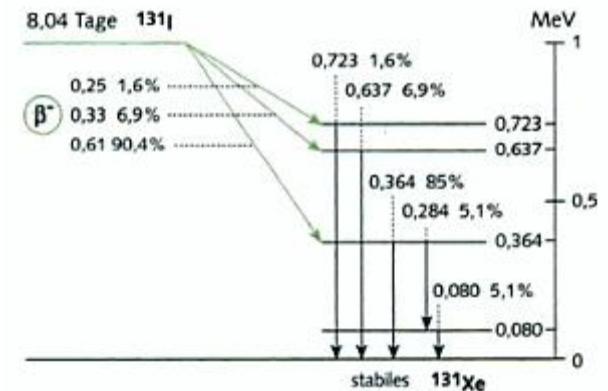


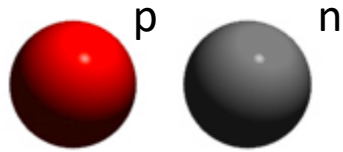
# Kernenergie: Strahlung für heute, morgen und in alle Ewigkeit!

- Atome, Moleküle
- Isotope
- Periodensystem
- Radioaktiver Zerfall
- Kernspaltung
- Spaltprodukte
- Halbwertszeit und Aktivität
- elektromagnetisches Spektrum
- Aktivität und Dosis
- Grenzwerte
- Strahlenkrankheit
- **Into Eternity (Endlager Onkalo)**



# Atome, Moleküle

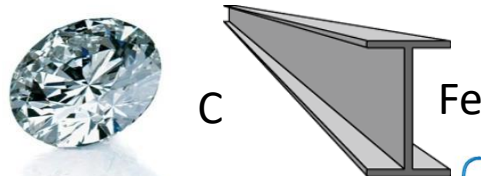
Atomkern



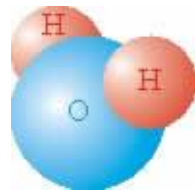
Elektronen



Atome

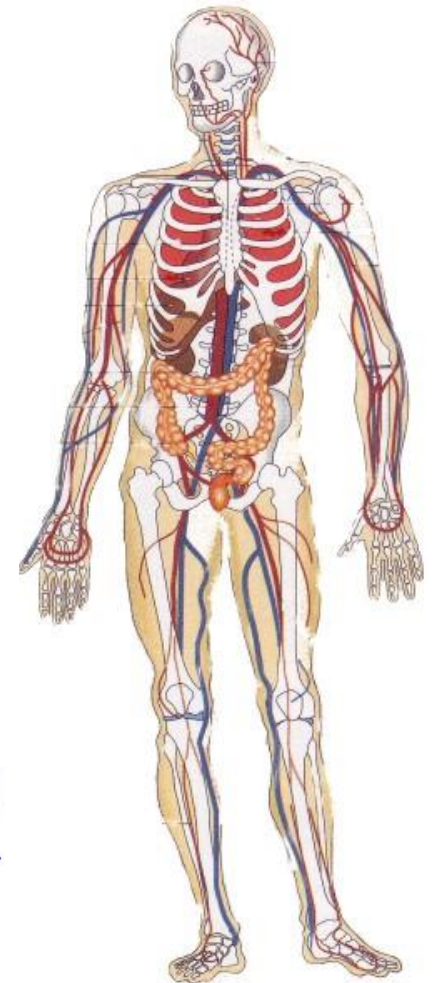
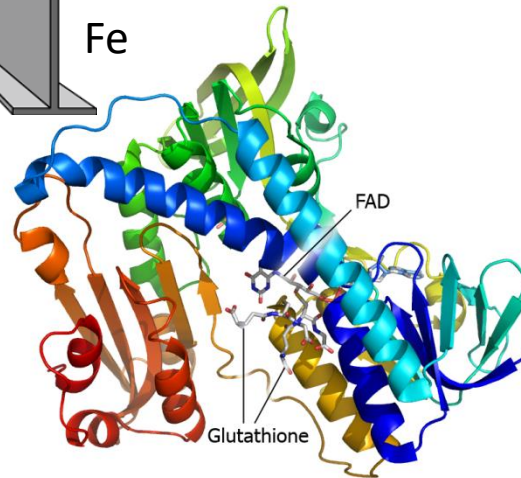


Moleküle



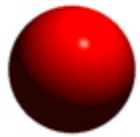
H<sub>2</sub>O: Wasser

Makroskopische Körper



# Isotope

Jedes Element wird (chemisch) von der Anzahl der Protonen bestimmt.  
Die Anzahl der Neutronen kann hingegen stark variieren.  
Hat ein Atom eines Elements mehr oder weniger Neutronen als "normal",  
so bezeichnet man dies als ein Isotop.



99,9885%

${}^1_1\text{H}$  (Wasserstoff)



0,0115%

${}^2_1\text{H}$  (Deuterium)



$10^{-15}\%$

${}^3_1\text{H}$  (Tritium)

Im Periodensystem (nächste Seite) ist das durchschnittliche Atomgewicht angegeben.

## Verwendung:

- Kernfusion, Kernfission
- Medizin
- Altersbestimmung (**Radiokohlenstoffdatierung**)

# Das Periodensystem der Elemente



Ordnungszahl		Masse (u)		Symbol		Vorkommen	
1	1	1.0079	H	o	natürlich		
1	2	4.0026	He	o	natürlich		
2	3	6.941	Li	o	natürlich		
2	4	9.0122	Be	o	natürlich		
3	11	22.99	Na	o	natürlich		
3	12	24.305	Mg	o	natürlich		
4	19	39.098	K	o	natürlich		
4	20	40.078	Ca	o	natürlich		
5	37	85.468	Rb	o	natürlich		
5	38	87.62	Sr	o	natürlich		
6	55	132.91	Cs	o	natürlich		
6	56	137.33	Ba	o	natürlich		
7	87	[223.0]	Fr	o	synthetisch		
7	88	[226.0]	Ra	o	synthetisch		
8	118	[294]	Uuo	o	synthetisch		

Serie	Farbe	Bezeichnung
Alkalimetall	rot	Alkalimetall
Erdalkalimetall	orange	Erdalkalimetall
Lanthanoid	rosa	Lanthanoid
Actinoid	lila	Actinoid
Übergangsmetall	gelb	Übergangsmetall
Halbmetall	hellgrün	Halbmetall
Metalloid	grün	Metalloid
Nichtmetall	blau	Nichtmetall
Halogen	hellblau	Halogen
Edelgas	grau	Edelgas

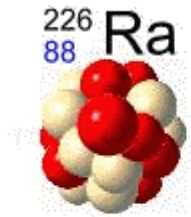
Innere Übergangsmetalle (Lanthanoide und Actinoide)														
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
138.91	140.12	140.91	144.24	[144.9]	150.36	151.96	157.25	158.93	162.5	164.93	167.26	168.93	173.05	174.97
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
[227.0]	232.04	231.04	238.03	[237.0]	[244.0]	[243.0]	[247.0]	[247.0]	[251.0]	[252.0]	[257.0]	[258.0]	[259.1]	[262.1]

Es gibt 94 verschiedene Atome, von  ${}^1_1\text{H}$  bis  ${}_{94}^{244}\text{Pu}$ .

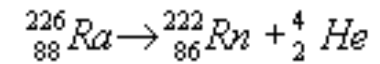
Jenseits der 94 gibt es viele weitere Atome, aber keines davon ist stabil.

(c) Copyright 2008 Periodensystem.info - Alle Rechte vorbehalten. Vervielfältigung nur mit Genehmigung.

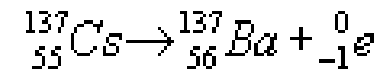
# Radioaktiver Zerfall



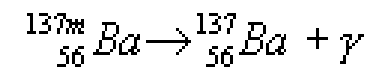
## $\alpha$ -Zerfall



## $\beta$ -Zerfall

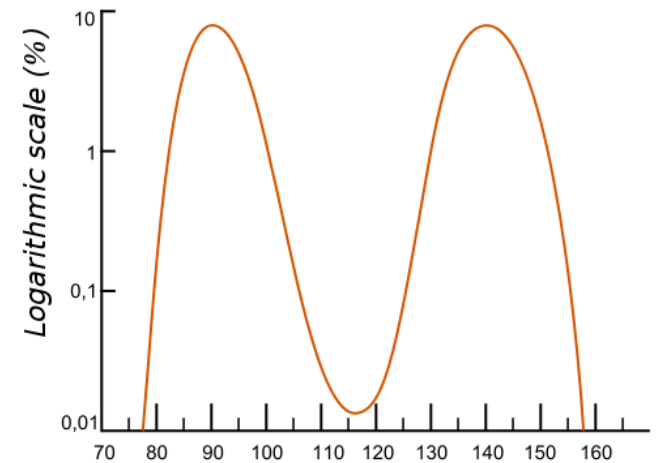
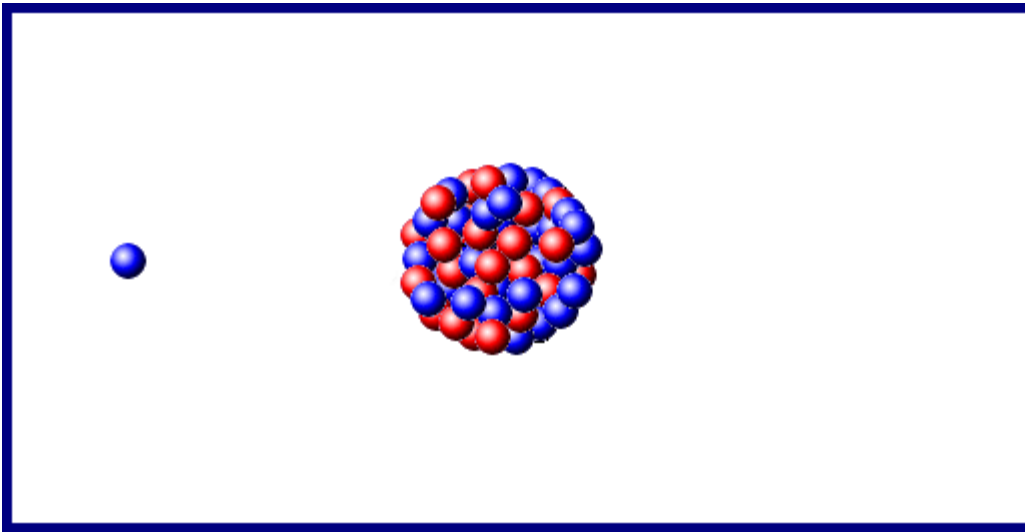


## $\gamma$ -Strahlung



# Kernspaltung

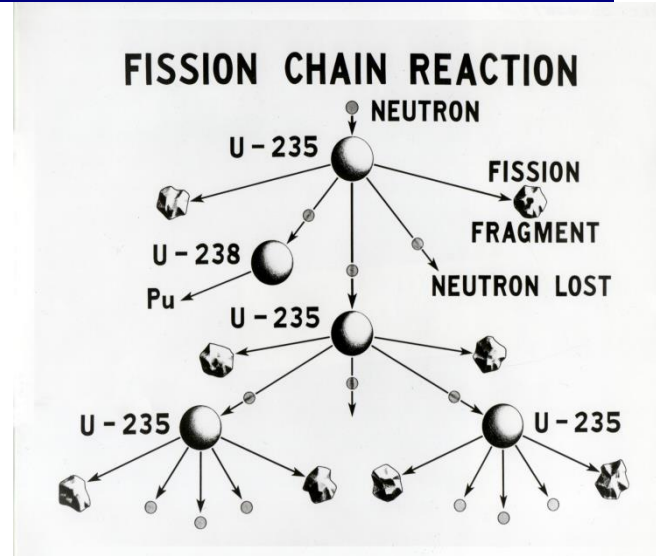
natürliches Vorkommen: Uran-238 99,3% U-235 0,7%



Distribution of Uranium-235 fission products (A)

## Prinzip für

- Kernreaktor
- Schneller Brüter
- Atombombe
- (Wasserstoffbombe)



**Damit es funktioniert:**

**Anreicherung**

**U-235 -> 3%**

**U-238 -> Pu-239**

# Spaltprodukte (kleine Auswahl)

## Cäsium

$^{134}\text{Cs}$  (HWZ ~ 2 Jahre)

$^{133}\text{Cs}$  (stabil)

$^{137}\text{Cs}$  (HWZ ~ 30 Jahre)

Magen-Darm-Trakt  
(Wildschwein, Pilze)  
biol. HWZ: ~110 Tage

$^{137}\text{Cs}$  ist nach dem Zerfall der kurzlebigen Isotope über Jahrhunderte hinweg das am stärksten strahlende Nuklid im Gemisch der Spaltprodukte.

## Iod

$^{127}\text{I}$  (stabil)

$^{129}\text{I}$  (HWZ ~ 15,7 Mio Jahre)

$^{131}\text{I}$  (HWZ ~ 8 Tage)

Schilddrüse  
~6000 Krebsfälle Weißrussland  
Jodtabletten

Eine besondere Gefahr geht von  $^{131}\text{I}$  aus, da Iod aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften in der Umwelt sehr mobil ist – es wird auch bei einem Unfall besonders leicht freigesetzt – und zudem als essentielles Spurenelement vom menschlichen Organismus aktiv aufgenommen wird. Vor allem die Schilddrüse enthält hohe Konzentrationen an Iod.

## Strontium

$^{90}\text{Sr}$  (HWZ ~ 28,8 Jahre)

Knochen  
(Milch)  
biol. HWZ: ~49 Jahre

$^{90}\text{Sr}$  ist eines der potentiell gesundheitsschädlichsten Spaltprodukte, denn es lagert sich nach Aufnahme in den Organismus in den Knochen (chemische Ähnlichkeit zu Calcium) ab. Sehr gefährlich ist das Tochternuklid  $^{90}\text{Y}$  (Yttrium: HWZ ~ 64 Stunden) mit vierfach höherer Energie der Betastrahlung.

## Krypton

$^{85}\text{Kr}$  (HWZ ~ 10.8 Jahre)

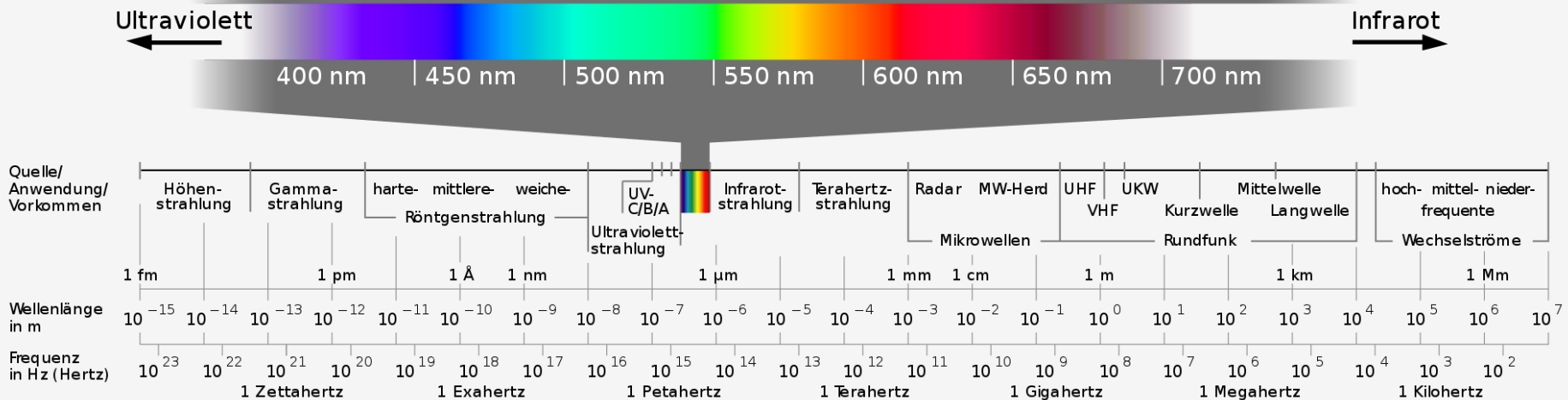
sehr seltenes Element

Die Menge an radioaktivem Krypton in der Erdatmosphäre gibt einen Anhaltspunkt über die Menge an bearbeitetem Spaltmaterial (öffentlich und geheim).

## Zusammenhang zwischen Halbwertszeit und spezifischer Aktivität

Isotop	Halbwertszeit	spezifische Aktivität
I-131	8 Tage	4.600.000.000.000 Bq/mg
Cs-137	30 Jahre	3.300.000.000 Bq/mg
Pu-239	24.110 Jahre	2.307.900 Bq/mg
U-235	703.800.000 Jahre	80 Bq/mg
U-238	4.468.000.000 Jahre	12 Bq/mg
Th-232	14.050.000.000 Jahre	4 Bq/mg

## Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)





# Aktivität, Energiedosis, Äquivalentdosis

	Name	Einheit
Aktivität	Becquerel (Bq)	[1/sek]
Energiedosis	Gray (Gy)	[J/kg]
Äquivalentdosis	Sievert (Sv)	[J/kg]
Dosisleistung	Sv pro Zeit	[J/kg/s] (alt rem/s: 1 Sv = 100rem)

## Aktivität

Das Maß für die Aktivität einer radioaktiven Substanz ist die Anzahl der Atomkerne, die in einer Sekunde zerfallen.

## Energiedosis

Tritt die ionisierende Strahlung in Wechselwirkung mit Materie, wird ein Teil dieser Energie absorbiert.  
Energiedosis = absorbierte Energie / Masse (Joule/kg)

## Äquivalentdosis

Die Äquivalentdosis gibt die Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen an (Qualitätsfaktor).

## Dosisleistung:

Maß für die Dosis oder Äquivalentdosis, bezogen auf eine bestimmte Zeitspanne:  
Äquivalentdosis pro Stunde (h) / Jahr (a).

## Wichtige Grenzwerte und typische Dosiswerte im Vergleich

Effektive Dosis	Auswirkung
0,01 mSv pro Jahr	Rechnerisch ermittelte Größenordnung der jährlichen Höchstdosis der Bevölkerung in Deutschland durch Kernkraftwerke im Normalbetrieb (Diese Berechnungen gehen von konservativen Annahmen unter anderem des Aufenthaltsortes und der Ernährung aus, so dass die tatsächlichen Expositionswerte darunter liegen.)
0,01 - 0,03 mSv pro Aufnahme	
bis zu 0,1 mSv pro Flug	Dosis durch Höhenstrahlung bei einem Flug von München nach Japan
1 mSv pro Jahr	Grenzwert (maximal zulässige Dosis) der jährlichen Strahlenexposition für Personen der allgemeinen Bevölkerung (die z.B. aus der Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus kerntechnischen Anlagen resultiert).
1 - 3 mSv pro Aufnahme	Typischer Dosisbereich für eine Computertomographie des Hirnschädels
2 mSv pro Jahr	Durchschnittliche jährliche Dosis einer Person in Deutschland aus künstlichen Quellen, vornehmlich Medizin (Wert für 2012: etwa 1,9 mSv)
2 mSv in 50 Jahren	Gesamte Dosis für eine Person im Voralpengebiet auf Grund des Reaktorunfalls von Tschernobyl für den Zeitraum 1986-2036
1-10 mSv pro Jahr (Ø 2,1 mSv)	Durchschnittliche jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland aus natürlichen Quellen
10-20 mSv pro Aufnahme	Typischer Dosisbereich für eine Ganzkörper- Computertomographie eines Erwachsenen
20 mSv pro Jahr	Grenzwert (maximal zulässige Dosis) der jährlichen Strahlenexposition für beruflich strahlenexponierte Personen in Deutschland
250 mSv	Richtwert für eine Person beim Einsatz lebensrettender Maßnahmen oder zur Vermeidung großer Katastrophen in Deutschland
400 mSv	Grenzwert (maximal zulässige Dosis) für die Berufslebensdosis bei beruflich strahlenexponierten Personen in Deutschland

Kernkraft  
Medizin  
„Natur“  
Arbeit

# Strahlenkrankheit

- Stochastische Schäden
- Deterministische Schäden

○ Äqu.-Dosis	Symptome
○ < 0,5 Sv	„nur“ stochastische Schäden
○ < 2 Sv	10% Todesfälle nach 30 Tagen (LD 10/30)
○ < 3 Sv	LD 35/30
○ < 4 Sv	LD 50/30
○ < 6 Sv	LD 60/30
○ < 10 Sv	LD 100/14
○ < 20 Sv	LD 100/7
○ < 50 Sv	LD 100/3
○ > 50 Sv	Desorientierung, Koma innerhalb Sekunden. Tod in wenigen Stunden
○ > 80 Sv	sofortiger Eintritt des Todes

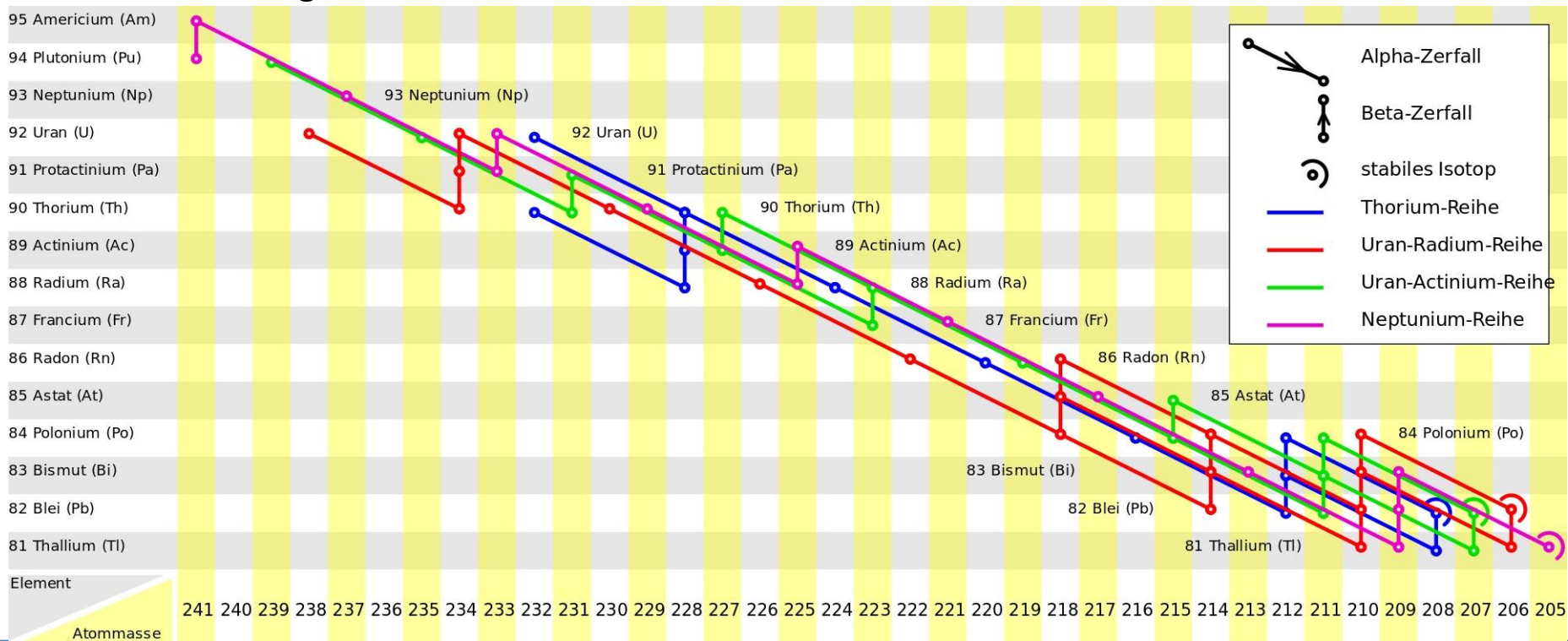
## The Fukushima Daiichi Incident (Quelle: Areva)

- ◆ After Explosion in Unit 2 (Damage of the Containment)
  - Temporal peak values 12 mSv/h (~300 mSv/d – ~2 Sv/w)
  - Local peak values on site up to 400 mSv/h (wreckage / fragments?)
  - Currently stable dose on site at 5 mSv/h
  - Inside the buildings a lot more

# Warum braucht man Endlager?

**Hochradioaktiver Abfall muss „weggesperrt“ werden für eine lange Zeit (einige Halbwertszeiten – grüne Reihe)**

- $^{239}\text{Pu}$  24.000 Jahre
- $^{238}\text{U}$  4.500.000.000 Jahre
- $^{235}\text{U}$  700.000.000 Jahre
- $^{231}\text{Th}$  25 Stunden
- $^{223}\text{Ra}$  11 Tage
- $^{219}\text{Rn}$  4 Sekunden
- $^{222}\text{Rn}$  3,8 Tage
- $^{215}\text{Po}$  1,8 ms
- $^{211}\text{Pb}$  36 Minuten
- $^{207}\text{Pb}$  stabil



# Into Eternity – ein Film über das Endlager Olkiluoto (Onkalo)

**Location:** 61° 14′ 06,54″ N  
21° 28′ 55,39″ E

## Hochradioaktive Abfälle [Tonnen]

- 12.000 weltweit **pro Jahr**
- 450 Deutschland **pro Jahr**
- 300.000 weltweit (Stand 2016)
- **700.000** **Russland (hoch/mittel - 1/5 Europa)**
- 70.000 U.S.A.
- **6.500** **Kapazität Onkalo**
  
- Zwischenlager 100 Jahre plus
- Endlager > 100.000 Jahre

**„Alternativen“ zur Endlagerung?**





# „Alternativen“ zur Endlagerung! **es gibt keine Alternativen!**

**Transmutation**

langwierig (rekursiv), sehr teuer

**Entsorgung im Meer**

erst 1994 verboten! – über 100.000 Tonnen Atommüll  
Abwässer werden noch heute entsorgt  
Beispiele: La Hague und Sellafield/Windscale

**illegal (Mafia)**

2009 aufgedeckt: Gift- und Atommüll entsorgt im  
Adria und Thyrrenisches Meer - mindestens 32 Schiffe

**Uranmunition**

„elegante Methode“, betrieben von 21 Staaten  
mehrere tausend Tonnen „entsorgt“, z.B. im  
2. Golfkrieg (1990), Kosovo (1999), Irak (2003), Syrien (heute)

**Antarktis**

weit weg, aber nicht sicher – Wärme und Eis vertragen sich nicht

- globale Erwärmung – Eis schmilzt von oben
- radioaktives Material – Eis schmilzt von unten

**Weltraum**

direkt in die Sonne schießen: ideal, aber immens teuer  
Risiko: etwa 1% der Raketenstarts sind nicht erfolgreich

# Referenzen

## **Web-Links**

<http://www.periodensystem.info/>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Spaltprodukt>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Radiokohlenstoffdatierung>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Radioaktivität>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Bindungsenergie>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Kernspaltung>

<https://www.weltderphysik.de>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Transmutation>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Iod>

<https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Strahlenkrankheit>

[https://de.wikipedia.org/wiki/Endlager\\_Olkiluoto](https://de.wikipedia.org/wiki/Endlager_Olkiluoto)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktiver\\_Abfall](https://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktiver_Abfall)

<https://www.wissenschaft.de/allgemein/ganzkoerper-ct-strahlenbelastung/>

# The Fukushima Daiichi Incident

## 3. Radiological releases

