

Pädagogisches Landesinstitut Rheinland-Pfalz
Speyer 14.04.2011
Fukushima –Hintergründe und vertiefende Informationen

Physik der Kernkraftwerke und Grundlagen des Strahlenschutzes

Dr. Hans-Jochen Foth
Fachbereich Physik
Technische Universität Kaiserslautern

Atom

Das Atom (von griech.: atomos = unteilbar, unzerschneidbar) ist seit vielen hundert Jahren für die Naturwissenschaftler nicht mehr unteilbar.

Unsere heutige Vorstellung:

Ein Atom besteht aus

Kern positive Ladung
 quasi die gesamte Masse des Atoms
 aufgebaut aus Kernbausteinen
 Durchmesser 10^{-15} m

Kern: Proton und Neutron

und

Hülle negative Ladung
 aufgebaut aus Hüllenteilchen
 Durchmesser 10^{-10} m

Hülle: Elektronen
 Ladung: $q = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C
 Masse. $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg

Zwischen der Atomen herrschen Kräfte, die z.B. für chemische Bindungen verantwortlich sind. Durch Änderung der Bindungsverhältnisse kann man Energie gewinnen.

Atomkraftwerk = Gaskraftwerk, Kohlekraftwerk etc.

Atom-Kern

Eigenschaften der Kernbausteine:

Proton: Ladung: $q_p = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Masse: $m_p = 1,67239 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Neutron: Ladung: $p_n = 0$
Masse: $m_n = 1,67470 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Definition der atomaren Masseneinheit u:
= 1/12 der Masse des häufigsten
Kohlenstoff-Atoms

Problem: Das häufigste Kohlenstoff-Atom
besteht aus

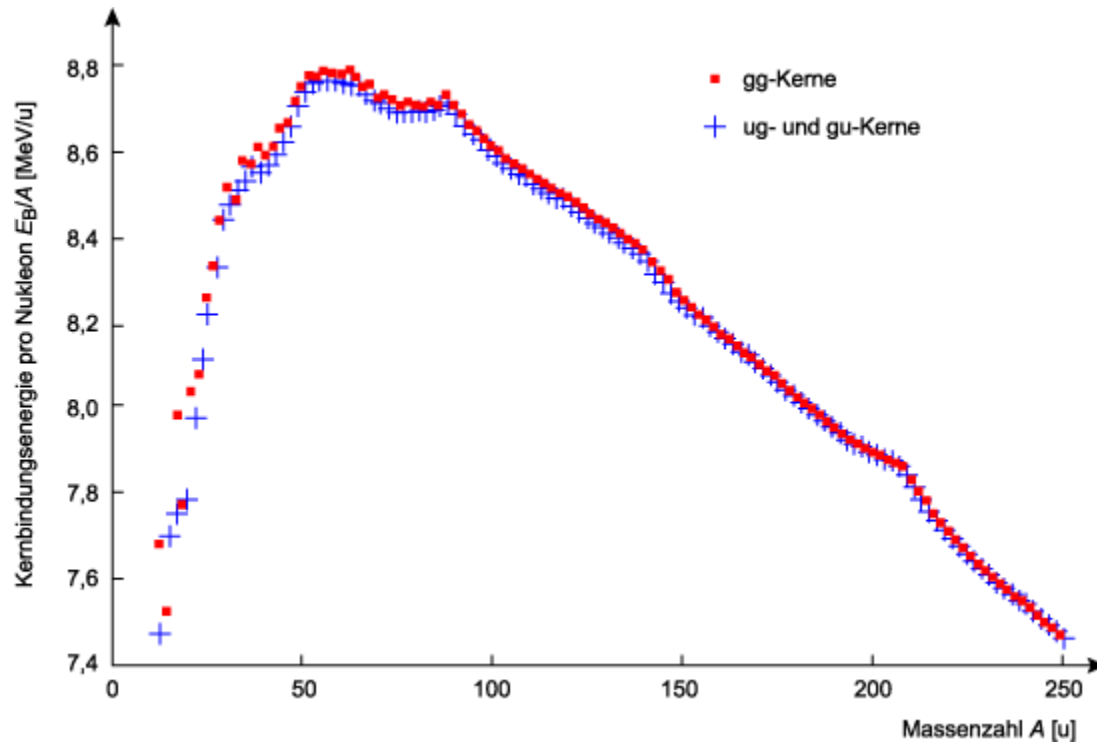
6 Protonen $6 \times 1,0078252 \text{ u} = 6,0469 \text{ u}$

6 Neutronen $6 \times 1,0086654 \text{ u} = 6,0512 \text{ u}$

6 Elektronen $6 \times 0,0005486 \text{ u} = 0,0033 \text{ u}$

Summe $12,1014 \text{ u}$

Bindungsenergie erkennt man im Massedefekt ($E = m c^2$)

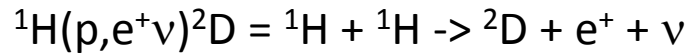
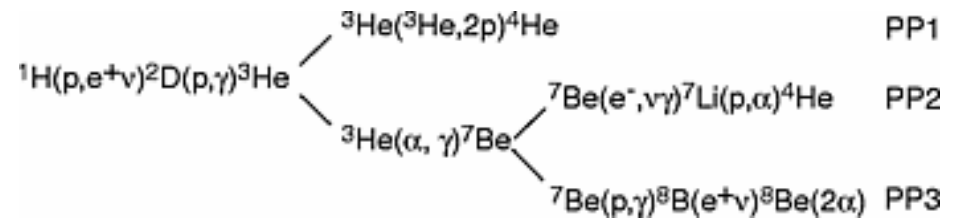


Kernbindungsenergie für gerade-gerade Kerne (gg-Kerne) und ungerade-gerade bzw. gerade-ungerade Kerne (ug- und gu-Kerne)

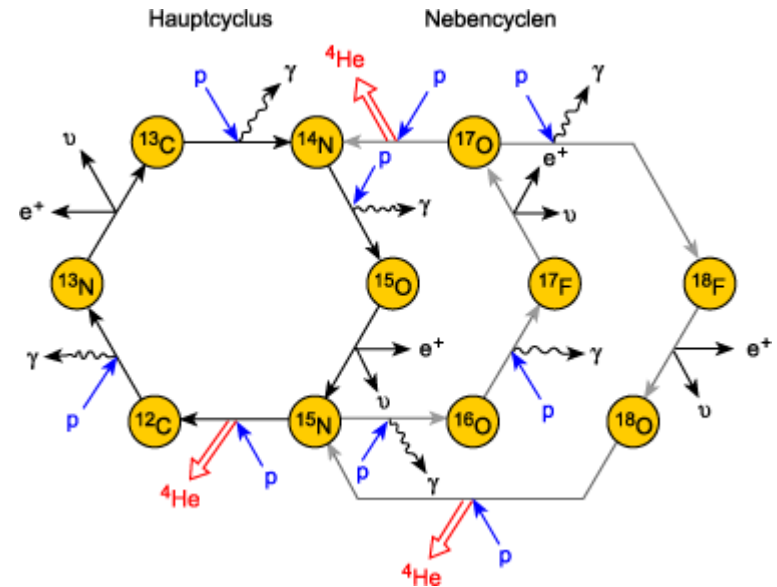
Wie wurden die Atomkerne gebildet?

Kernfusion

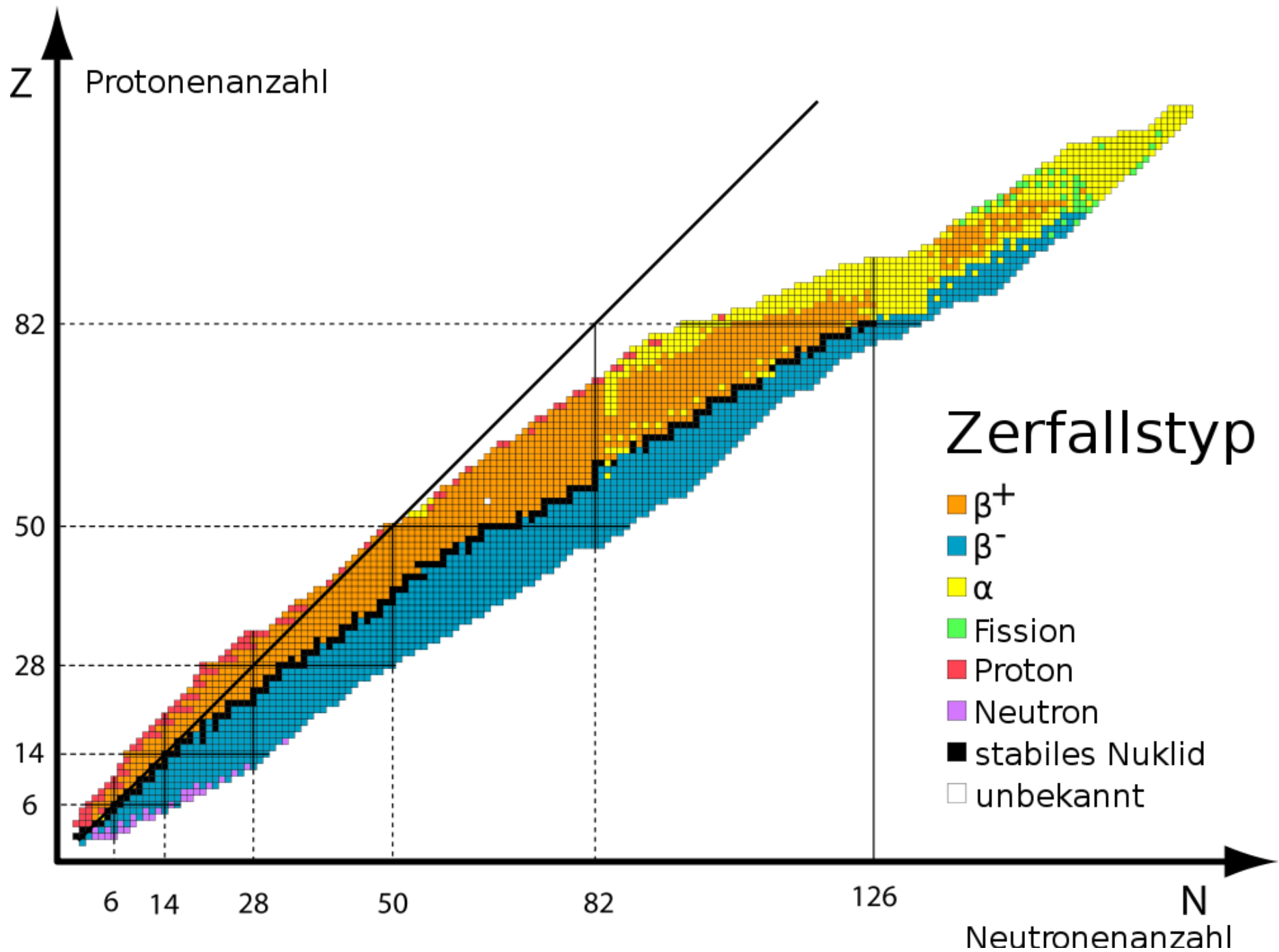
Mögliche Reaktionen bei der Vereinigung von 4 Protonen



Bethe-Weizäcker-Zyklus



Mittels weiterer Kernfusionszyklen werden in Sternen Elemente bis zu 26 Protonen (Eisen) gebildet. Alle Isotope mit mehr als 26 Protonen werden bei Supernova-Explosionen am Ende eines Sternen-Lebens gebildet.



Kurze Zusammenfassung der radioaktiven Zerfallsarten

β^- -Zerfall $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ Neutronenüberschuss

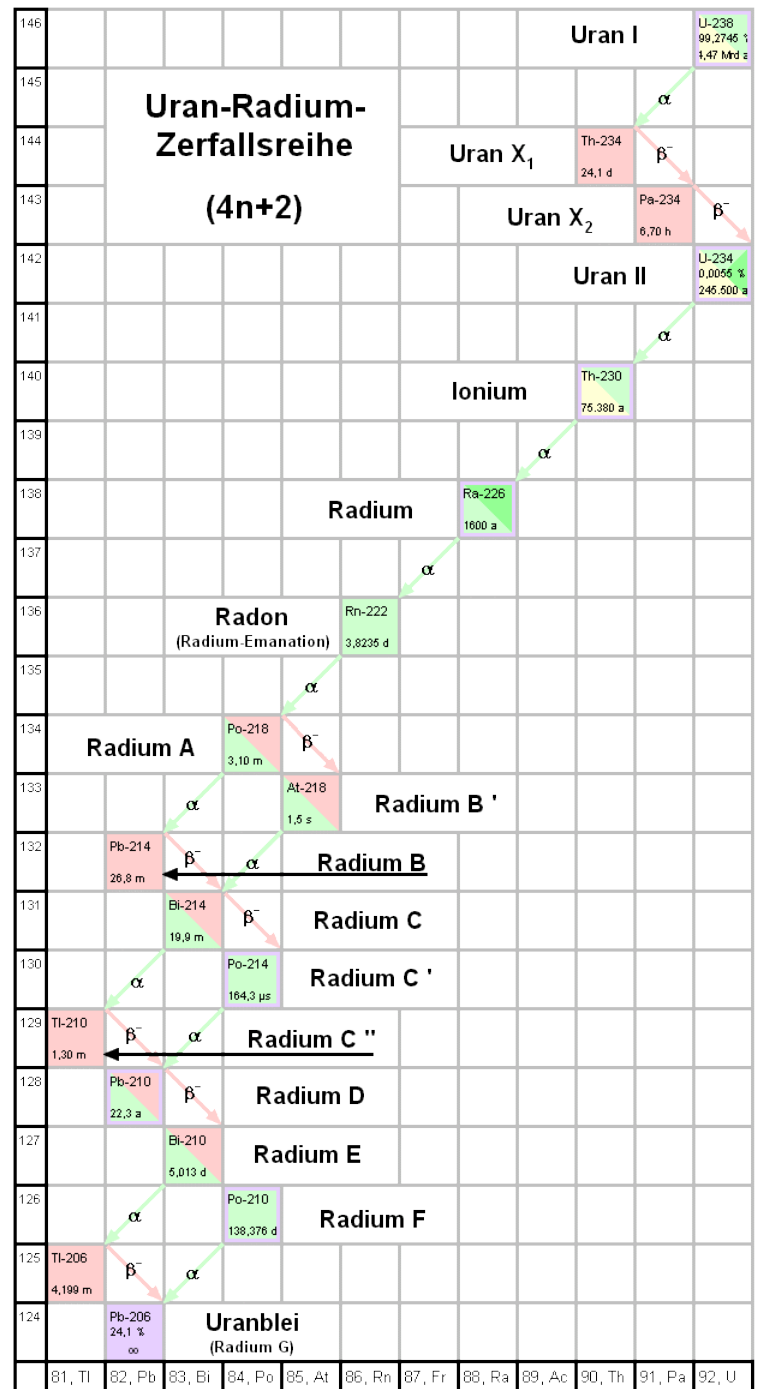
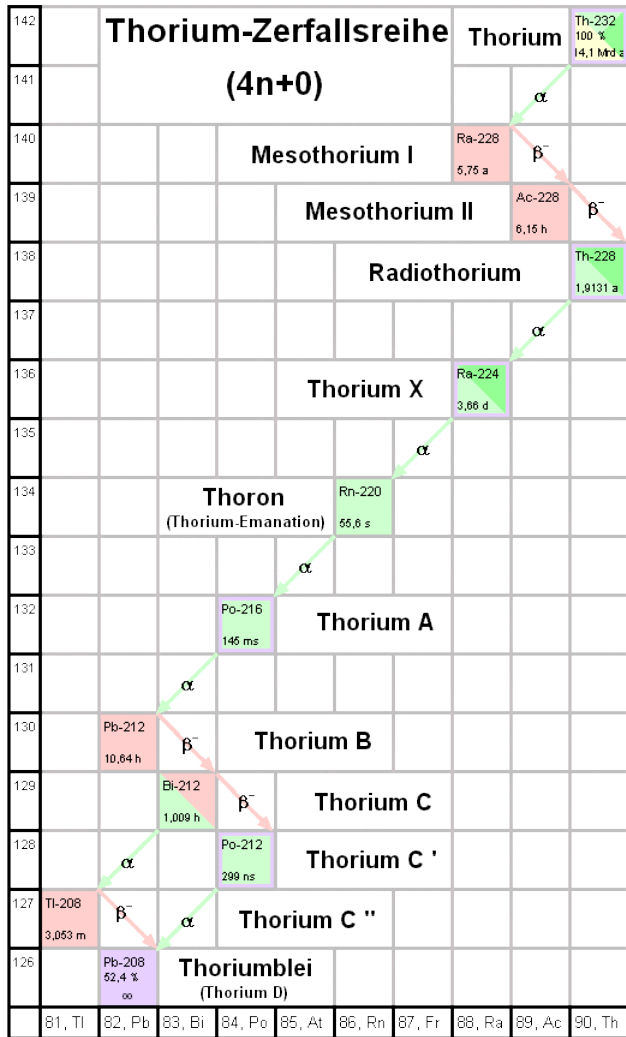
β^+ -Zerfall $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ Protonenüberschuss

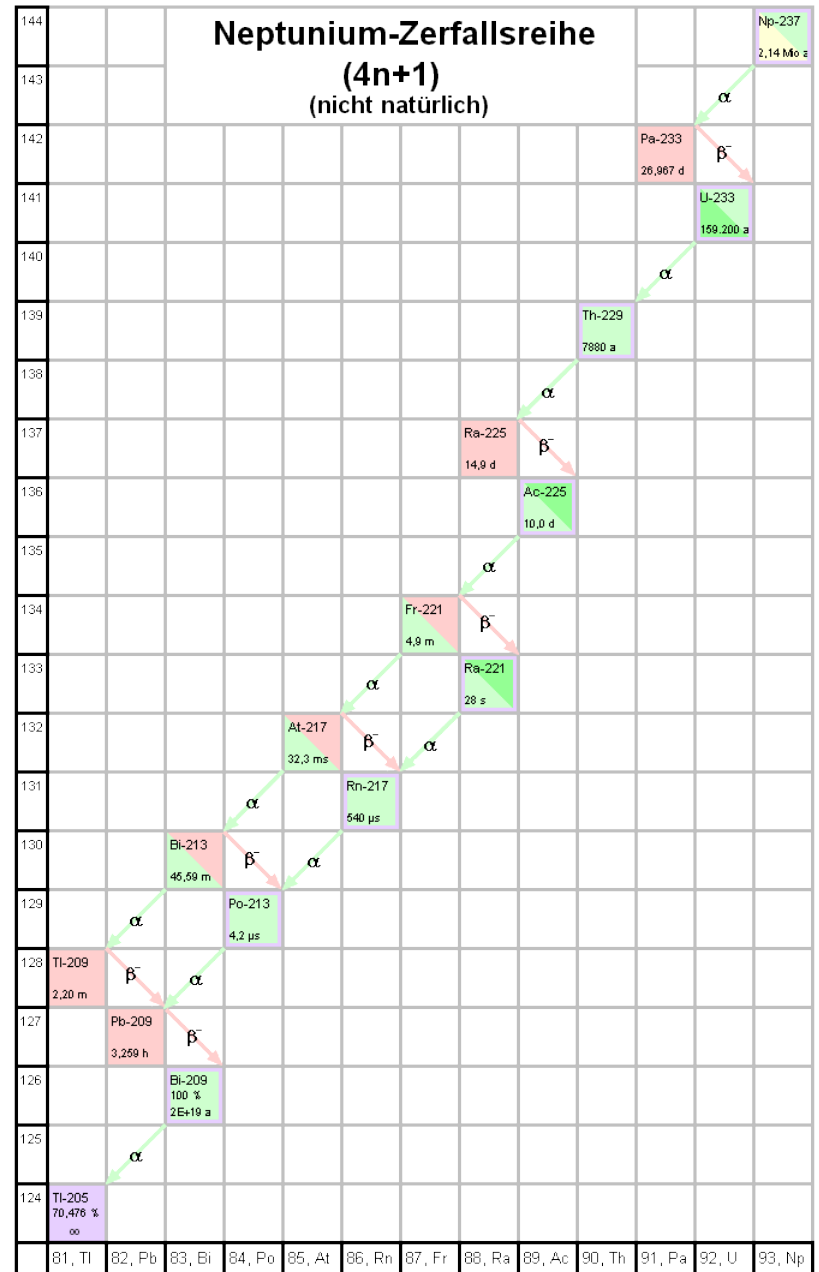
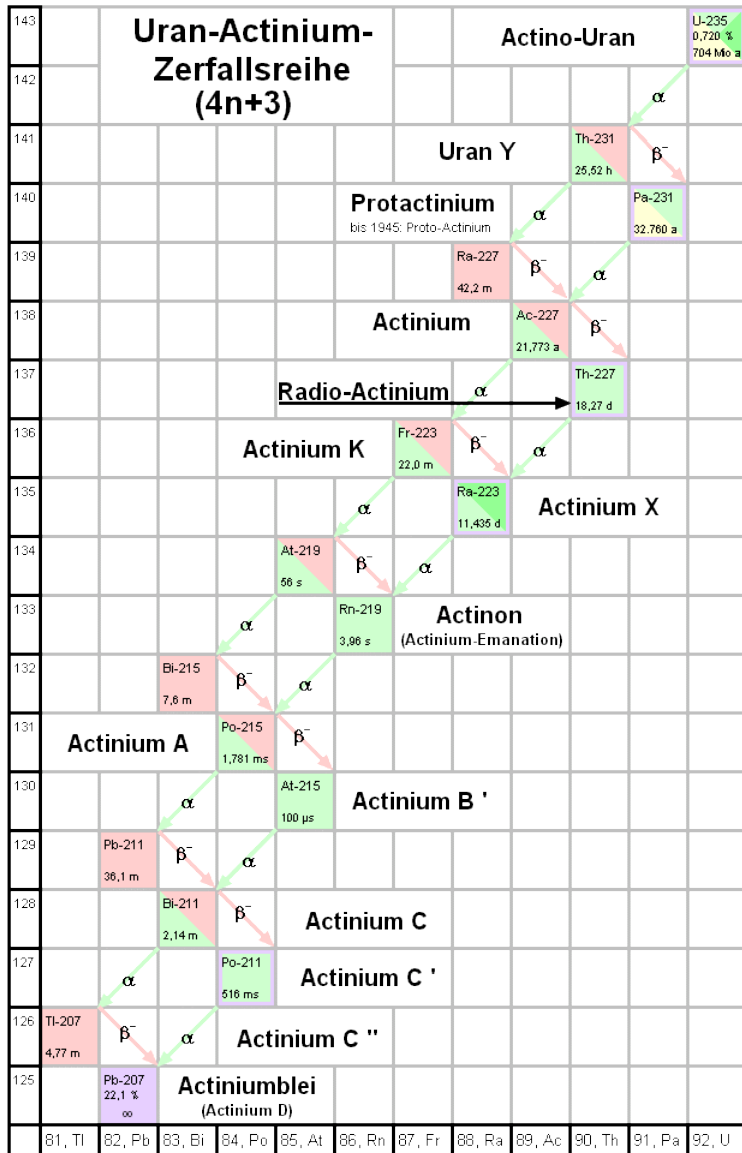
Elektroneneinfang $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ Protonenüberschuss

Folge: Es entsteht ein Loch auf einer unteren Elektronenschale, das durch Herunterspringen eines Elektrons einer höheren Schale aufgefüllt wird. Konsequenz: Es wird charakteristische Röntgen-Strahlung emittiert.

α -Zerfall: Ein ^4He -Kern verlässt den Atomkern $Z > 83$

α-Zerfall



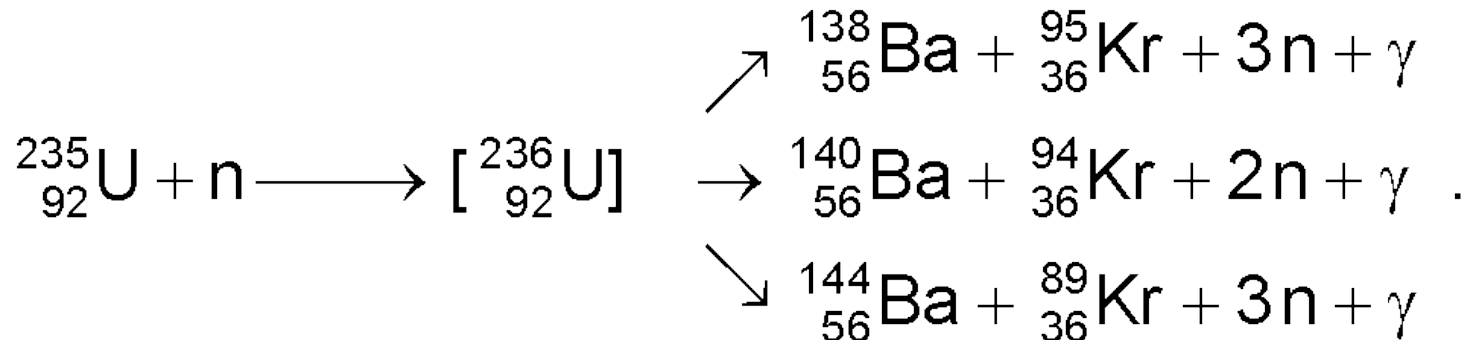


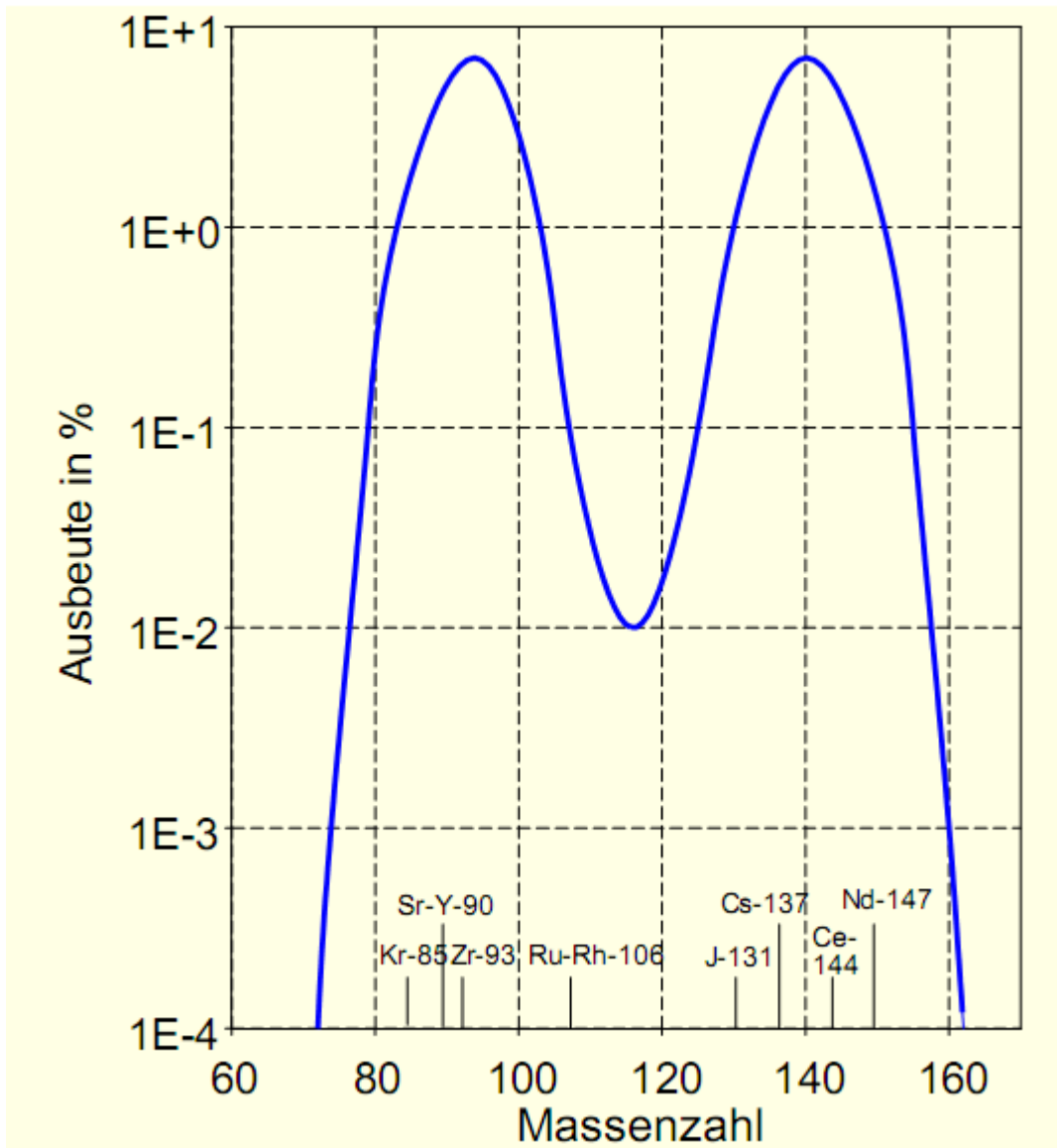
Kernspaltung

Bei diesem Sonderfall der Mehrfachprozesse handelt es sich um das Zerlegen eines schweren Kerns in zwei oder mehrere mittelschwere Kerne.

Der Vorgang ist gewöhnlich mit der Emission von Neutronen, Gammastrahlung, Alphateilchen, Betateilchen und Antineutrinos verbunden.

Das einfallende Teilchen (meist ein Neutron) spaltet den Targetkern in zwei Bruchstücke (*induzierte Kernspaltung*). Da diese gewöhnlich zusammen genommen weniger Neutronen benötigen, als der Targetkern besaß, bleiben (meist zwei bis drei) Neutronen hoher kinetischer Energie „übrig“, die wieder andere Kerne treffen und spalten können, so dass ein lawinenartiger Zerfallsprozess, eine sogenannte Kettenreaktion, entsteht.





Verteilung der Spaltprodukte

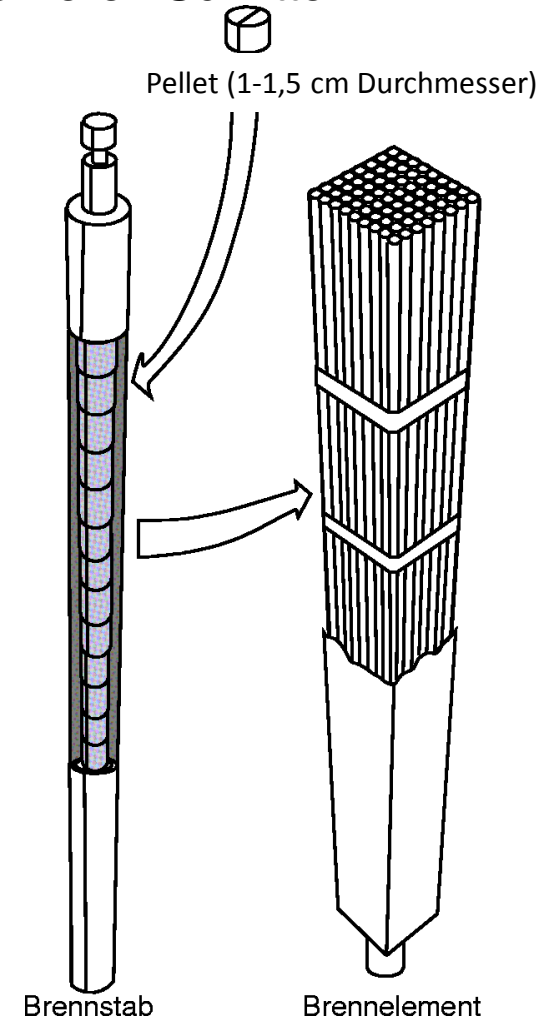
Spaltbare Materialien

Isotop	$\tau_{1/2}$	Häufigkeit	$\sigma_{f,therm}$ [barn]
U-234	$2,446 \cdot 10^5$ a	0,005 %	
U-235	$7,038 \cdot 10^8$ a	0,720 %	582
U-238	$4,468 \cdot 10^9$ a	99,275 %	< 0,0005
Pu-239	$2,411 \cdot 10^4$ a		743
Pu-240	$6,55 \cdot 10^3$ a		0,03
Pu-241	14,4 a		1009
Pu-242	$3,763 \cdot 10^5$ a		< 0,2
Pu-243	4,956 h		196
		Natururan:	99,3 % U-238 0,7 % U-235
Konzentrieren wir uns auf Uran		Brennelemente:	96,5 % U-238 3,5 % U-235
		abgebrannte Brennelemente:	95,0 % U-238 0,8 % U-235 0,9 % Pu u.a.

Brennstoff-Produktion

Die Herstellung von Brennelementen für den weltweit am häufigsten eingesetzten Reaktortyp, den Leichtwasserreaktor (LWR), erfolgt in mehreren Schritten:

- Konversion:** umfasst die chemische Umwandlung des Ausgangsmaterials Yellow Cake in das gasförmige Uranhexafluorid.
- Anreicherung:** Der Anteil des sehr gut spaltbaren Uranisotops U-235 im Natururan ist mit 0,7 % für den Einsatz im Leichtwasserreaktor zu gering. Deshalb wird unter Einsatz von Zentrifugen- oder Gasdiffusionsverfahren die Konzentration an U-235 auf bis zu 4 % erhöht.
- Brennelementfertigung:** Im Anschluss wird das aufkonzentrierte Uranhexafluorid in Urandioxid-Pulver umgewandelt. Daraus werden durch Pressen und Sintern die Brennstofftabletten (Pellets) hergestellt, die abschließend in einem Brennelement angeordnet werden.



Iod gilt als sehr flüchtiges Radionuklid, das als Ergebnis der Kernspaltung in hoher Konzentration im sog. Gap, dem Spalt zwischen den Brennstofftabletten und dem Hüllrohr der KKW-Brennstäbe, vorliegt. Sollte das Containment des KKW im Falle eines Kernschadens oder gar einer Kernschmelze nach Unfalleintritt ein Leck aufweisen, so sorgt es aus Sicht des Strahlenschutzes für großen Schaden, da es praktisch als erstes Nuklid, neben den radioaktiven Isotopen ^{85}Kr und ^{135}Xe der Edelgase Krypton und Xenon, in größerer Konzentration freigesetzt wird und in den biologischen Kreislauf gelangt.

Energiebilanz der Spaltung von U-235 (Angaben pro Atom)

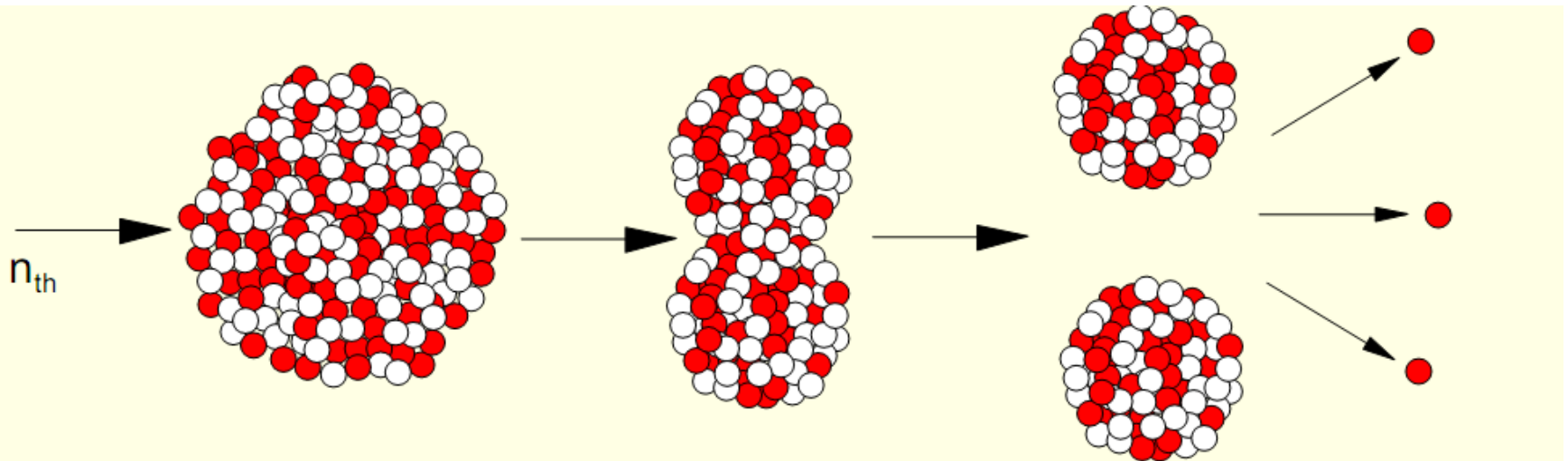
Bewegungsenergie der Trümmerkerne	175 MeV
Bewegungsenergie der prompten Neutronen	5 MeV
Energie der prompten γ -Strahlung	7 MeV
Energie der β -Teilchen (Trümmerkerne)	7 MeV
Energie der γ -Quanten (Trümmerkerne)	6 MeV
Neutrinos	10 MeV
<hr/>	
Summe	210 MeV
davon nutzbar	190 MeV

Spaltet man ein Mol Uran-235, also 235 g, dann sind dies $6,0221367 \cdot 10^{23}$ Atome und somit eine Energie von $E = 1,144 \cdot 10^{23} \text{ MeV} = 1,144 \cdot 10^{32} \text{ eV}$

Mit $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ errechnet man als nutzbare Energie: $E = 7,15 \cdot 10^{12} \text{ J}$

Umrechnung: $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$, das bedeutet: $E = 1,98 \cdot 10^6 \text{ kWh}$

Energiekosten: $1 \text{ kWh} = 0,1735 \text{ €}$ führen zu einem Preis von $343\,530 \text{ €}$



Spaltstoff (U-235) Zwischenkern (U-236) Spaltprodukte 2-3 Spaltneutronen

Neutronenwechselwirkungsquerschnitt

$$\sigma_{\text{ges}} = \sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{einf}} + \sigma_{\text{spalt}}$$

Streuquerschnitt σ_s ($\sigma_{\text{scattering}}$)

Streuquerschnitt für elastische Streuung σ_{el}

Streuquerschnitt für inelastische Streuung σ_{inel}

Absorptionsquerschnitt σ_{einf} ($\sigma_{\text{absorption}}, \sigma_{\text{capture}}$)

Einfangquerschnitt ohne Spaltung

Spaltquerschnitt σ_{spalt} (σ_{fission})

Spaltquerschnitt für binäre Spaltung

Streu- und Einfang-Querschnitt (Angaben in barn: $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$)

Element	σ_{einf}	σ_{streu}
H-1	0,33	38 (Gas)
H-2	0,00046	7
B-10	755	4
Gd-64	46 000	-

Spaltquerschnitt für Uran 235

thermische Neutronen:

$E = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$ $\sigma_{\text{spalt}} \sim 1000 \text{ b}$

$E \sim 10^{-1} \text{ eV}$ $\sigma_{\text{spalt}} \sim 250 \text{ b}$

schnelle Neutronen:

$E > 10^6 \text{ eV}$ $\sigma_{\text{spalt}} \sim 1-2 \text{ b}$

Thermische Spaltung

Spaltquerschnitt für Uran 238

thermische Neutronen:

$E = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$ $\sigma_{\text{spalt}} \sim 0,0005 \text{ b}$

schnelle Neutronen:

$E \sim 2-3 \cdot 10^6 \text{ eV}$ $\sigma_{\text{spalt}} \sim 0,5 \text{ b}$

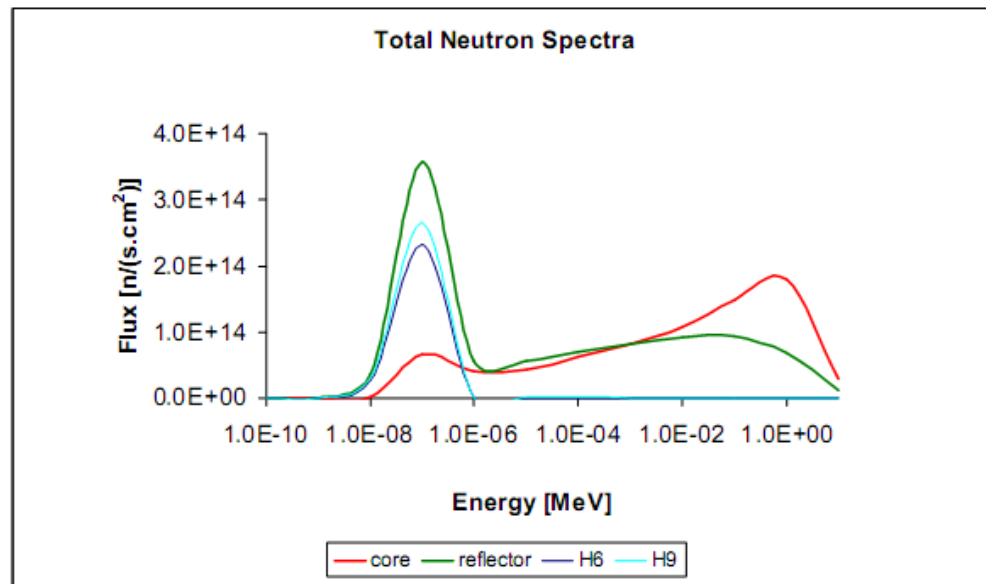
Schnelle Spaltung

Einteilung von Neutronen

- kalte Neutronen
 - 25 K (-248.16 °C) $\lambda = 0.35 \text{ nm}$
- thermische Neutronen
 - Energie < 10 eV
 - 300 K (26,84 °C) $\lambda = 0.1 \text{ nm}$
 - $E_{\text{kin}} \sim 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$
 - $v \sim 2200 \text{ m/s}$
- heiße Neutronen
 - z.B. 2000 - 2400 K (1726.84 - 2126.84 °C) $\lambda = 0.04 - 0.08 \text{ nm}$

Neutronenspektrum des HFR

(Hochflussreaktor: Forschungsreaktor,
Neutronenquelle)



Neutronenabsorption

Regelstäbe / -platten

Cd

Ni

In / Ag

Hf

B₄C , B₂O₃

Steuerung von Kernreaktoren

$^{113}\text{Cd} (n,\gamma) ^{114}\text{Cd}$

SUR-100

$^{10}\text{B} (n,\alpha) ^7\text{Li}$

Kernschutz

Störfallschutz bei Kernreaktoren

$\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$

biological shield

Neutronenschutz bei Kernreaktoren

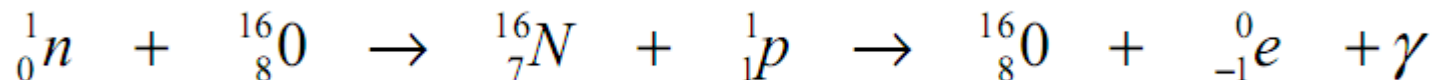
H_3BO_4

SUR-100

Einfang von abgebremsten Neutronen:

z.B. durch Sauerstoff im Kühlwasser:

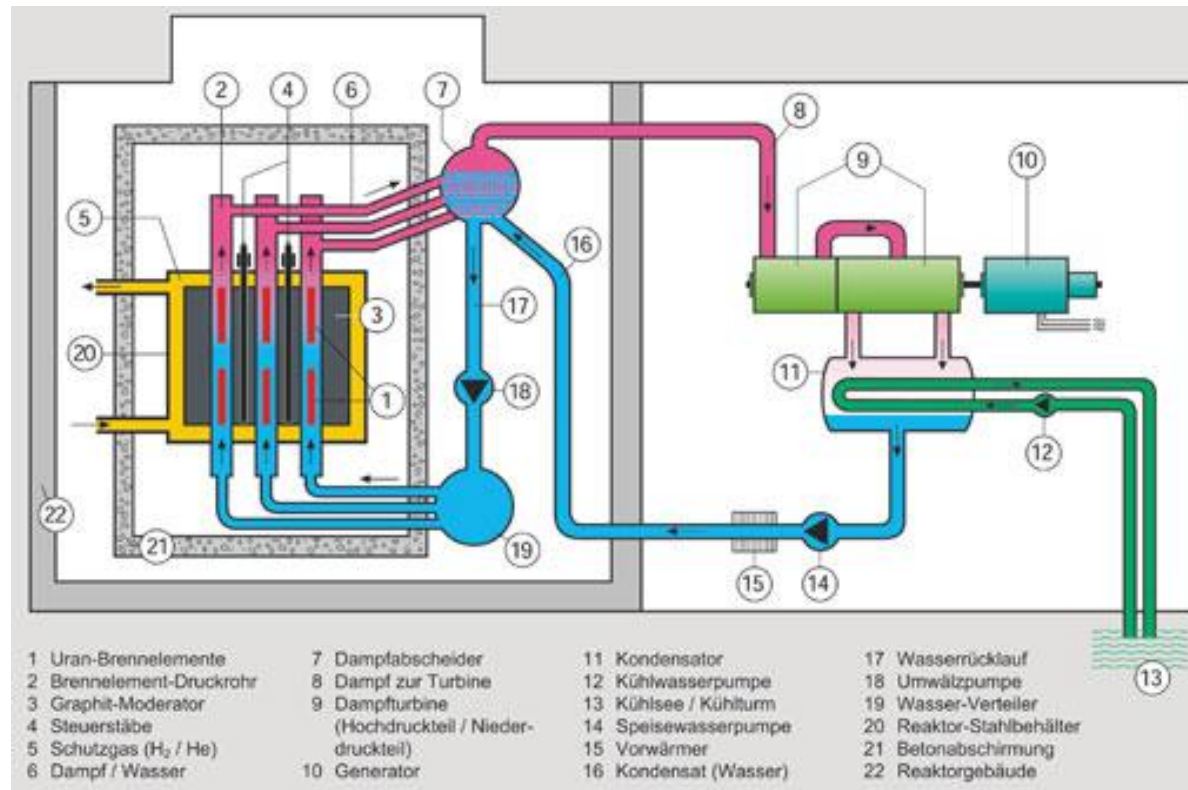
$^{16}\text{O} (n,e) ^{16}\text{O}$



SUR: Siemens Unterrichtsreaktor

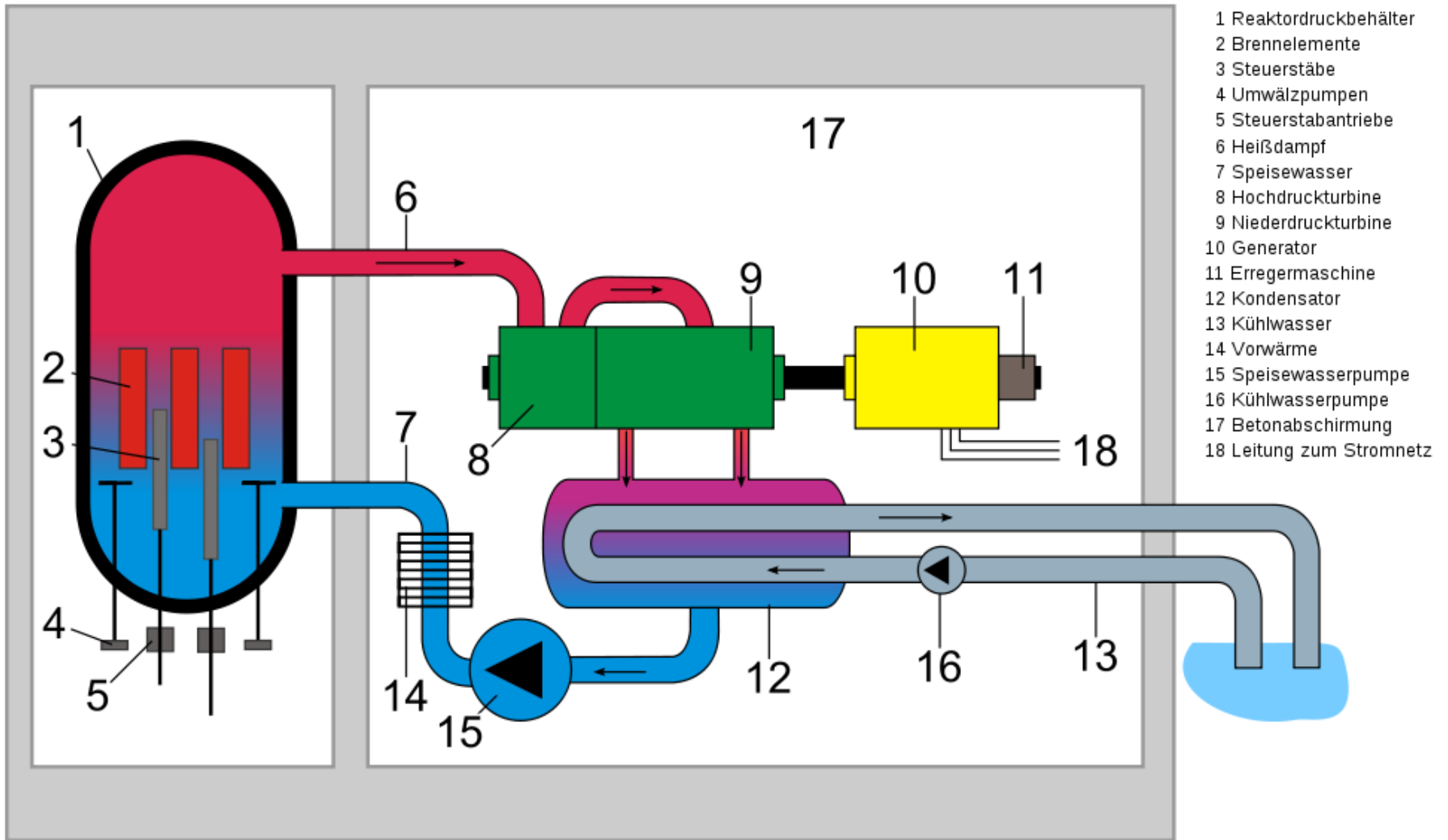
zu Unterrichtszwecken dienende Forschungsreaktoren; sie haben aufgrund geringer Leistung selbst in der Spaltzone faktisch keine Temperaturerhöhung, Systeme zur Wärmeabfuhr erübrigen sich

Graphit-moderierter Kernreaktor

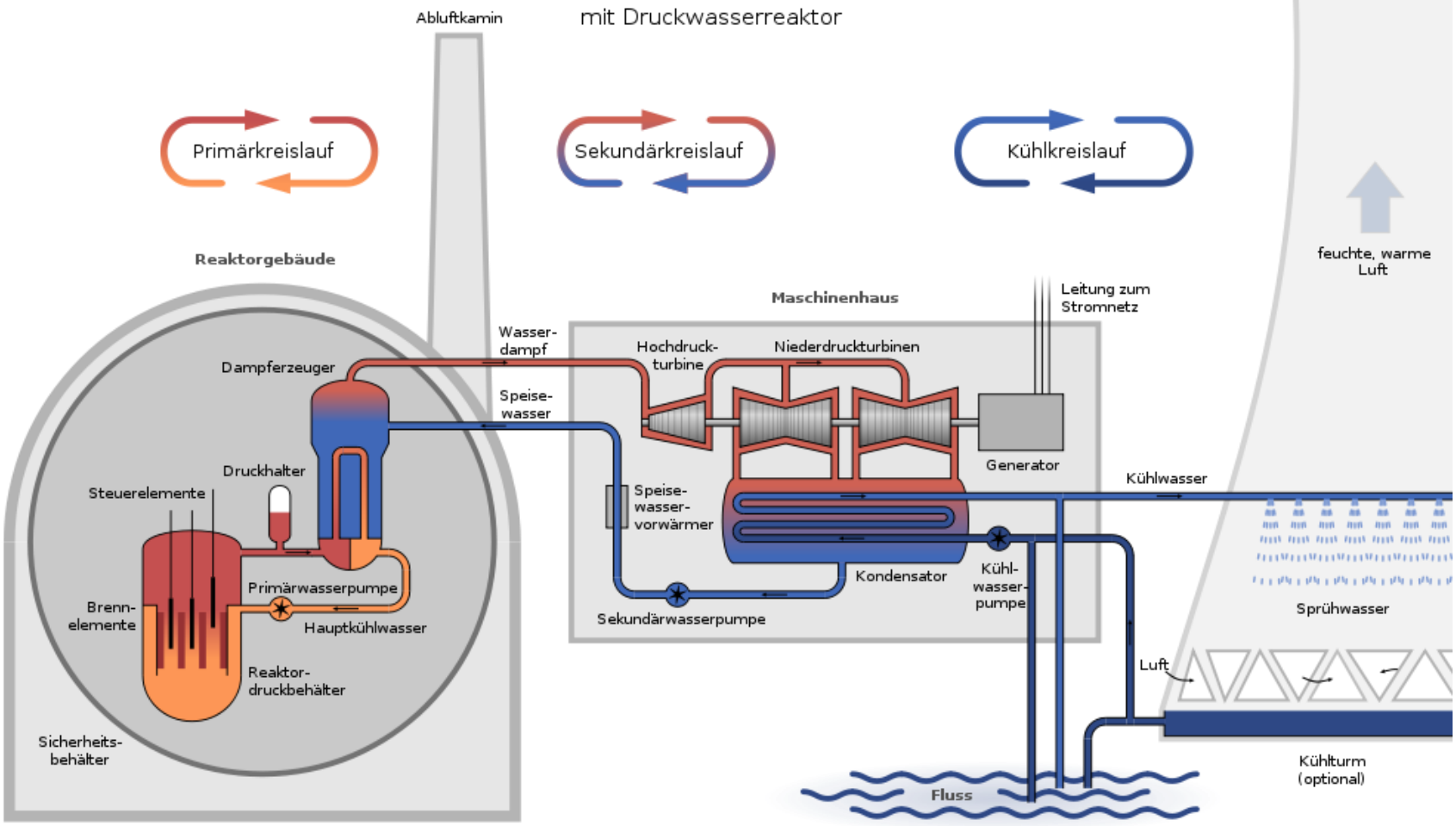


Ein **RBMK** (russ. Реактор Большой Мощности Канальный, umgeschrieben: *Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny*; etwa *Hochleistungs-Reaktor mit Kanälen*) ist ein graphitmoderierter, wassergekühlter Siedewasser-Druckröhrenreaktor sowjetischer Bauart.

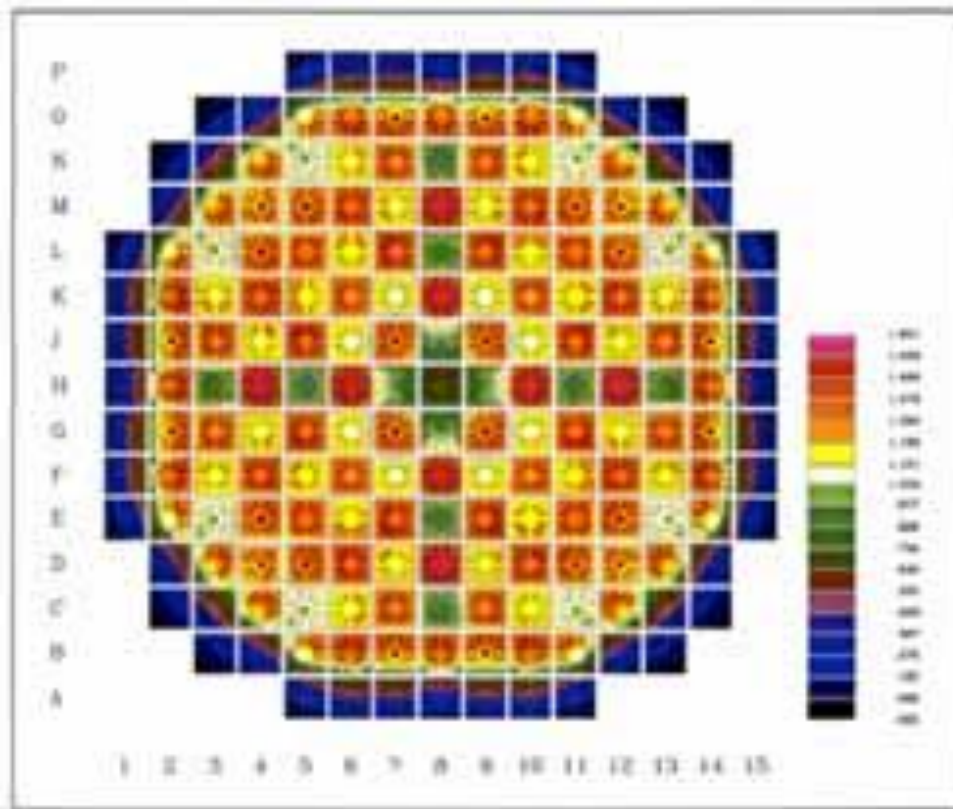
Siedewasser-Reaktor

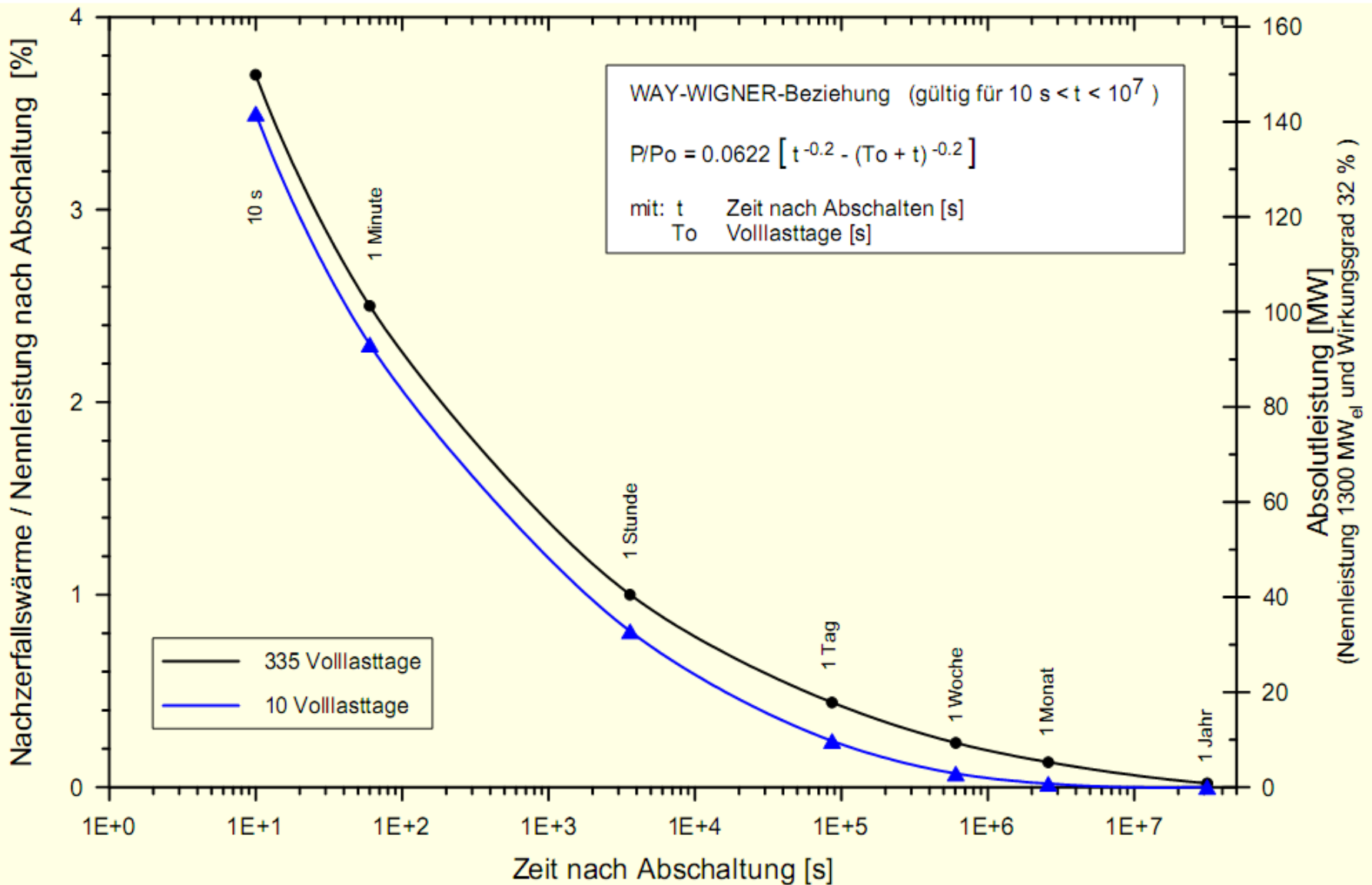


Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor



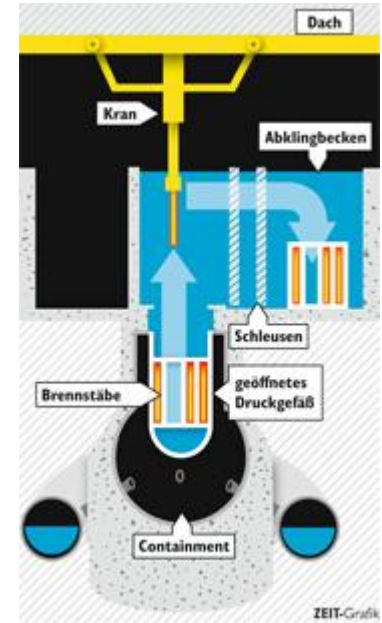
Temperaturverteilung im Reaktorkern



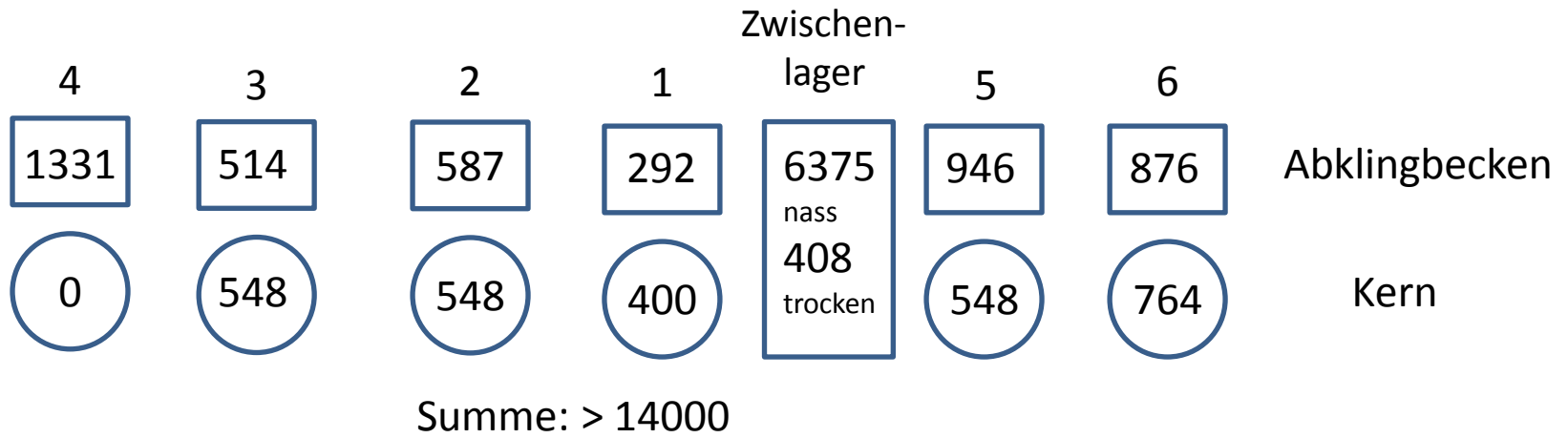


Nachzerfallswärme durch radioaktiven Zerfall von Spaltprodukten

Abklingbecken



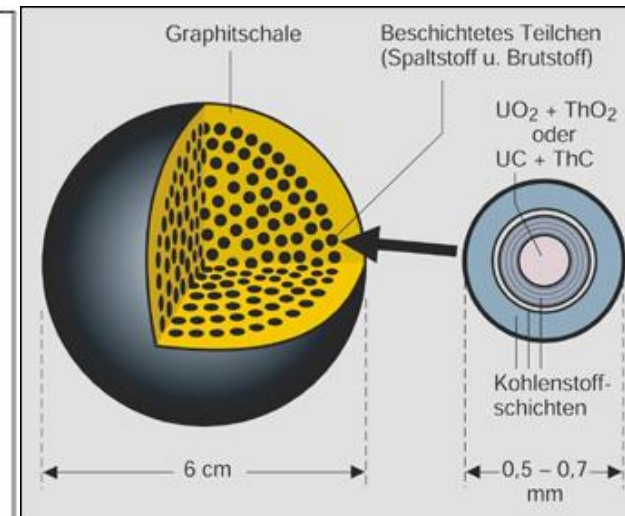
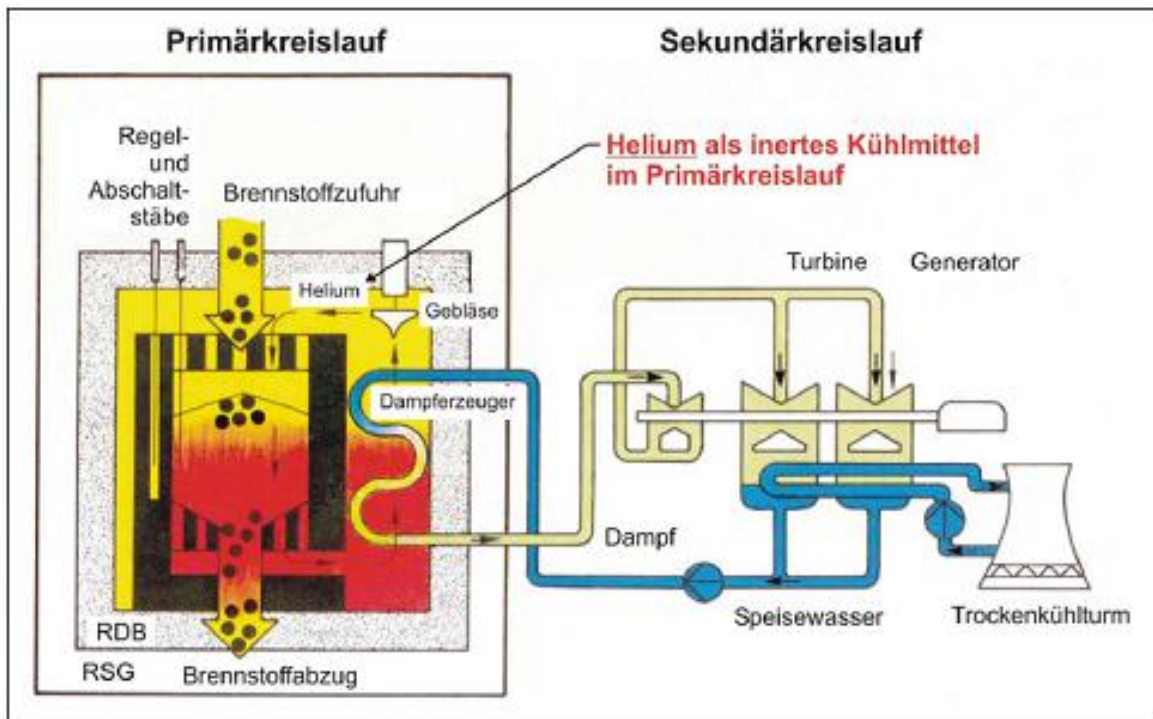
Anzahl der Brennelemente in Fukushima (Siedewasser-Reaktoren)



Allein die abgebrannten Brennstäbe im Abklingbecken des Reaktorblocks 4 setzen noch mehrere Megawatt Energie frei – so viel wie ein großes Offshore-Windrad unter Vollast

Geht es auch ohne Brennstäbe?

Ja, in einem Hoch-Temperatur-Reaktor



Größen und Einheiten der Strahlenschutzmesstechnik

Dr. Hans-Jochen Foth

Fachbereich Physik

Technische Universität Kaiserslautern

a) Energiedosis

Definition: Die **Energiedosis D** gibt an, wieviel Energie dW aus der ionisierenden Strahlung von einem Massenelement dm der bestrahlten Materie absorbiert wird

$$D = \frac{dW}{dm}$$

Homogene Materie: $dm = \rho dV$. $\rho =$ Dichte, $dV =$ Volumenelement

Einheit: 1 Gy (= 1 Gray) = 1 J/kg

Bis 1985: 1 rad (**r**adiation **a**bsorbed **d**ose) = 10^{-2} J/kg

Definition: Energiedosisleistung $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$

b) Ionendosis

Definition: Die **Ionendosis J** gibt an, wieviel elektrische Ladungen dQ (eines Vorzeichens) pro Masseneinheit dm_L in Luft unter Normalbedingung durch die Strahlung erzeugt wird

$$J = \frac{dQ}{dm_L}$$

Einheit: 1 C/kg = 1 As/kg

Bis 1985: 1 R (Röntgen) = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg

Definition: Ionendosisleistung $j = \frac{dJ}{dt}$

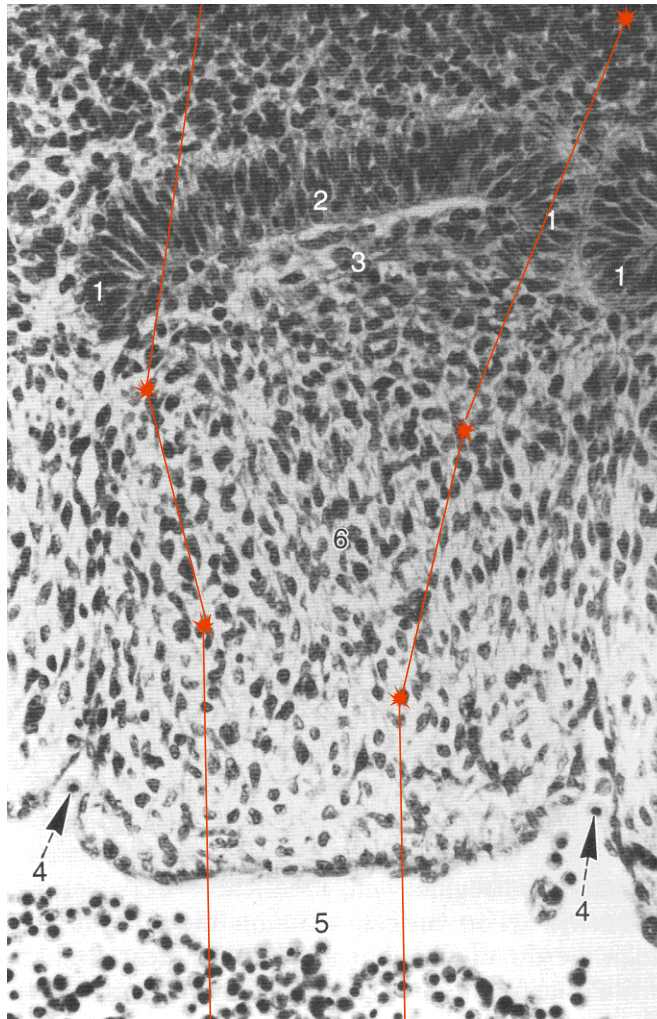
Zusammenhang zwischen Energiedosis D und Ionendosis J:

$$D = \frac{E_{\text{ion}} \cdot dQ}{e \cdot dm} = U_{\text{ion}} \cdot J$$

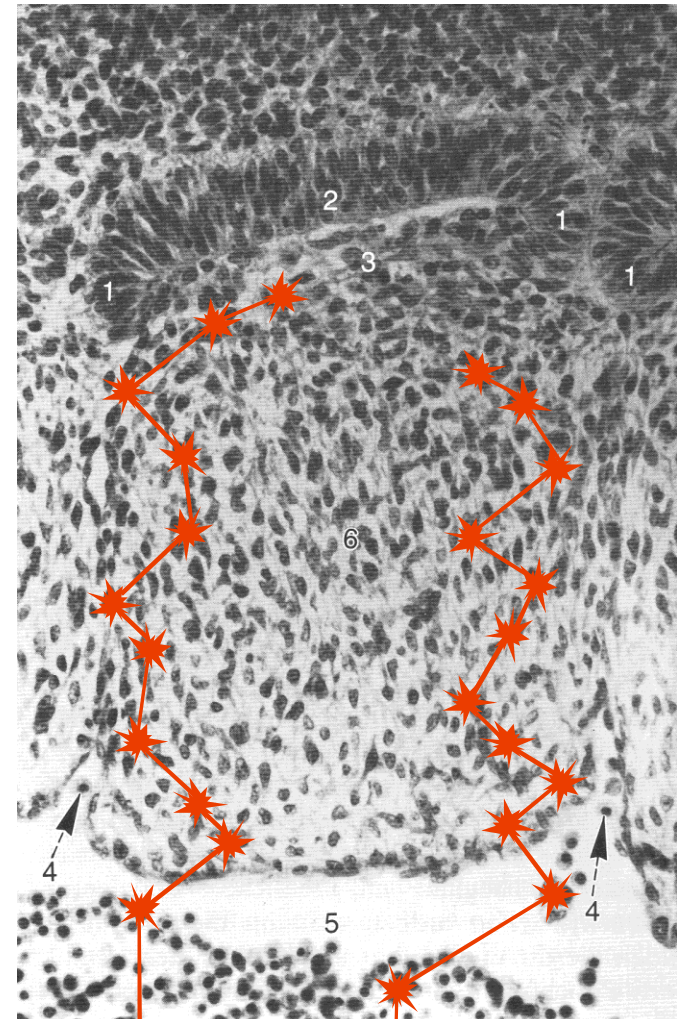
$E_{\text{ion}} =$ mittlerer Energieaufwand zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares in Normal-Luft = 33,7 eV

$U_{\text{ion}} =$ mittlere Ionisationsspannung (= 33,7 V)

Lineares Energieübertragungsvermögen (LET)



γ -Strahlung



α -Strahlung

Die biologische Wirkung ionisierender Strahlung hängt nicht nur von der Energiedosis sondern auch von der mikroskopischen Verteilung der Dosis ab.

Das lineare Energieübertragungsvermögen gibt an, wie viel Energie von direkt ionisierender Strahlung lokal auf das Medium übertragen wird.

Die Definition lautet nach DIN 6814-2 (sinngemäß):

Der **Lineare Energietransfer (LET)** geladener Teilchen in einem Medium ist der mittlere **Energieverlust dE** auf den **Weg ds**, den das Teilchen durch Stöße erleidet, bei denen der Energieverlust kleiner als eine vorgegebene Energie Δ ist:

$$\text{LET} = L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{ds} \right)_{\Delta}$$

Einheit: J/m, eV/m, eV/m, eV/ μm

L_{50} bedeutet: $D = 50 \text{ eV}$

LET (L) in Wasser und Bewertungsfaktor q nach Anhang XIV Strahlenschutzverordnung

Strahlungsart	L(keV/ μm)	q
Elektronen, Photonen	< 3,5	1
α , p, d, n (je nach Energie)	3,5 - 7,0	1 - 2
	7 - 23	2 - 5
	23 - 53	5 - 10
	53 - 175	10 - 20

c) Äquivalentdosis

Definition: Die **Äquivalentdosis** D_q ergibt sich aus Energiedosis D und dem Bewertungsfaktor (Qualitätsfaktor) q mittels

$$D_q = q D$$

Einheit: 1 Sv (Sievert) = 1 J/kg

Bis 1985: 1 rem (= 1 **r**öntgen **e**quivalent **m**an) = 10^{-2} J/kg

Definition: Äquivalentdosisleistung $\dot{D}_q = \frac{dD_q}{dt}$

Lebewesen	Energiedosis (Gy = J/kg)
Tabak-Mosaik-Virus	2000
Amöbe, Wespe	1000
Schnecke	200
Fledermaus	150
Escherichia coli B	50
Hamster	9 - 11
Kaninchen	7,5 - 8,0
Ratte	6,0
Maus	4,5 - 6,5
Rhesusaffe	5,5
Hund	4,0 - 5,5
Mensch	4,5
Schwein	3,5 - 4,5
Ziege	3,5
Meerschweinchen	2,5 - 4,0

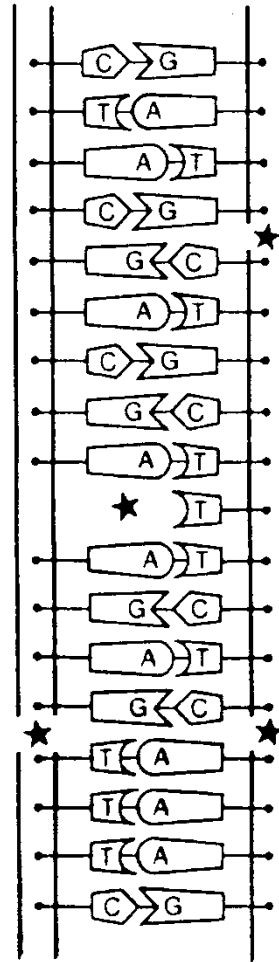
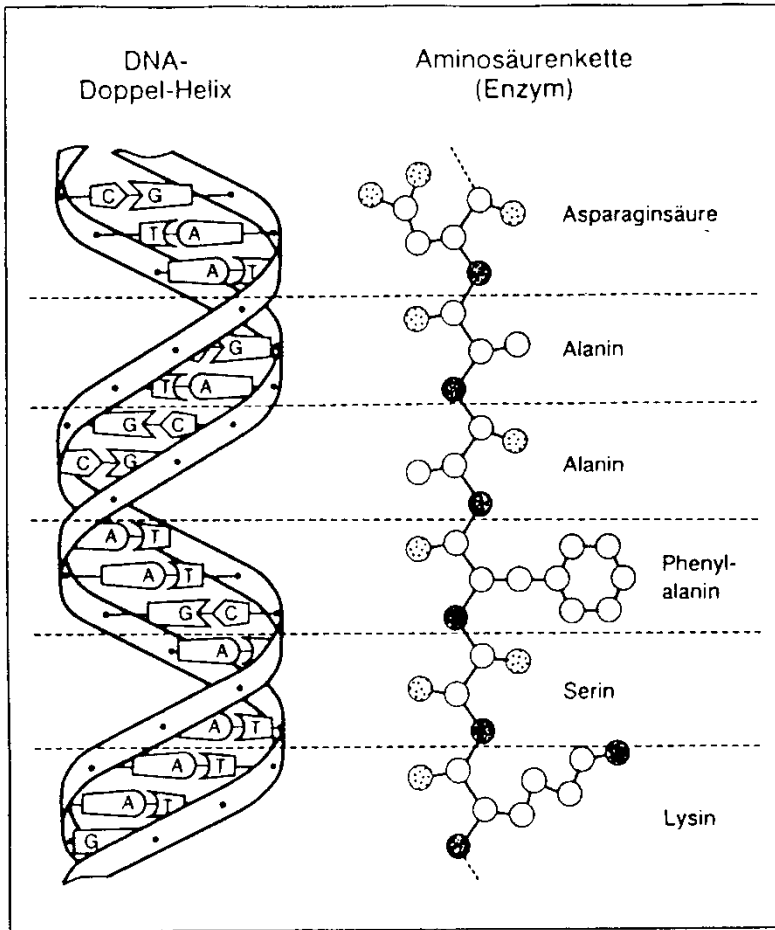
Letaldosis LD_{50/30}:

Innerhalb von 30
Tagen sterben 50%
der bestrahlten
Lebewesen

Wärmekapazität von Wasser: $c = 4,187 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$

Eine Energiezufuhr von 4,5 J/kg führt zu einer

Temperaturerhöhung von $\Delta T = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ K}$

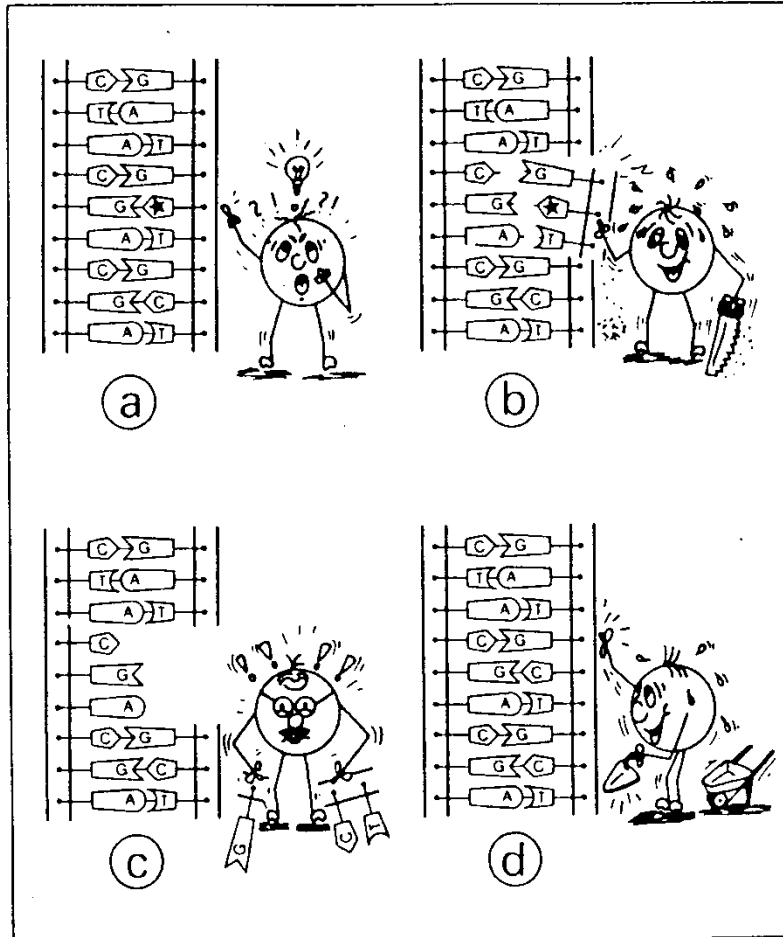


Einzelstrangbruch

Basenschaden

Doppelstrangbruch

Der Reparaturmechanismus



Einzelstrangbrüche nach γ -Bestrahlung sind nach 10 - 20 min repariert

Intakte Zellen können pro Minute ~ 300 Einzelstrangbrüche reparieren

Reparaturaktivität wird durch Strahlung (β , γ) gesteigert

Fehlerrate: ~ 1 : 10¹¹

Neues Konzept der Dosisgrößen im Strahlenschutz

Bei der biologischen Strahlenwirkung unterscheidet man u.a. zwischen stochastischer und nichtstochastischer Strahlenwirkung:

- **Stochastische** Strahlenwirkungen sind solche, bei denen die Eintrittswahrscheinlichkeit (nicht der Schweregrad) als Funktion der Dosis betrachtet wird; ein Schwellenwert existiert nicht (Beispiel: Krebsentstehung)
- **Nichtstochastische** Strahlenwirkung sind solche, bei denen der Schweregrad mit der Dosis variiert und für die ein Schwellenwert bestehen kann (Beispiel: Hautrötung, Linsentrübung)

Die neue Strahlenschutzverordnung unterscheidet bei den Dosisgrößen zwischen Körperdosen und Äquivalentdosen.

• **Körperdosen** (Organdosis, effektive Organdosis) sind Schutzgrößen, für die z.B. personenbezogenen Jahresgrenzwerte festgelegt sind. Diese Dosen berechnen sich aus der Energiedosis mit Hilfe des Strahlungs-Wichtungsfaktors w_R .

• **Äquivalentdosen** sind Messgrößen (operative Größen) in der Orts- und Personendosimetrie. Sie werden aus der Energiedosis mit Hilfe des Qualitätsfaktors Q berechnet.

Risikogewebe sind diejenigen Organe oder Gewebe, deren Strahlenrisiken für die Begrenzung der Strahlenexposition von innen oder außen in Betracht gezogen werden müssen.

Als **Risikoeffizient** (oder Risikofaktor) r_T für die Krebserkrankung eines Organs oder Gewebes T bezeichnet man den Quotienten aus Strahlenrisiko p_T durch die Äquivalentdosis H_T

$$r_T = p_T/H_T$$

Mit $R = \sum_T r_T$ wird das stochastische Gesamtrisiko berechnet.

Der **Wichtungsfaktor** w_T der einzelnen Organe oder Gewebe ergibt sich dann zu $w_T = r_T/R$.

Um die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, dass die Bestrahlung eines Organs T mit einer niedrigen Dosis H_T Todesursache wird, gibt die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) Risiko-Koeffizienten r_T (in 10^{-4} pro Sievert) an, mit denen die Äquivalent-Dosis zu multiplizieren ist.

Gewebe oder Organ	r_T (ICRP 1977)	r_T (ICRP 1991)	w_T
Keimdrüsen (Eierstöcke)	-	10	0,20
Knochenmark (rot)	20	50	0,12
Dickdarm	-	85	0,12
Lungen	20	85	0,12
Magen	-	110	0,12
Blase	-	30	0,05
Brust	25	20	0,05
Leber	-	15	0,05
Speiseröhre	-	30	0,05
Schilddrüse	5	8	0,05
Haut	-	2	0,01
Knochenoberfläche	5	5	0,01
übrige Organe	50	50	0,05
Summe	125	500	1,00

Körperdosis

Die **Ganzkörperdosis** H_G ist der Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel bei einer als homogen angesehenen Strahlenexposition des Körpers.

Die **Teilkörperdosis** H_T ist der Mittelwert der Äquivalentdosis in einem Körperteil, in einem Organ oder Teil eines Organs, im Fall der Haut der über die bestrahlte Fläche gebildete Mittelwert.

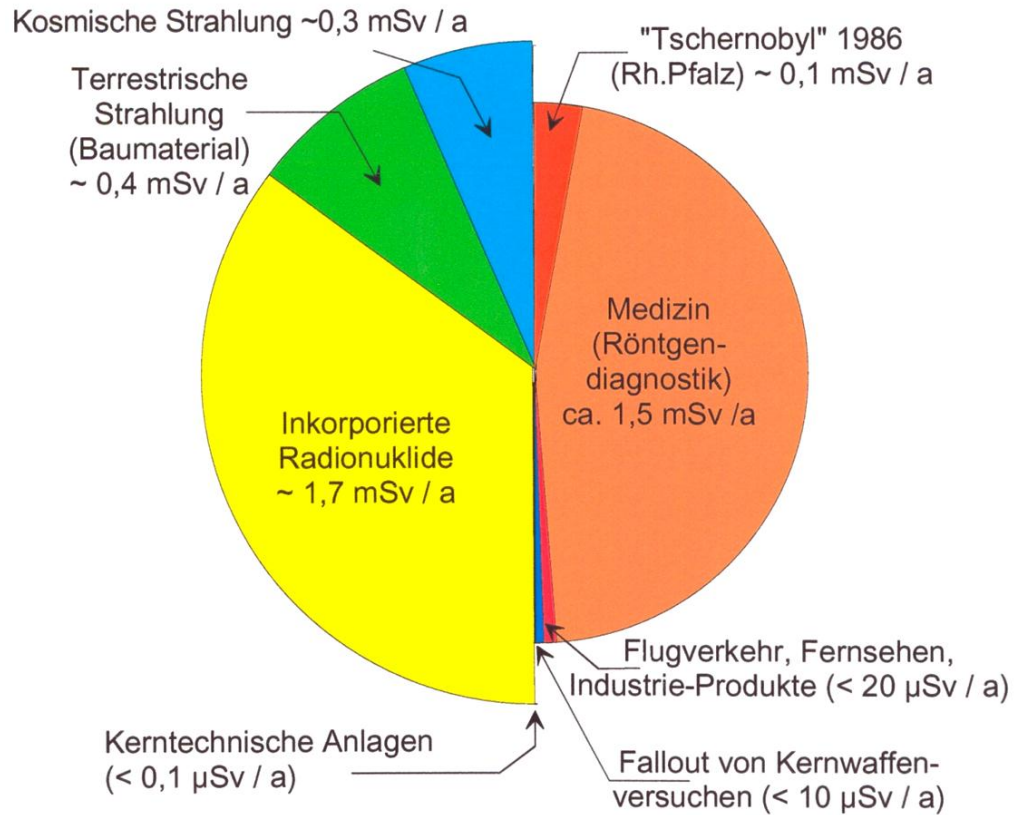
Die **effektive Folgedosis** E ist die gewichtete Summe aller Teilkörperdosen H_T , sie wird häufig auch nur **effektive Dosis** oder **effektive Strahlendosis** genannt.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

Effektive (Äquivalent-) Dosis

natürlich
2,37 mSv / a

zivilisatorisch
1,6 mSv / a



Personen-Dosis-Grenzwerte und StrlSch-Bereiche

Beruflich strahlenexponierte Personen

*Personen, die im Rahmen ihrer Berufsausübung einer Strahlenexposition von mehr als 1 mSv/a unterliegen (neue StrlSchV: durch **natürliche** oder zivilisatorisch bedingte Exposition) sind als „beruflich strahlenexponierte Personen“ einzustufen und unterliegen bestimmten Überwachungs- und Einstellungsbedingungen*

Jahres-Grenzwerte der Körperdosis für beruflich strahlenexponierte Personen:

Kategorie A: 20 mSv (bzw. entsprechende Teilkörperdosen)

Kategorie B: 6 mSv (bzw. entsprechende Teilkörperdosen)

Strahlenschutzbereiche

Allgemeines Staatsgebiet $< 1 \text{ mSv/a}$

$1 \text{ mSv/a} < \text{Überwachungsbereich} < 6 \text{ mSv/a}$

$6 \text{ mSv/a} < \text{Kontrollbereich} < 3 \text{ mSv/h}$

Sperrbereich
 $> 3 \text{ mSv/h}$

Art der Belastung	Dosis/Dosisleistung
Zahnröntgenaufnahme	10 μ Sv
Flug Frankfurt – New York	30 μ Sv
Thorax-Röntgenaufnahme	100 μ Sv
Grenzwert Bevölkerung	300 μ Sv/a
Normaler Raucher	500 μ Sv/a
Mammographie	500 μ Sv
Schilddrüsenszintigraphie	800 μ Sv
Grenzwert Überwachungsbereich	1 mSv/a
Starker Raucher	1 mSv/a
Natürliche Strahlenbelastung	2,3 mSv/a
Grenzwert strahlenexponierter Personen (Kat B)	6 mSv/a
Positronen-Emissions-Tomographie	8 mSv
Computertomographie Brustraum	10 mSv
Grenzwert strahlenexponierter Personen (Kat A)	20 mSv/a
Störfall Grenzwert	50 mSv
Feuerwehreinsatz bei Personenschäden (einmal im Leben)	250 mSv
Maximale Lebensdosis für strahlenexponierte Personen	400 mSv
Letale Dosis	4 000 mSv
Lokale Krebsbehandlung	60 000 mSv

In Fukushima: Dosisleistung bis zu 1000 mSv/h !

Literaturstellen:

- Römpp online, Thieme-Verlag
- http://www.tu-dresden.de/mw/iet/KET/Kurs_Reaktorphysik/Skript-Reaktorphysik.pdf
- http://www.tuev-sued.de/anlagen_bau_industrietechnik/technikfelder/kerntechnische_anlagen
- http://webuser.hs-furtwangen.de/~neutron/download/lehre/reactor/01_Reaktorphysik_Reaktorsteuerung_%2015_%2001_%2011.pdf
- *Claus Grupen, Grundkurs Strahlenschutz, Berlin: Springer 2008*