

Bindungsenergie

$$B / A = (Zm_p + Nm_n - m(A, Z)) / A$$

$m(A, Z)$ = Kernmasse

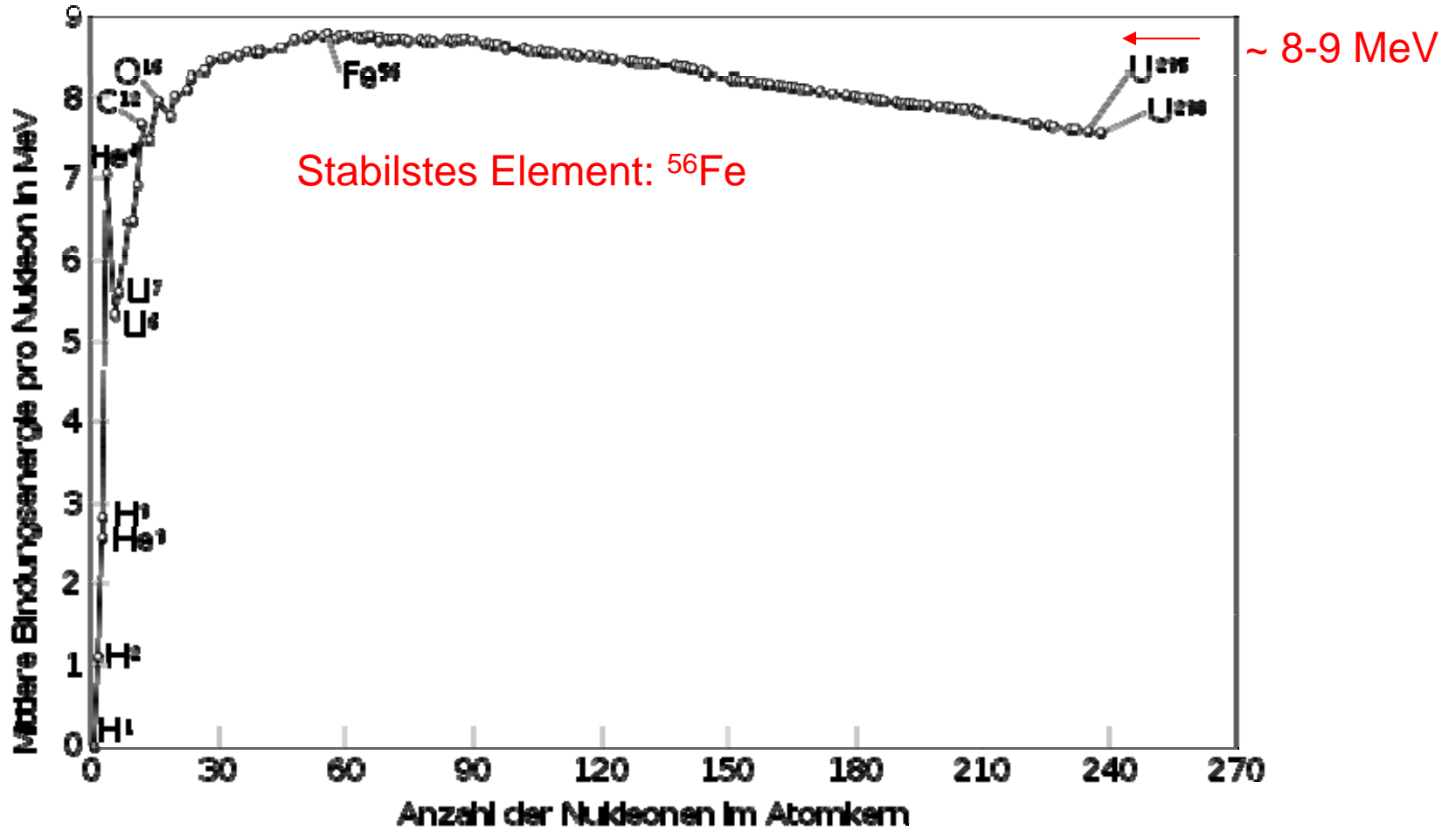


Fig-TP-7.1

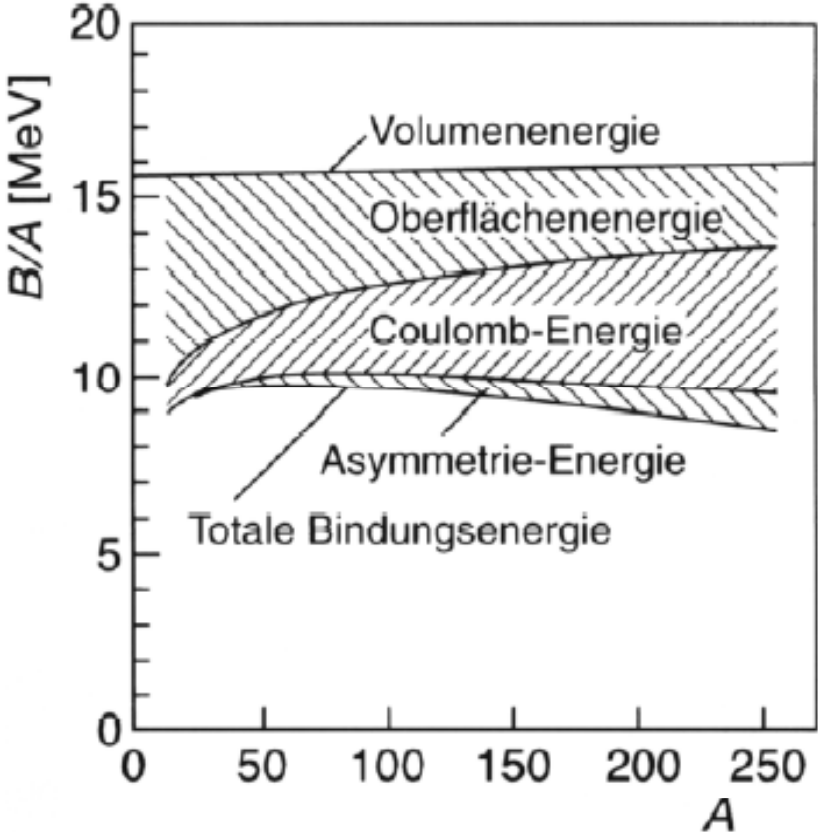
Bethe-Weizsäcker Formel:

$$B = a_V A - a_O A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{Asym} \frac{(N - Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$a_V \approx 15.7 \text{ MeV}$
 $a_O \approx 17.2 \text{ MeV}$
 $a_C \approx 0.7 \text{ MeV}$
 $a_{Asym} \approx 22.5 \text{ MeV}$

s.a.
Povh

$\delta = \begin{cases} + 11.2 \text{ MeV} & \text{gg - Kerne} \\ 0 \text{ MeV} & \text{ug - Kerne} \\ - 11.2 \text{ MeV} & \text{uu - Kerne} \end{cases}$

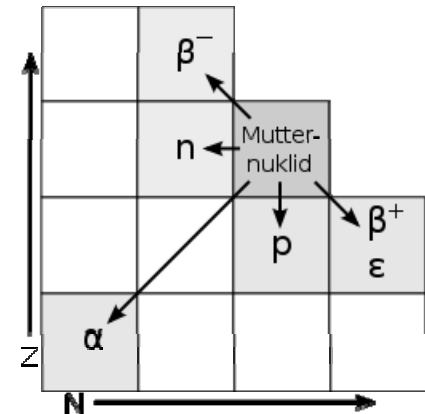
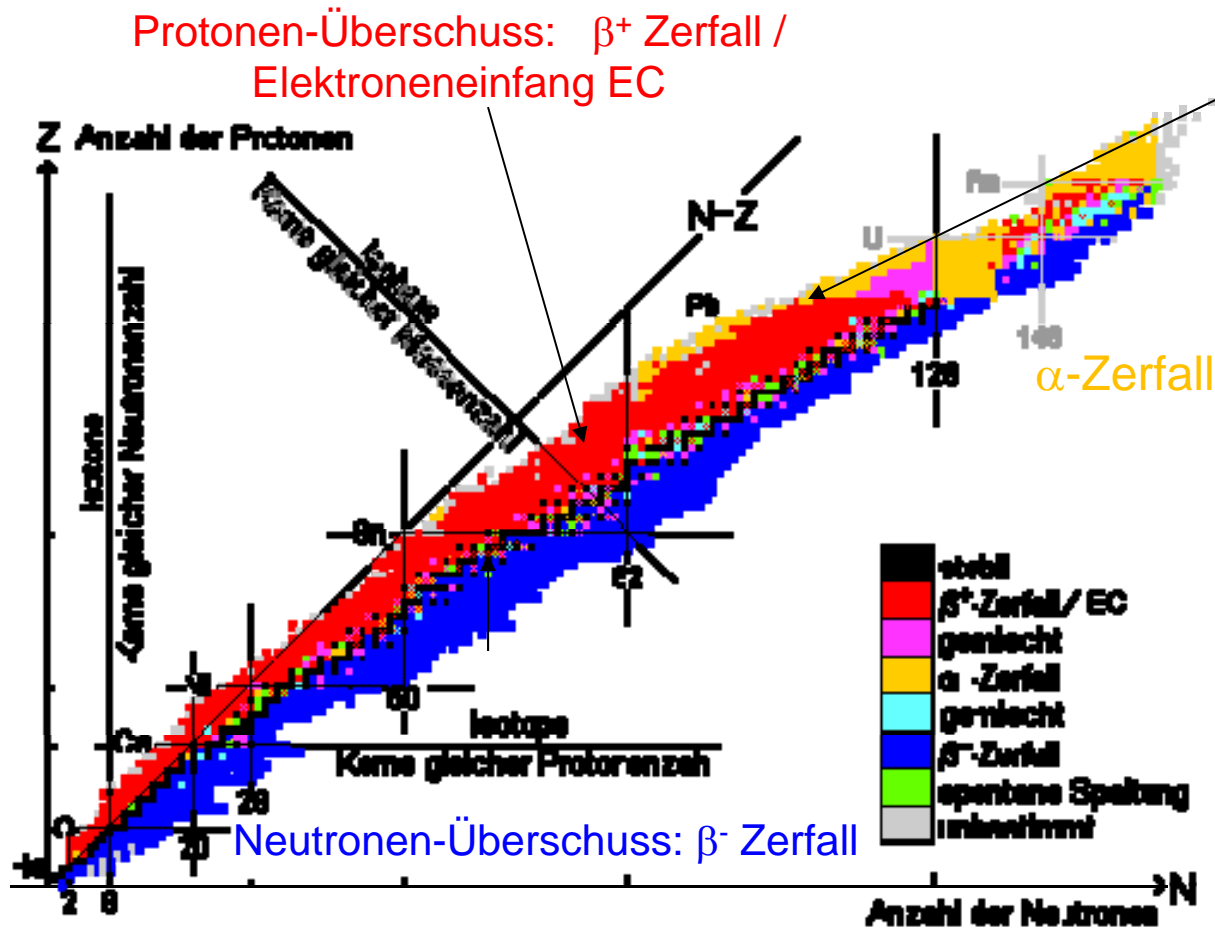


Erlaubt die Berechnung des Q-Wertes von radioaktiven Zerfällen / Spaltungs- und Fusions-Prozessen

Stabile und instabile Nuklide

Fig-TP-7.3

Stabile Kerne (schwarz) beschränken sich auf schmales Band in N-Z Ebene.

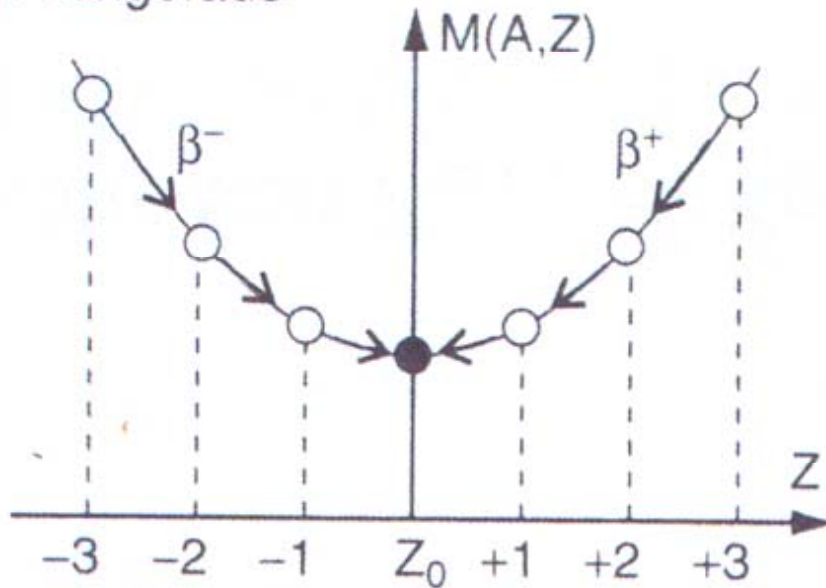


Zur Überwindung der Coulomb-Abstoßung werden bei schweren Kernen mehr Neutronen eingebaut.

Kerne mit $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ (magische Zahlen) sind sehr stabil und kommen besonders häufig vor.

Fig-TP-7.4

a) A ungerade

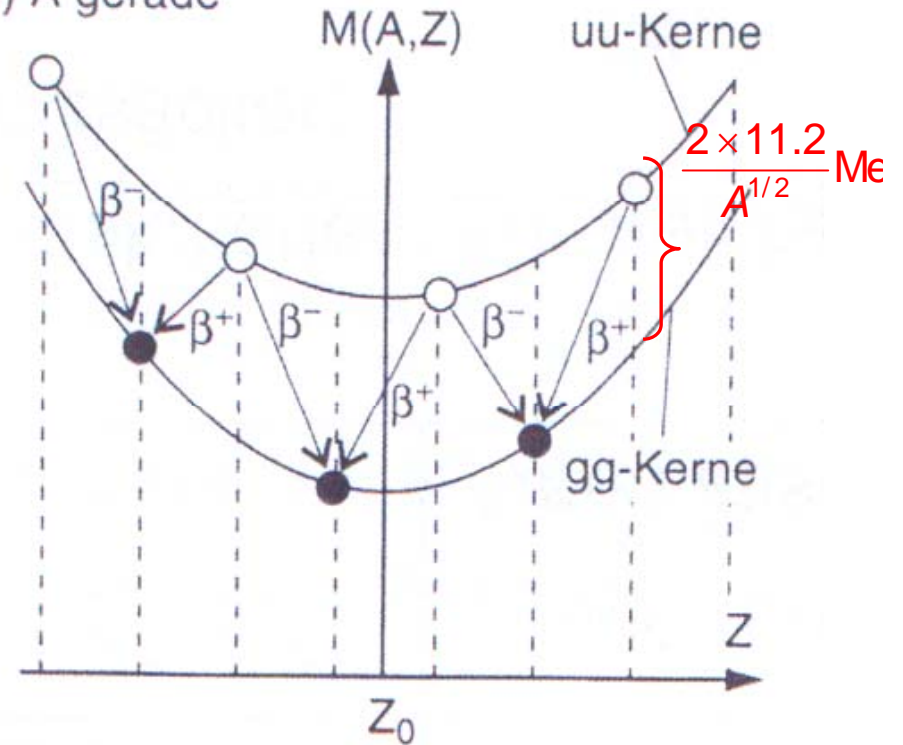


ug/gu Kerne:

In der Regel nur ein stabiles Isobar

Fig-TP-7.5

b) A gerade



Für $Z > 7$:

keine stabile **uu** Kerne,
 mindestens 2 stabile **gg** Kerne

Doppelter Beta-Zerfall ($gg \rightarrow gg$)
 prinzipiell möglich: stark unterdrückt

Geiger-Nuttall Regel

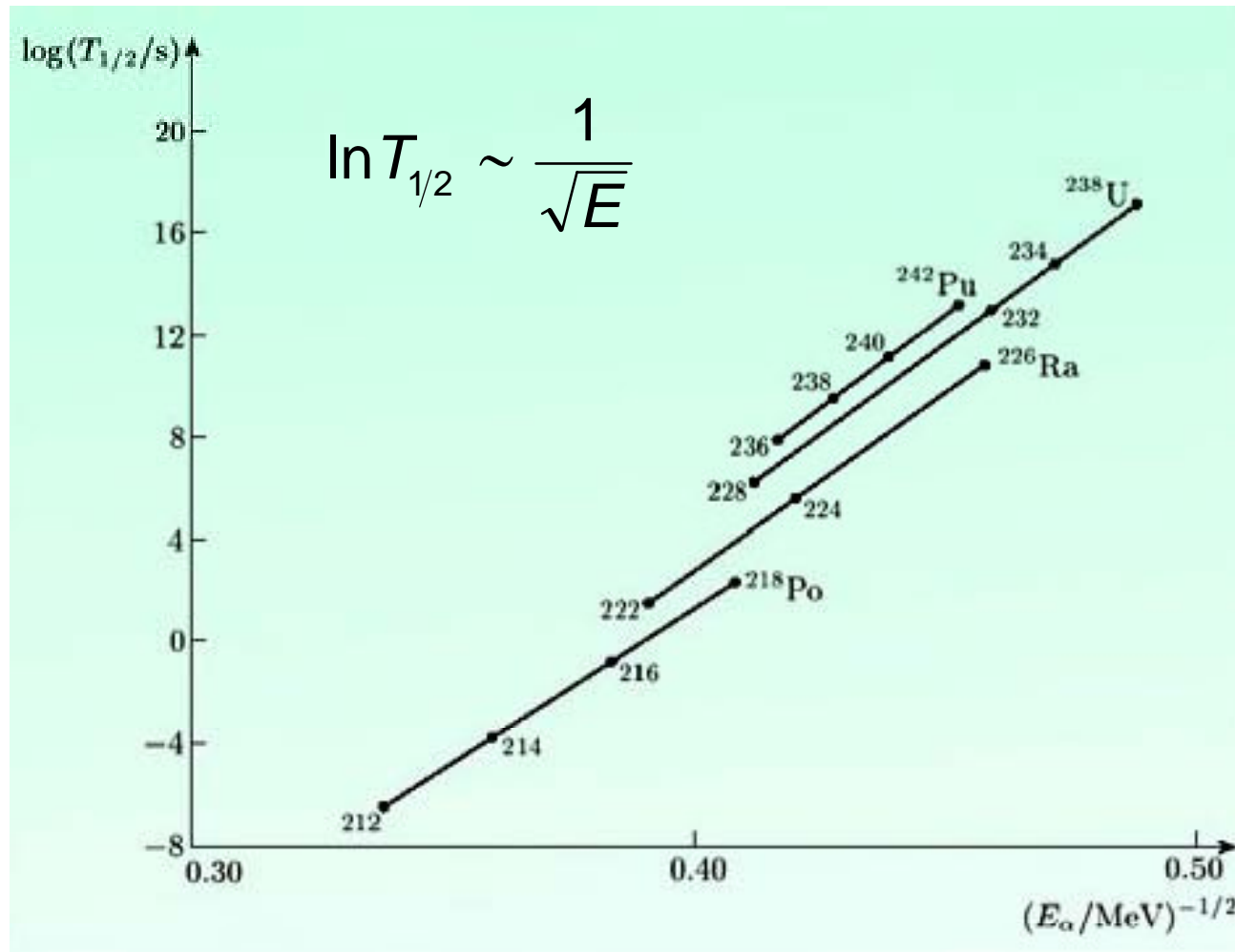
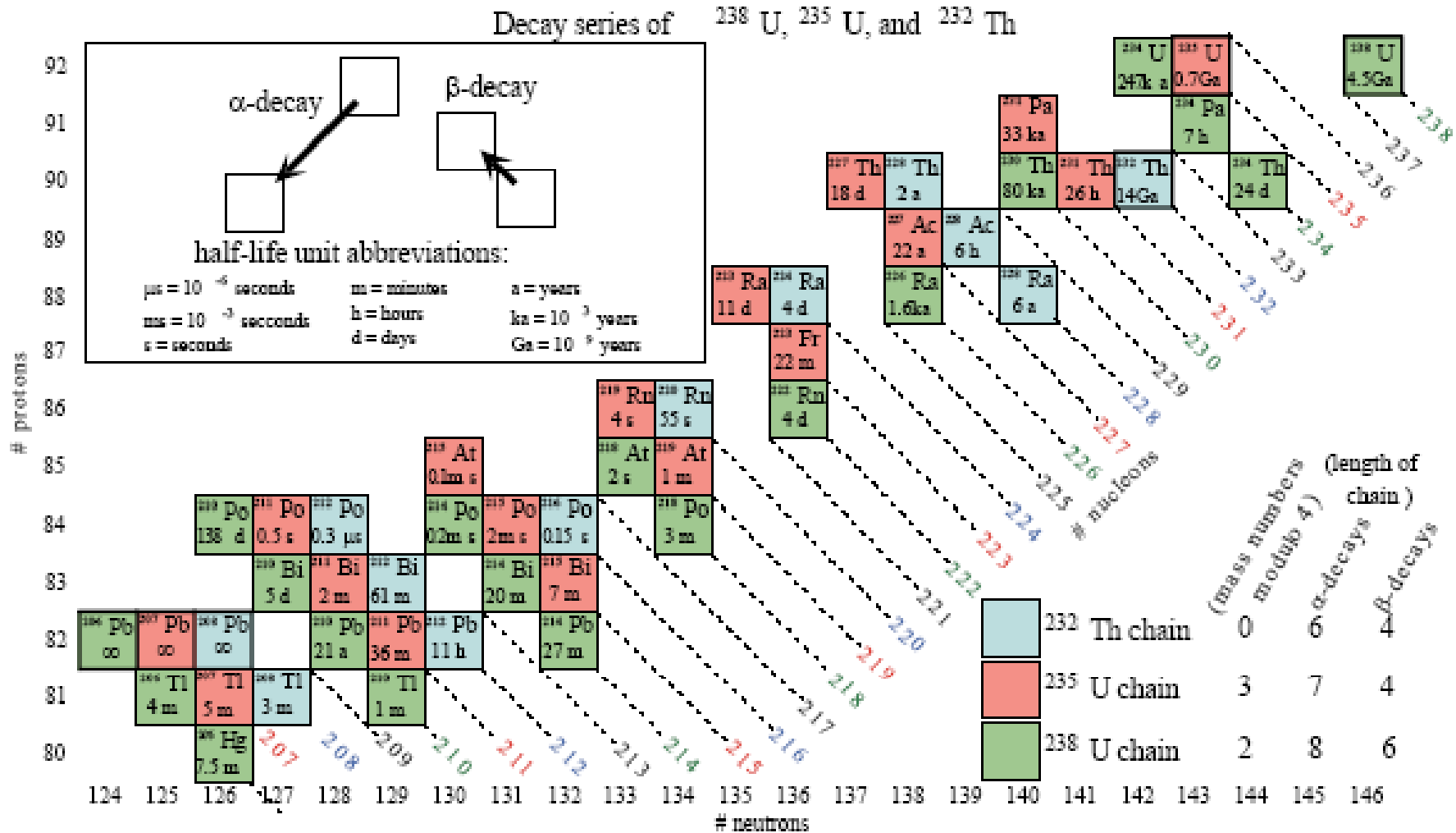


Fig-TP-7.6

Radioaktive Zerfallsreihen

Fig-TP-7.7

4n+2 4n+3 4n



Die 4. Zerfallsreihe = Neptunium-237 (a. Plutonium 241) → Thallium-205
 kommt in der Natur nicht mehr vor (bereits vollständig zerfallen)

4n+1

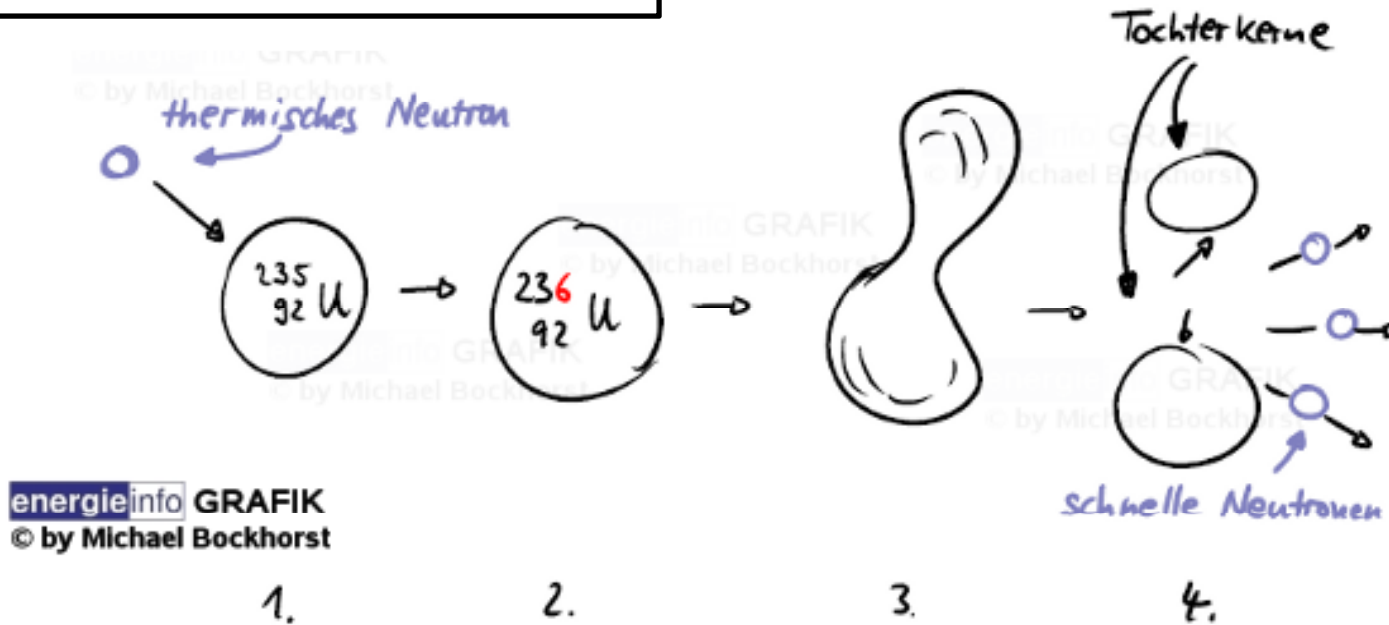
Kernspaltung

Fig-TP-7.8a

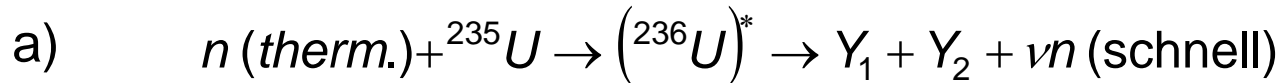
Spontane Spaltung



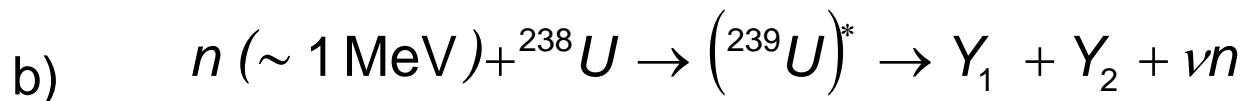
Induzierte Spaltung von ^{235}U



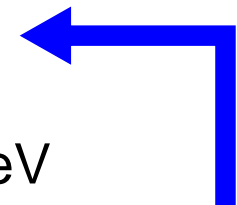
ii) Stoßinduzierte Spaltung



$$E_B = m({}^{235}\text{U}) + m_n - m({}^{236}\text{U}) = 6.4 \text{ MeV} > \Delta E_{\text{Spalt}} \approx 5.8 \text{ MeV}$$



$$E_B = m({}^{238}\text{U}) + m_n - m({}^{239}\text{U}) = 4.8 \text{ MeV} < \Delta E_{\text{Spalt}} \approx 6.4 \text{ MeV}$$

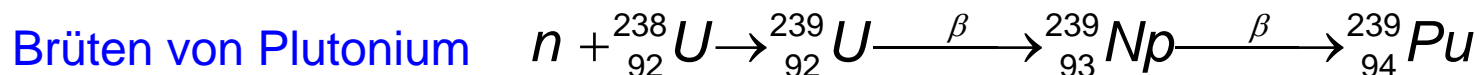


Bei genügend hoher Neutron-Energie ist gelegentliche Spaltung von ${}^{238}\text{U}$ möglich.

Warum kann man ${}^{235}\text{U}$ bereits mit thermischen Neutronen spalten?

a) ug → gg : Paarungsenergie wird als zusätzliche Energie frei

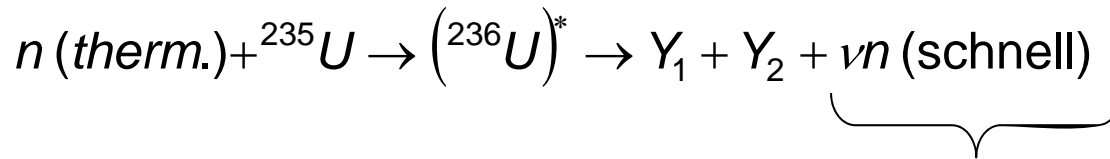
b) gg → ug : Paarungsenergie wird zusätzlich benötigt



Kernspaltung und Kernkraftwerke (KKW)

Fig-TP-7.8

Kettenreaktion nur mit thermischen Neutronen und Spaltung von ^{235}U möglich



Im Mittel 2.3 Neutronen (schnell)

Neben direkten Neutronen entstehen auch verzögerte (1ms ... 1min) Neutronen (~1%) die für Steuerung eines Reaktors wichtig sind.

Energiebilanz bei Spaltung

E_{kin} der Spaltfragmente	167	±	5 MeV
E_{kin} aller Spaltneutronen	5	±	0.2 MeV
prompte γ -Strahlung	8	±	1.5 MeV
verzögerte γ -Strahlung	6	±	1 MeV
E_{kin} der e^- aus dem β -Zerfall	6	±	1 MeV
E_{kin} der $\bar{\nu}_e$ aus dem β -Zerfall	12	±	2.5 MeV
Summe Q	204	±	6 MeV

Nutzbare Energie

$$Q - E_{kin}(\nu) = 192 \text{ MeV}$$



$$1\text{g U} \equiv 2.55 \text{ MWh}$$

Nachwärme: anfänglich bis zu 10% der Leistung. Aufgrund radioaktiver Zerf.

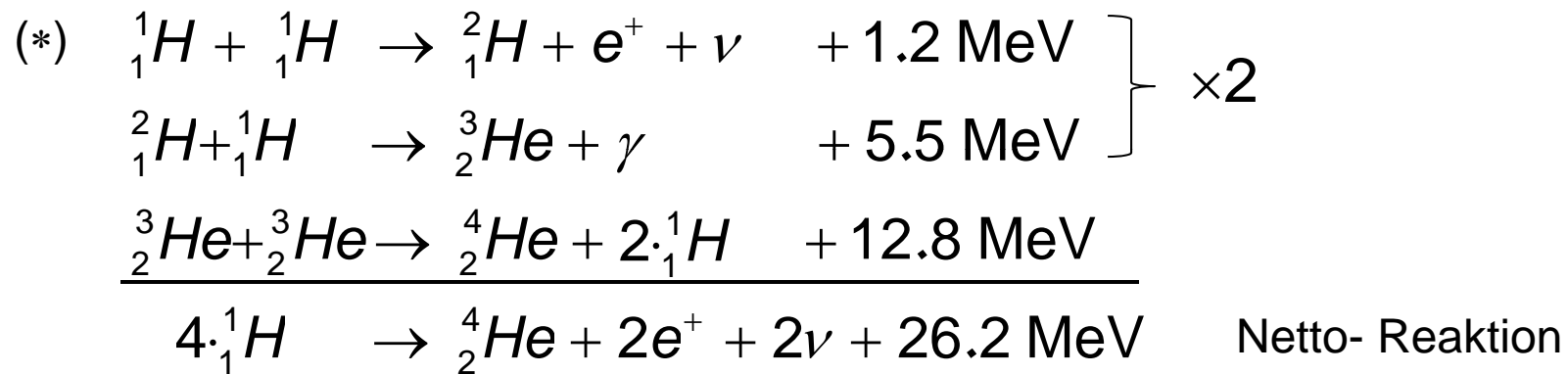
Kritische Masse:

Falls Masse des Urans hoch genug ist, können die freigesetzten 2.5 Neutronen wieder absorbiert werden und bewirken selbst wieder eine Spaltung. Es kommt dann zu einer unkontrollierten Kettenreaktion. **Kritische Masse m_{Krit} (^{235}U) ≈ 49 kg**

d) Fusionsreaktion

Für leichte Kerne mit $A < 56$ wird bei der Fusion der Kerne Energie frei.

⇒ Wasserstoff-Fusionsreaktion in der Sonne (pp-Zyklus):



Die Reaktion (*) nutzt den schwachen Prozess $p \rightarrow n + e^+ + \nu$
 Und hat deshalb einen sehr kleinen Wirkungsquerschnitt was der Sonne eine lange Lebensdauer gibt. **Leistungsdichte moderat: $\epsilon \approx 300 \text{ W/m}^3$**

Zur technischen Realisierung der Fusion auf der Erde nutzt man starke Prozesse:

