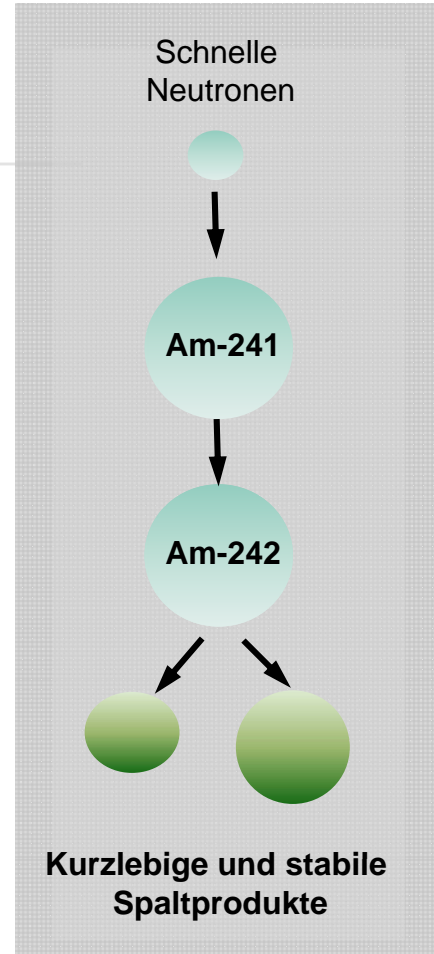
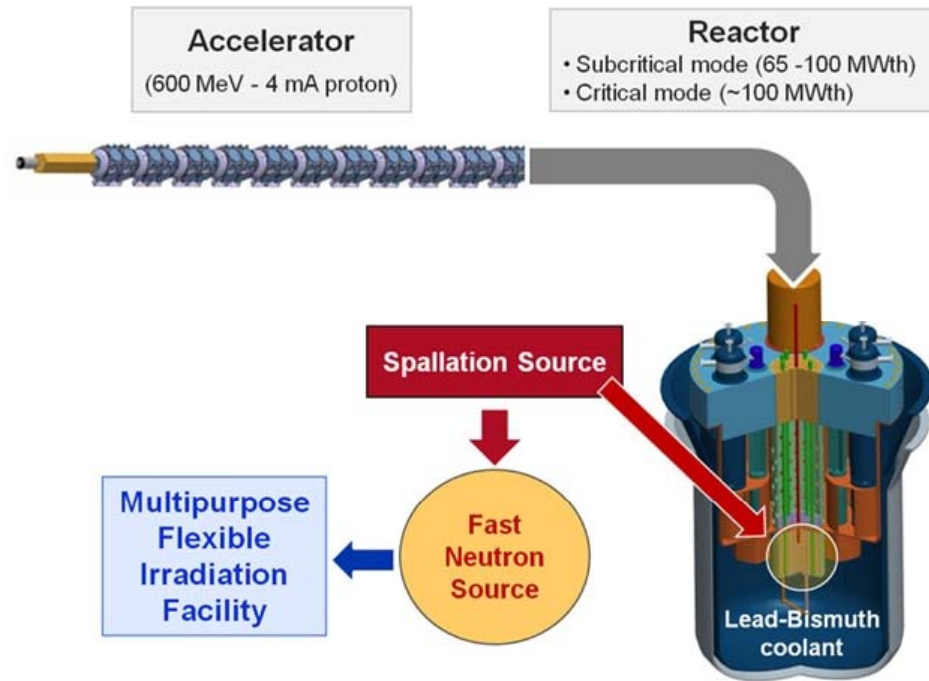
- Deutlich verbessertes Verständnis des Verhaltens hochradioaktiver Abfälle beim Kontakt mit Wasser (Löslichkeitslimitierung, Radionuklidrückhaltung in 'Sekundärphasen')
- Konsistente Sammlungen abgesicherter Daten zur Geochemie von Radionukliden insbesondere der Actiniden (Uran, Neptunium, Plutonium, Americium) - NEA-TDB, THEREDA
- Aufklärung einer Vielzahl von Radionuklidrückhalterreaktionen, die bislang nicht in konservativen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden
  - Reduktion und signifikante Verringerung der Löslichkeit
  - Mineralisierungsreaktionen (Radionuklideinbau in Mineralphasen)



... Es bleibt das Problem des Sicherheitsnachweises über eine Zeitraum von 1 Mio Jahre!

# Das Partitioning & Transmutation (P&T) Konzept

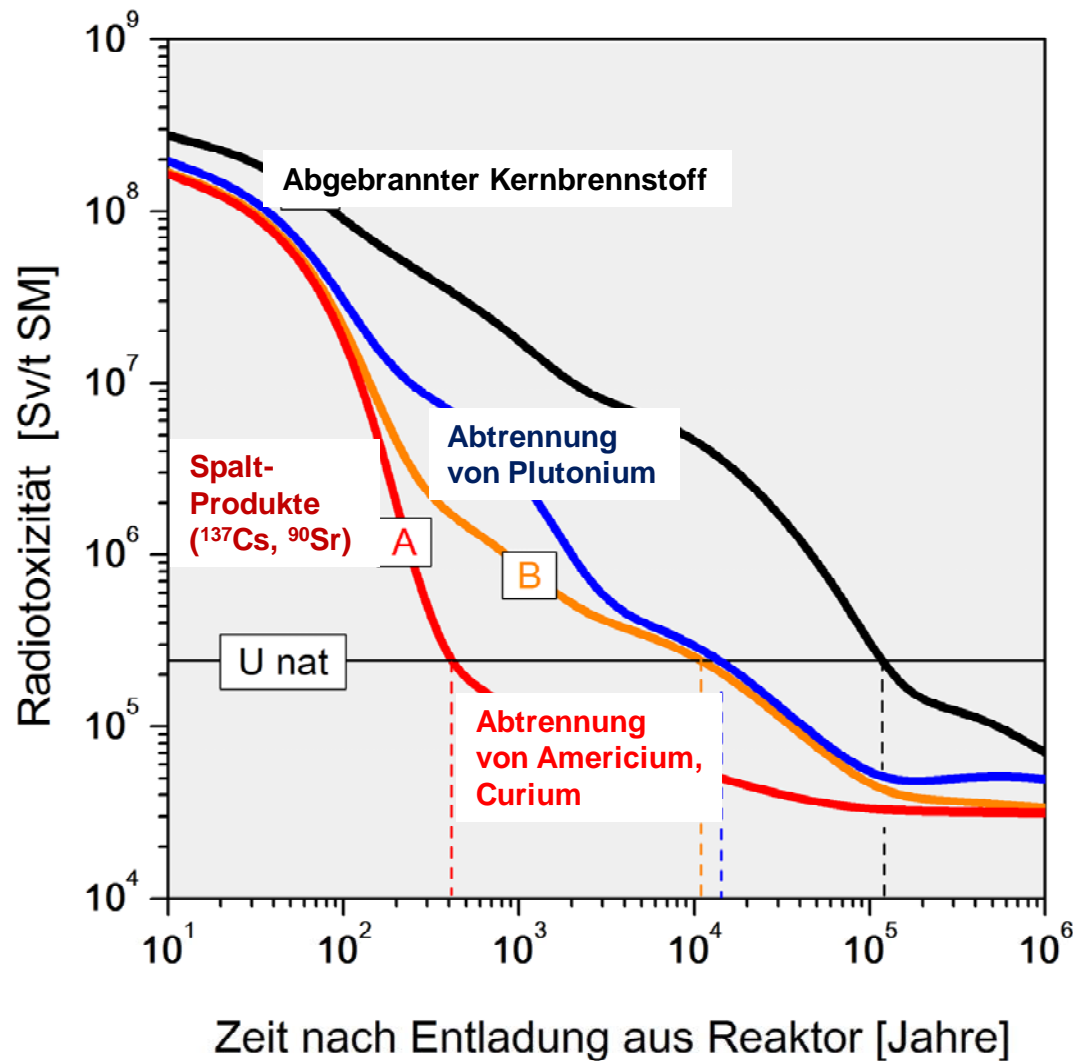
### Atommüll wird in 20 Jahren nicht mehr strahlen



Transmutation langlebiger Abfallradionuklide in einem beschleunigergetriebenen Reaktor (ADS)

<http://myrrha.sckcen.be/en/MYRRHA/ADS>

# Einfluss von P&T auf die Langzeitradiotoxizität des Abfalls

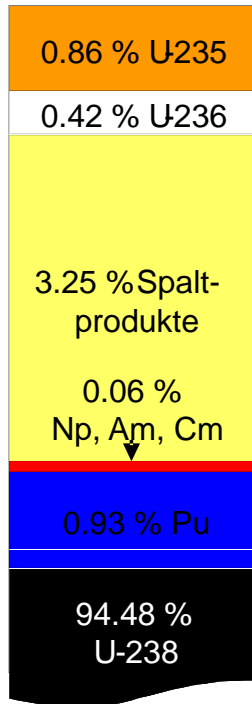


A = 99,5 % P&T Effizienz

B = 95 % P&T Effizienz

Gompper, Geist, Geckeis, GDCH Nachrichten, 58, 1015

# Inhalt des hochradioaktiven Abfalls Abgebrannter Kernbrennstoff



PWR; Abbrand 33GWd/tU

### Periodensystem der Elemente

Protonenzahl (Ordnungszahl) **12** 23.31

Elementsymbol **Mg**

Atommasse in u (gerundeter Wert)

Elementname **Magnesium**

Dichte in g/cm<sup>3</sup>, bei Gasen in g/l (0 °C, 1013 mbar)

Schmelztemperatur (gerundet) in °C **650** 1.74

Siedetemperatur (gerundet) in °C **1107** 1.2

Elektronen negativität nach L. Pauling, Grundlagen der Chemie, Weinheim 1973.

*Alle anderen Werte nach Pillingmeier, Chemie-Lexikon, Stuttgart 1972.*

Metalle

Halbmetalle

Nichtmetalle

\* radioaktive Elemente

Li = Feststoff

Br = Flüssigkeit

H = Gas

PERIODE	Hauptgruppen																
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII									
1.	<b>H</b> Wasserstoff 1 1.01 -259 0.09 -253 2.1																<b>He</b> Helium 2 4.00 -269 0.18
2.	<b>Li</b> Lithium 3 6.94 181 0.53 1330 1.0	<b>Be</b> Beryllium 4 9.01 197 1.85															<b>Ne</b> Neon 10 20.18 -249 0.9 -246 -
3.	<b>Na</b> Natrium 11 22.99 98 0.97 892 0.9																<b>Ar</b> Argon 18 39.95 -186 -
4.	<b>K</b> Kalium 19 39.10 64 0.86 760 0.8																<b>Kr</b> Krypton 36 83.80 -157 3.7 -152 -
5.	<b>Rb</b> Rubidium 37 85.47 39 1.53 688 0.8																<b>Xe</b> Xenon 54 131.29 -112 5.89 -108 -
6.	<b>Cs</b> Cäsium 55 132.91 29 1.90 660 0.7																<b>Rn</b> Radon 86 222 -62 -
7.	<b>Fr*</b> Francium (27) 677 0.7																

### Wichtige Transuranelemente:

Pu-238 (t<sub>1/2</sub> ~ 88 a)

Pu-239 (t<sub>1/2</sub> ~ 24.110 a)

Am-241 (t<sub>1/2</sub> ~ 432 a)

Cm-243 (t<sub>1/2</sub> ~ 29 a)

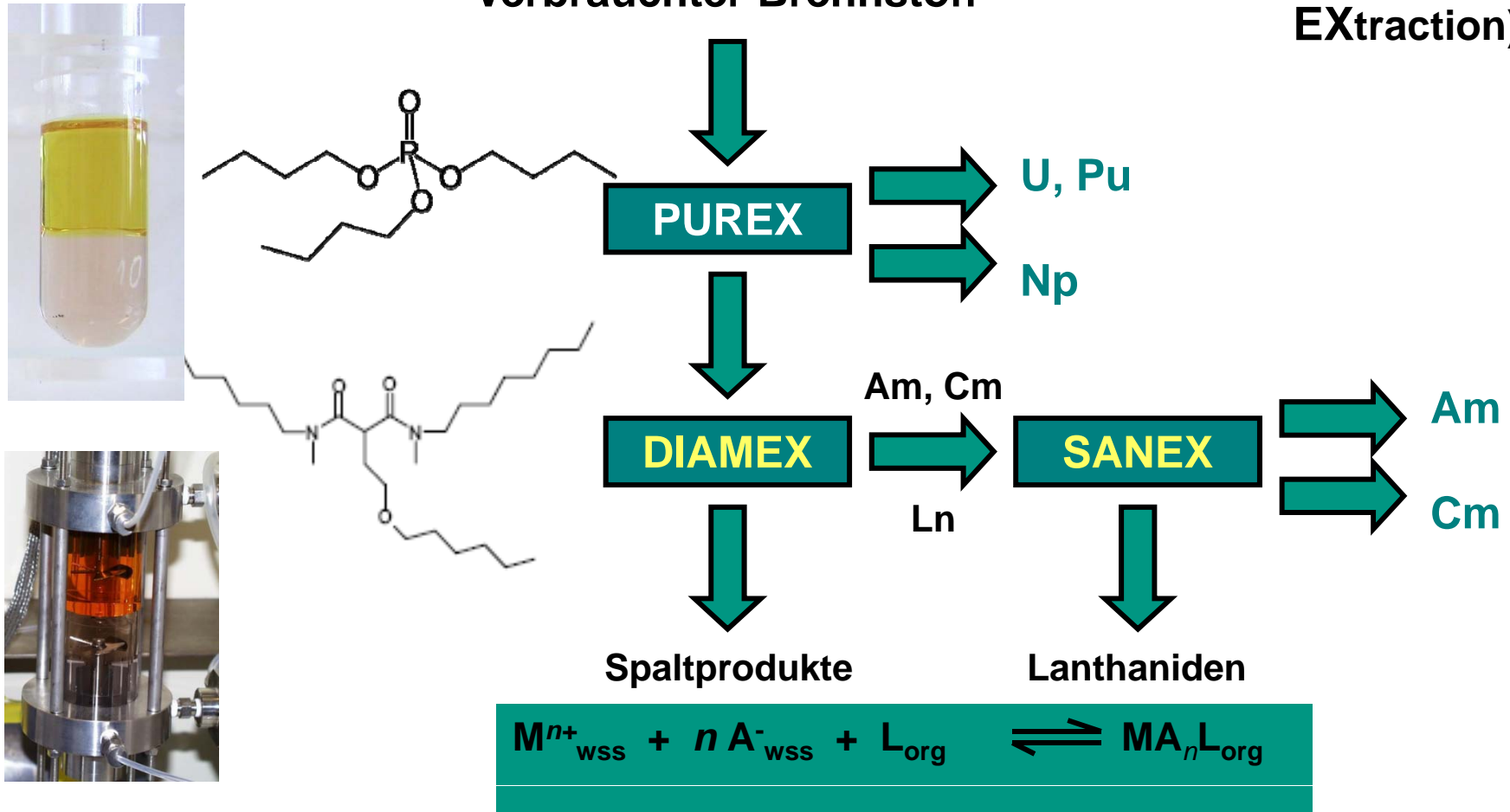
Np-237 (t<sub>1/2</sub> ~ 2.1 Ma)

Lanthanoide														
La	Ce	Pr	Nd	Pm*	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
57 138.91	58 140.12	59 140.91	60 144.24	61 (145)	62 150.36	63 151.96	64 157.25	65 158.93	66 162.50	67 164.93	68 167.26	69 168.93	70 173.04	71 174.97
Lanthan	Cer	Praseodym	Neodym		Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
920 6.17	795 6.67	935 6.77	1024 7.00	1827 7.27	1022 7.54	826 5.26	1312 7.89	1356 8.27	1407 8.54	1461 8.80	1497 9.05	1545 9.33	824 6.98	1652 9.84
3470 1.1	3468 1.1	3127 1.1	3027 1.2	2460 -	1795 1.2	1438 -	3000 1.1	2800 1.2	2600 -	2600 1.2	2900 1.2	1727 1.2	1196 1.1	3327 1.2

Actinoide														
Ac*	Th*	Pa*	U*	Np*	Pu*	Am*	Cm*	Bk*	Cf*	Es*	Fm*	Md*	No*	Lr*
89 (227)	90 232.04	91 231.04	92 238.03	93 237.05	94 (244)	95 (243)	96 (247)	97 (247)	98 (251)	99 (254)	100 (257)	101 (258)	102 (258)	103 (260)
Actinium	Thorium	Protactinium	Uran	Neptunium	Plutonium	Ameicium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium
1050 10.1	1750 11.7	(1230) 15.4	1132-18.07	637-18.5	640-19.81	964-13.7	11340-13.51	-	-	-	-	-	-	-
-	1.1	3850 1.3	1818-1.4	2009-1.3	2425-1.3	9100-1.3	-	-	-	-	-	-	-	-

## Das Europäische SANEX Konzept Verbraucher Brennstoff

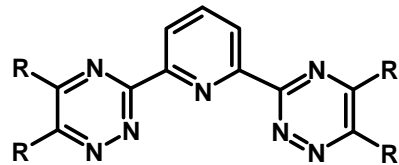
(Selective  
ActiNide  
EXtraction)



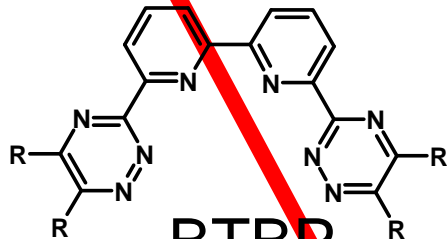


# Selektive Abtrennung von Americium/Curium von Spaltlanthaniden

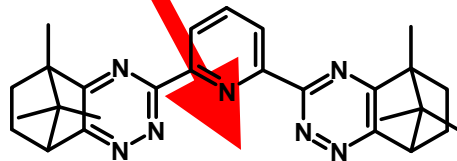
**SANEX**



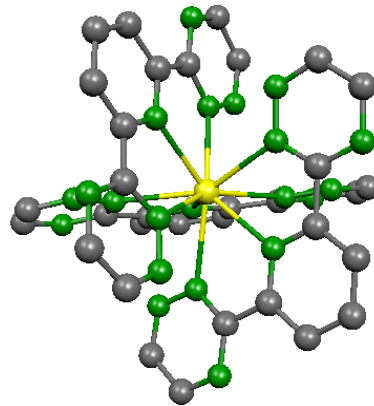
**BTP**



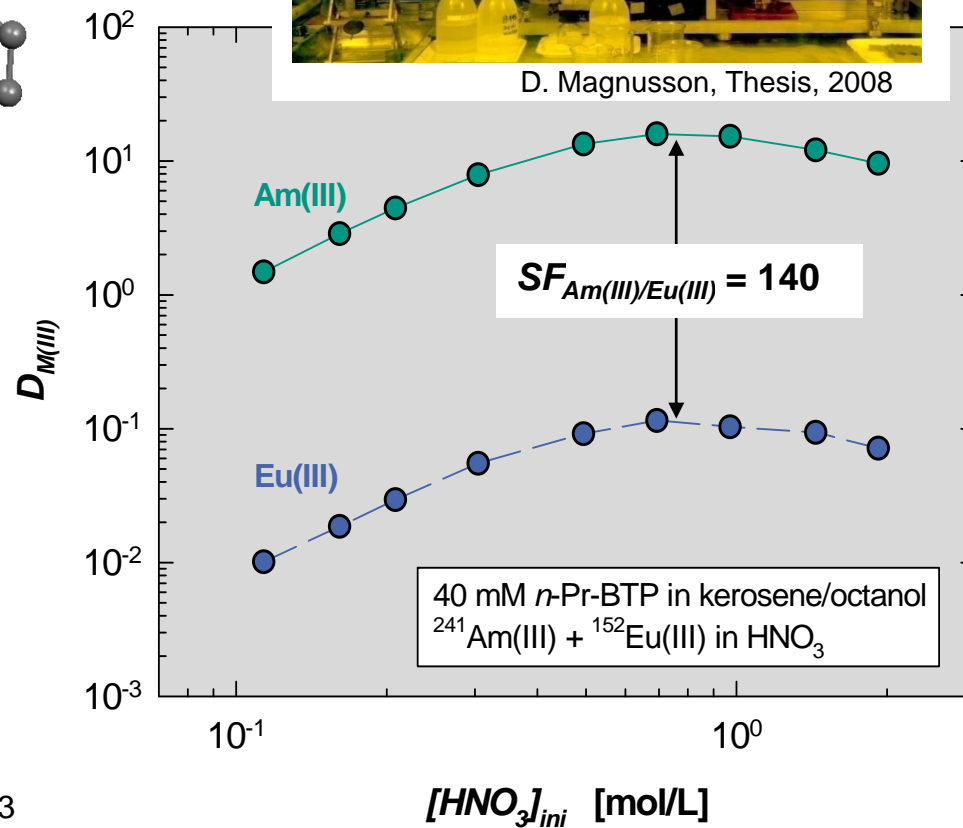
**BTBP**



**CA-BTP**

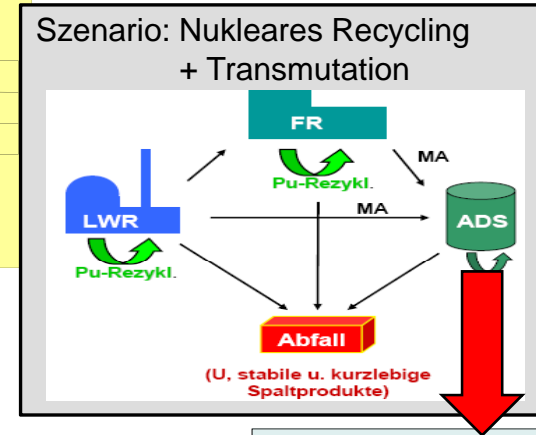
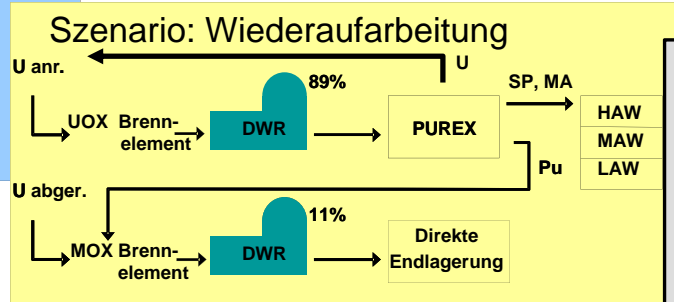
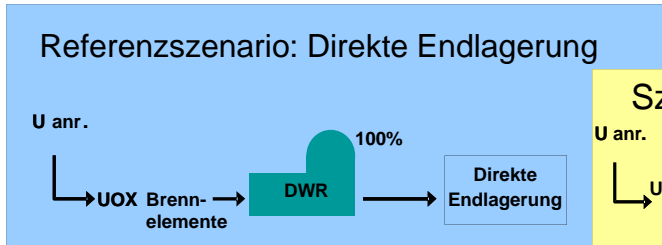


D. Magnusson, Thesis, 2008

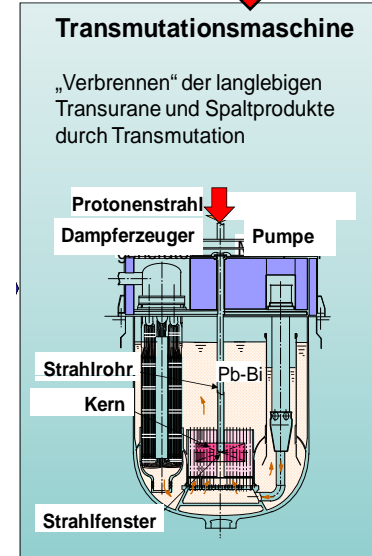


Z. Kolarik et al., Solvent Extr. Ion Exch. 1999, 17, 23  
 M.R.S. Foreman et al., Solvent Extr. Ion Exch. 2005, 23, 645  
 S. Trumm et al., EP 10157567.8 (24.3.2010)

# „Nuclear Recycling“ + Partitioning & Transmutation



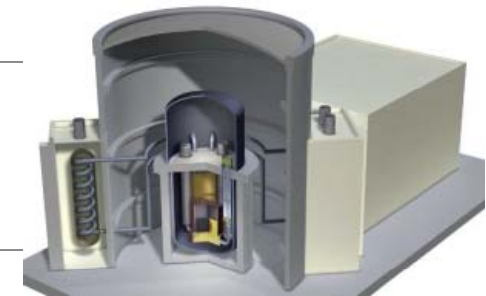
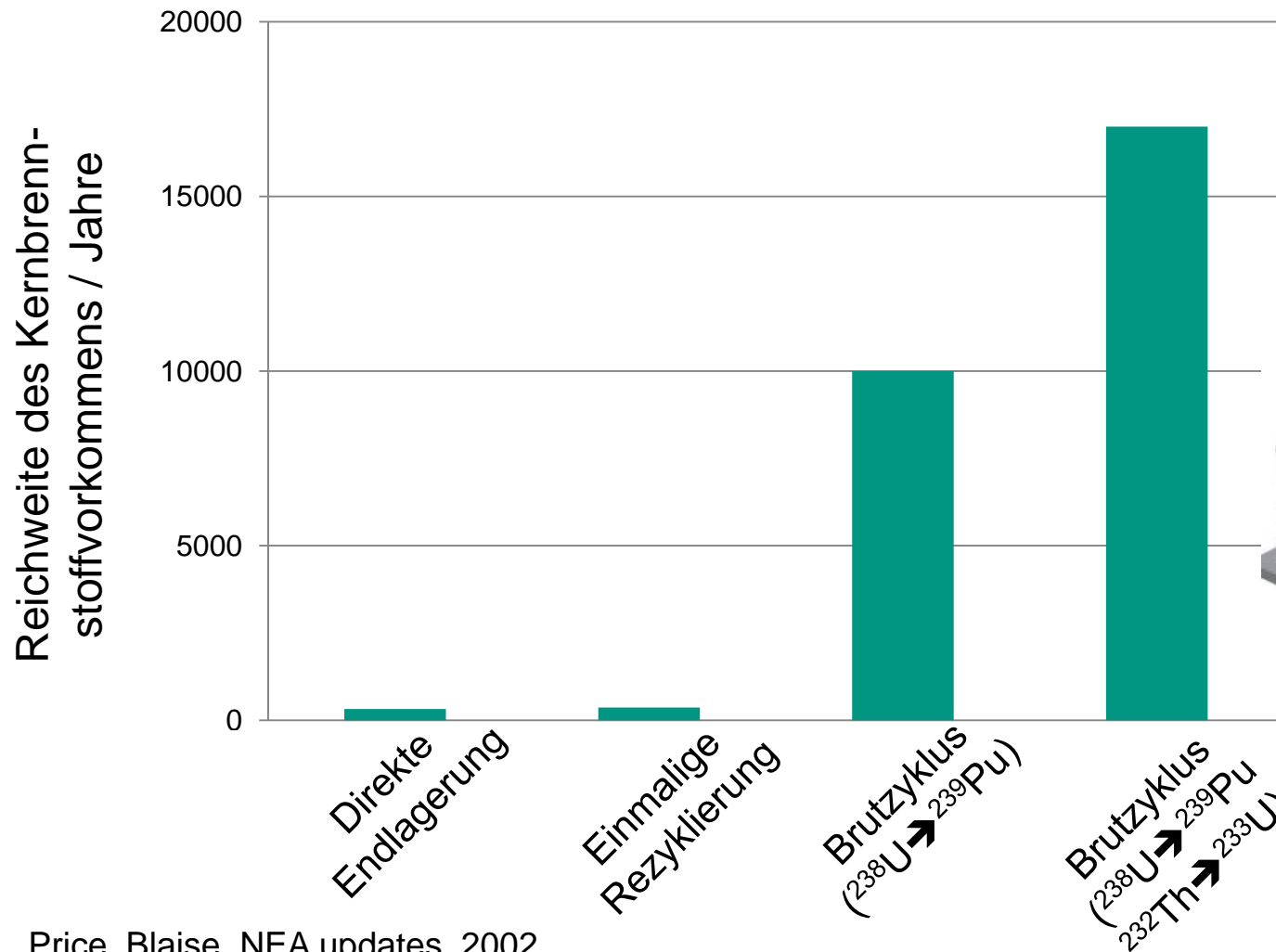
	<b>Schwermetall- verluste → Abfall</b>	<b>Spalt- produkte</b>	<b>Hochaktiver Abfall</b>
	kg/TWh <sub>e</sub>	kg/TWh <sub>e</sub>	m <sup>3</sup> /TWh <sub>e</sub>
Direkte Endlagerung (DWR)	1920.0	130	4.1
Pu Recycling (1x) (DWR)	215	131	0.23
„Double strata“ (DWR - ADS)	2.0	122	0.28



NEA 2006, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management

# Reichweite der Kernbrennstoffvorkommen

auf der Basis des Energieverbrauchs von 1999



[http://www.ted.com/talks/bill\\_gates.html](http://www.ted.com/talks/bill_gates.html)

Price, Blaise, NEA updates, 2002

## Schlußfolgerung:

- Unabhängig davon, ob wir Kernenergie weiter nutzen wollen oder nicht: Sichere Entsorgungswege für Abfälle **müssen** geschaffen werden.
- Nuklearchemische Grundlagenforschung macht Prognosen zur Entwicklung eines Endlagersystems zuverlässiger.
- „Nukleares Recycling“ (Partitioning & Transmutation) reduziert die Menge und die Wärmeproduktion des hochradioaktiven Abfalls  
... **wichtiger**: das Inventar an langzeitradiotoxischen Elementen
  - - erleichtert den Sicherheitsnachweis für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle
- Endlagerkapazitäten können evtl. besser genutzt werden (Um Faktor ~ 3 kleineres Endlager wird benötigt, NEA 2006)
- Entwicklung neuer chemischer Ligandensysteme zur hochselektiven Actiniden/Lanthaniden Trennung ist **unabdingbare Voraussetzung** zur Realisierung von P&T.
- **Endlagerung** in tiefen geologischen Formationen wird durch P&T **nicht** überflüssig
  - Spaltprodukte (Zerfall über einige hundert Jahre)
  - Verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bereits vorhanden
  - Geringe Mengen an Actiniden gelangen als Verluste bei P&T Zyklen in den Abfall