

# Experimentalphysik IV

Moleküle, Kerne, Teilchen, Festkörper

Silke Ospelkaus(IQO)



Clemens Walther(IRS)

Michael Oestreich(IFP)

SS 2016

Stunde 02 - Tröpfchenmodell

05.04.2016	Aufbau der Kerne	CW
07.04.2016	keine Veranstaltung	
12.04.2016	Tröpfchenmodell	CW
14.04.2016	alpha Zerfall	CW
19.04.2016	beta Zerfall	CW
21.04.2016	gamma Zerfall	CW
26.04.2016	Schalenmodell	CW
28.04.2016	Neutronen	CW
03.05.2016	Kernreaktionen und Fusion	CW
05.05.2016	Himmelfahrt	
10.05.2016	Molekülphysik 1	SO
12.05.2016	Molekülphysik 2	SO
17.05.2016	Pfingsten	
19.05.2016	Pfingsten	

24.05.2016	Molekülphysik 3		SO
26.05.2016	Molekülphysik 4		SO
31.05.2016	Molekülphysik 5		SO
02.06.2016	Molekülphysik 6		SO
07.06.2016	Molekülphysik 7		SO
09.06.2016	Molekülphysik 8		SO
14.06.2016	Festkörperphysik 1		MÖ
16.06.2016	Festkörperphysik 2		MÖ
21.06.2016	Festkörperphysik 3		MÖ
23.06.2016	Festkörperphysik 4		MÖ
28.06.2016	Festkörperphysik 5		MÖ
30.06.2016	Festkörperphysik 6		MÖ
05.07.2016	Festkörperphysik 7		MÖ
07.07.2016	Festkörperphysik 8		MÖ

## Willkommen am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS)



Das Institut für Radioökologie und Strahlenschutz im Campus Herrenhausen (Gebäude 4113)

Willkommen auf den Seiten des IRS. Wir befassen uns mit Detektion und Speziation von

### Clouds

anmeldung endlager **entria**  
entsorgungsoptionen exkursionen  
forschungssemester hannover institut  
irs masterarbeit praktika promotion  
radiation radon seminar  
strahlenschutzkurse strahlung  
universität unterweisung vorlesung

### Aktuelles

Bundesverdienstkreuz für Prof.  
Dr. Rolf Michel  
Für ihre langjährigen Verdienste  
um den Strahlenschutz erhielten

Fragen:

Organisatorisch :

iwannek@irs.uni-hannover.de

Fachlich:

[walther@irs.uni-hannover.de](mailto:walther@irs.uni-hannover.de)

Übungen: Georg Leuteritz [Georg.Leuteritz@web.de](mailto:Georg.Leuteritz@web.de)

Anmeldung für Studierende



Veranstaltungen

Praktika

Die Vorbesprechung für das Praktikum findet am 12.10.2015 um 11:30 Uhr im  
Seminarraum des Institutes für Biophysik statt. (4134 - 101)





■ **War das Tempo letzte Woche**

**A.** zu schnell

**B.** gerade richtig

**C.** zu langsam

## SMART Response Question

To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...





■ Ist die Anzahl von Klickerfragen

A. zu hoch

B. gerade richtig

C. zu niedrig



## SMART Response Question

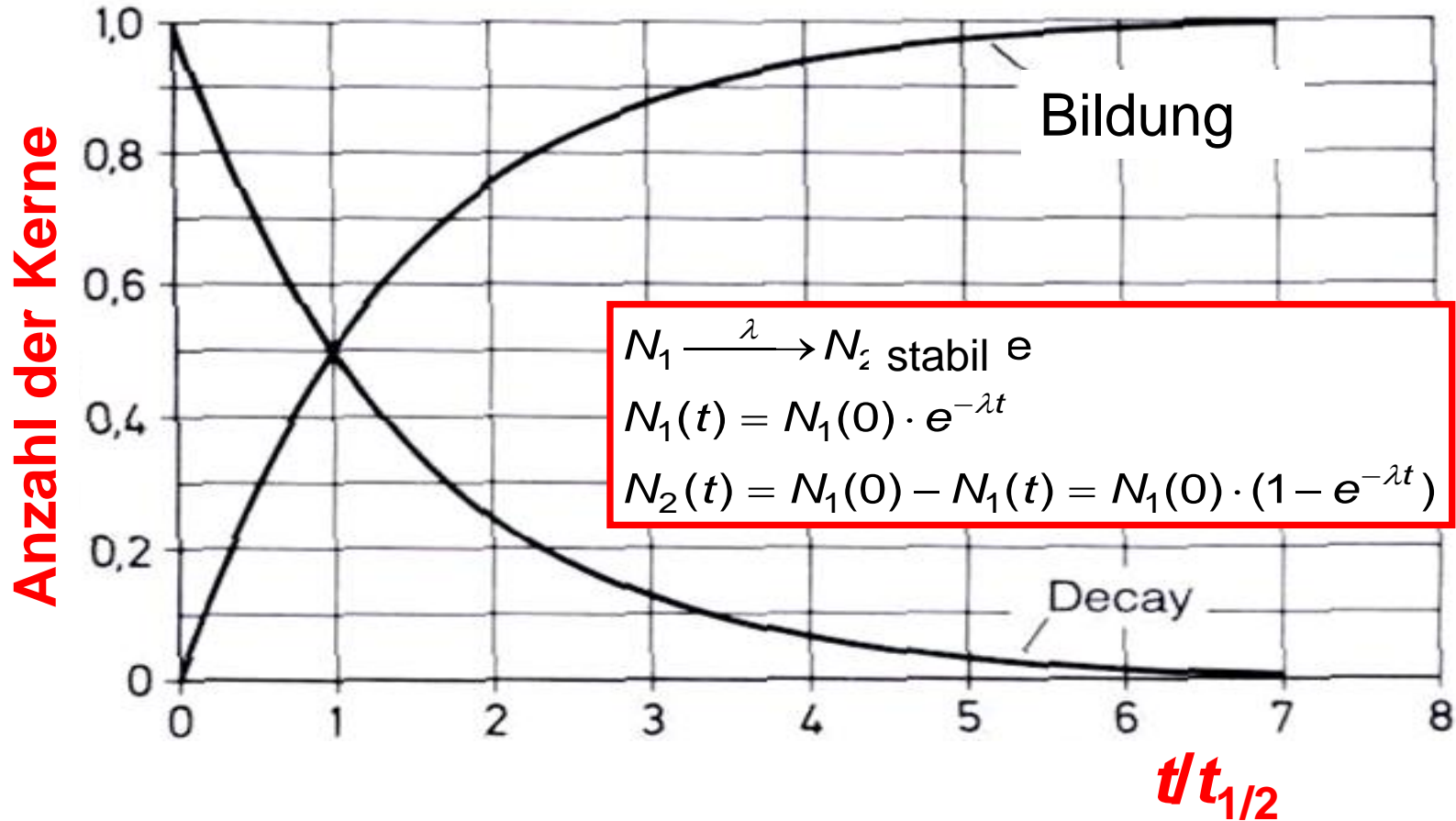
To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...



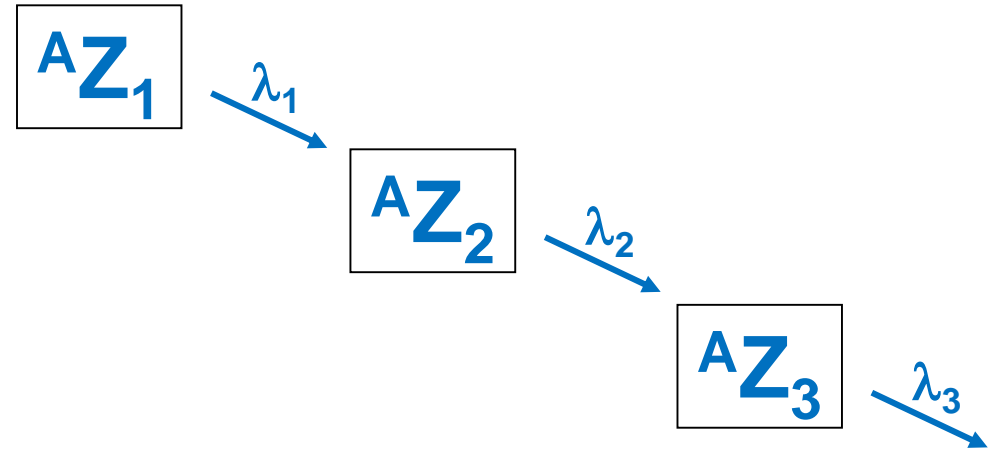








## Radioaktive Zerfallskette:



$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 \cdot N_2 - \lambda_3 \cdot N_3$$

....

$N_i$

$\lambda_i$

$t$

Anzahl der Kerne i  
Zerfallskonstante des Kerns i  
Zeit

Siehe Übungsaufgaben



$\alpha$ - Zerfall

$$Z, A \longrightarrow Z - 2, A - 4$$

$\beta$ - Zerfall

$$Z \longrightarrow Z \pm 1, A = \text{const.}$$

$\gamma$ - Zerfall

$$Z = \text{const.}, A = \text{const.}$$

Spontanspaltung

seltene Zerfälle:

doppelter  $\beta$ -Zerfall

$$Z \longrightarrow Z \pm 2, A = \text{const.}$$

$^{12}\text{C}$  Zerfall, ...

Nur von angeregten Zuständen fern der Stabilität:

n-Emission

p-Emission

# KARLSRUHER NUKLIDKARTE

CHART OF THE NUCLIDES, 6<sup>th</sup> Edition 1995, revised reprint 1998

TABLEAU DES NUCLIDES, 6<sup>ème</sup> Edition 1995, réimpression révisée 1998

TABLA DE NUCLIDOS, 6<sup>a</sup> Edición 1995, reimpresión revisada 1998.

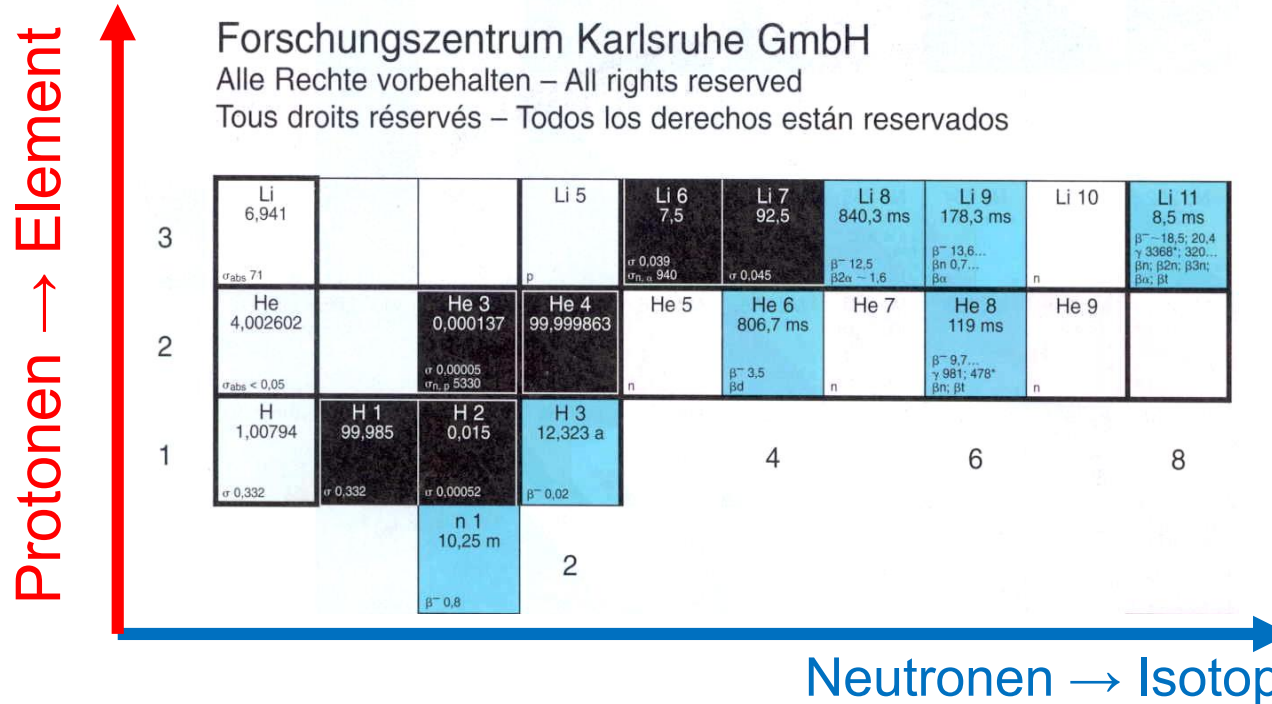
G. Pfennig, H. Klewe-Nebenius, W. Seelmann-Eggebert †

Institut für Instrumentelle Analytik (bis 1995 Institut für Radiochemie)

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Alle Rechte vorbehalten – All rights reserved

Tous droits réservés – Todos los derechos están reservados



## Arrangement of Symbols and Data

### Elements

symbol of the element  
standard atomic weight based on  $^{12}\text{C} = 12$

absorption cross section for thermal neutrons (b)

<p><b>Cd</b> 112,41</p> <p><math>\sigma</math> 2450</p>
---

## Anordnung der Symbole und Daten

### Elemente

Elementsymbol  
Standard-Atomgewicht bezogen auf  $^{12}\text{C} = 12$

Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen (b)

### Stable Nuclides

symbol of the element, number of nucleons  
abundance in naturally occurring element (atom %)

(n,  $\gamma$ )-cross sections for the formation of the metastable and the ground state of  $^{127}\text{Te}$  by thermal neutrons (b)

<p><b>Te 126</b> 18,95</p> <p><math>\sigma</math> 0,135+0,90</p>
--

### Stabile Nuklide

Elementsymbol und Nukleonenzahl  
Häufigkeit im natürlichen Element (Atom %)

(n,  $\gamma$ )-Querschnitt für die Bildung des metastabilen und des Grundzustandes des  $^{127}\text{Te}$  mit thermischen Neutronen (b)

symbol of the element, number of nucleons  
left hand side: half-life of metastable state;  
 $\gamma$ -energy (keV) of the isomeric transition

right hand side: abundance in the natural element  
(atom %)

(n,  $\gamma$ )-cross section for thermal neutrons (b)

<p><b>Se 77</b></p>	<p>17,5 s    7,6</p>
<p><math>I_{\gamma}</math> 162</p>	<p><math>\sigma</math> 42</p>

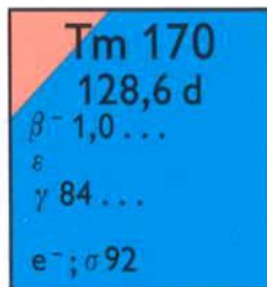
Elementsymbol und Nukleonenzahl

linke Spalte: Halbwertszeit des metastabilen Zustands;  
 $\gamma$ -Energie des Isomerenübergangs (keV)

rechte Spalte: Häufigkeit im natürlichen Element (Atom %)  
(n,  $\gamma$ )-Querschnitt für thermische Neutronen (b)

## Unstable Nuclides

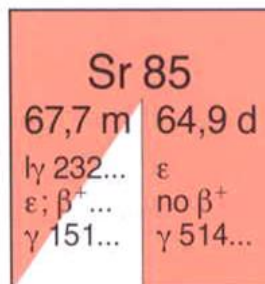
symbol of the element, number of nucleons  
half-life  
modes of decay, endpoint energy of  $\beta^-$  radiation (MeV)  
 $\gamma$ -energy (keV)  
conversion electrons, (n,  $\gamma$ )-cross section (b)



## Instabile Nuklide

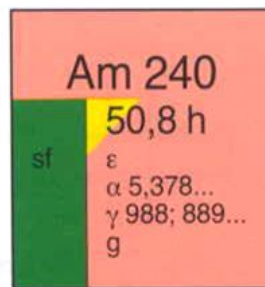
Elementsymbol und Nukleonenzahl  
Halbwertszeit  
Zerfallsarten und Maximalenergie der  $\beta^-$ -Strahlung (MeV)  
 $\gamma$ -Energie (keV)  
Konversionselektronen und (n,  $\gamma$ )-Querschnitt (b)

symbol of the element, number of nucleons  
half-lives  
both states decay by electron capture; the metastable state also to the ground state 5% <  $I_\gamma$  < 95%



Elementsymbol und Nukleonenzahl  
Halbwertszeiten  
Beide Zustände zerfallen durch Elektroneneinfang; der metastabile auch in den Grundzustand 5% <  $I_\gamma$  < 95%

symbol of the element, number of nucleons  
left hand side: spontaneous fission isomer,  $T < 0,1$  s  
right hand side: decay data of the ground state. "g" indicates that the daughter  $^{240}\text{gPu}$  is formed to at least 95%; a population of  $^{240}\text{mPu}$  up to 5% cannot be excluded.



Elementsymbol und Nukleonenzahl  
linke Spalte: Spontansplattendes Isomer,  $T < 0,1$  s  
rechte Spalte: Zerfallsdaten des Grundzustands. „g“ bedeutet, daß die Tochter  $^{240}\text{gPu}$  mindestens zu 95% gebildet wird; eine Populierung des  $^{240}\text{mPu}$  bis zu 5% ist nicht ausgeschlossen.



## Decay Modes: Colors and Symbols

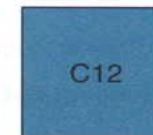
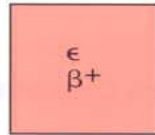
Stable nuclides



Primordial radionuclides, i. e. those formed in the build-up of the terrestrial matter and still present today.



$\beta^+$ : Positron decay  
 $\epsilon$ : Electron capture  
 $\beta^-$ : Negatron decay  
 $\alpha$ : Alpha decay  
 $sf$ : Spontaneous fission  
 $p$ : Proton decay  
 $C12$ : Cluster emission



## Zerfallsarten: Farben und Symbole

Stabile Nuklide

Primordiale Radionuklide, d. h. solche, die bei der Bildung der irdischen Materie entstanden und heute noch vorhanden sind.

$\beta^+$ : Positronen-Zerfall  
 $\epsilon$ : Elektronen-Einfang  
 $\beta^-$ : Negatronen-Zerfall  
 $\alpha$ : Alpha-Zerfall  
 $sf$ : Spontanspaltung  
 $p$ : Protonen-Zerfall  
 $C12$ : Cluster-Emission

The data given in the left part apply to the metastable state, those in the right part to the ground state.  $I_\gamma$  denotes  $\gamma$ -quanta due to the decay to the groundstate of the same nuclide (isomeric decay).



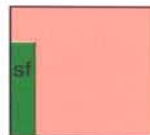
Die Angaben in der linken Spalte gelten für den metastabilen, die in der rechten Spalte für den Grundzustand.  $I_\gamma$  kennzeichnet  $\gamma$ -Quanten, die beim Zerfall in den Grundzustand desselben Nuklids auftreten (Isomerenzerfall).

The assignment of decay properties to the metastable or ground state is uncertain.

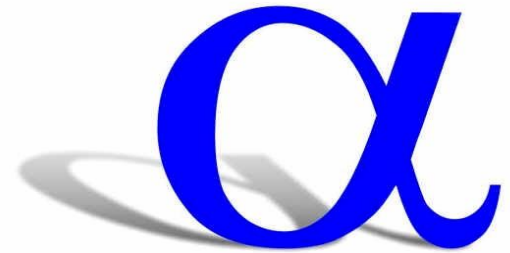


Die Zuordnung der Zerfallsdaten zum metastabilen bzw. Grundzustand ist unsicher.

One or more shortlived states, for which only decay via spontaneous fission has been observed (spontaneously fissioning isomers) are indicated by a vertical green bar.



Ein oder mehrere kurzlebige Isomere, die ausschließlich durch Spontanspaltung zerfallen, sind durch einen senkrechten grünen Balken gekennzeichnet.



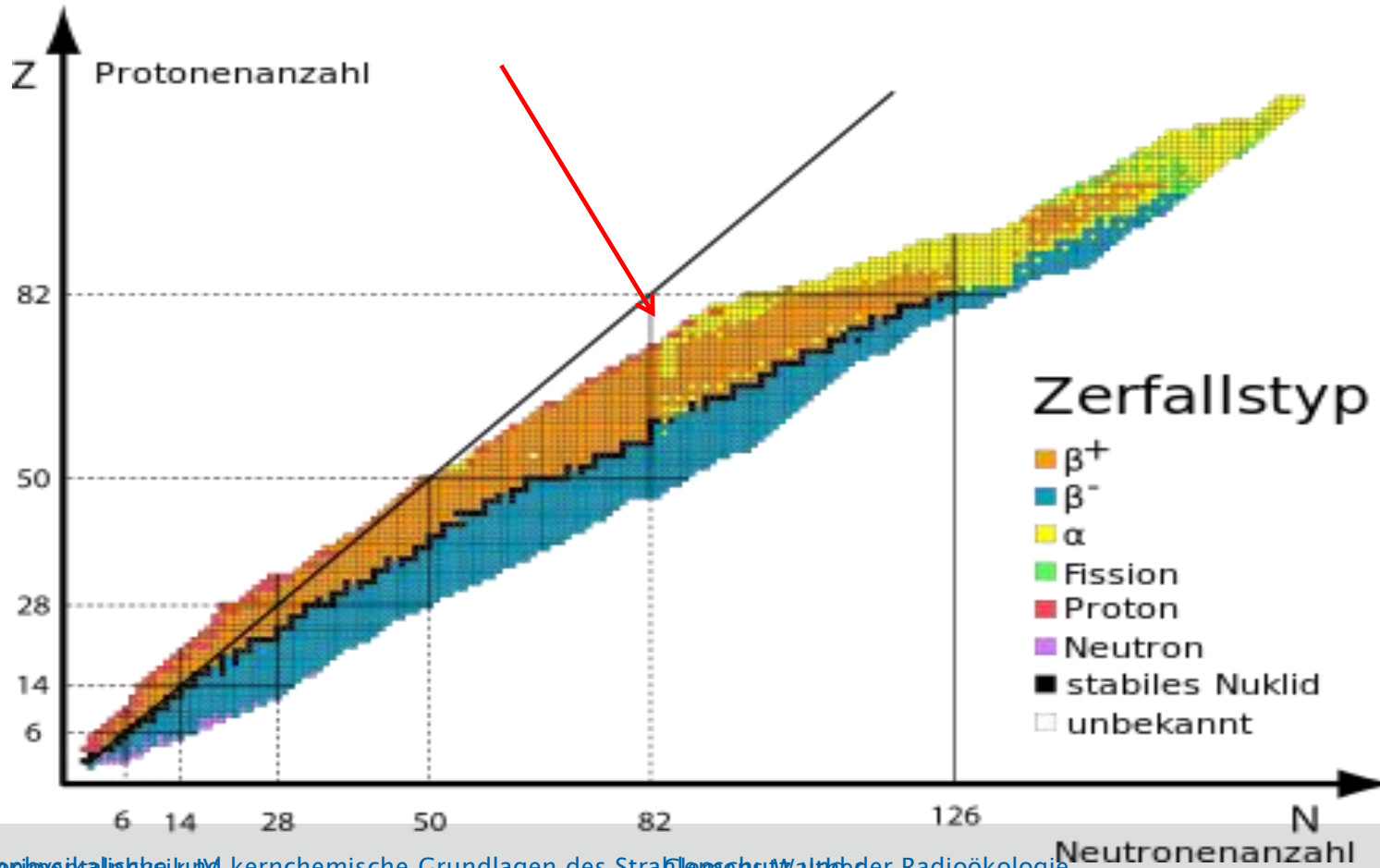
- A immer
- B  $A > 150$
- C  $Z > 47$
- D  $A > 210$

## SMART Response Question

To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...









## SMART Response Question

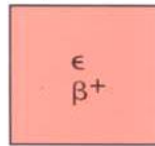
To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...

- **A** 50% $\alpha$  , 50%  $\beta^+$
- **B** 50% $\alpha$  , 50%  $\epsilon$
- **C** 50%-95% $\beta^+$  , 5%  $\epsilon$
- **D** 50%-95% $\alpha$  , 5-50%  $\epsilon$



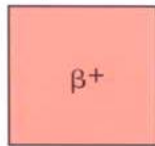
## Examples:

$$\epsilon + \beta^+ = 100\%$$



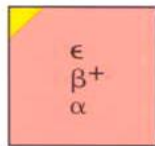
$$\% \epsilon > \% \beta^+$$

$$\epsilon + \beta^+ = 100\%$$



$$\% \beta^+ > \% \epsilon$$

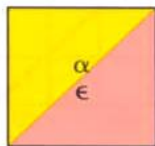
$$\alpha \leq 5\%$$



$$(\epsilon + \beta^+) \geq 95\%$$

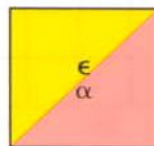
$$\% \epsilon > \% \beta^+$$

$$50\% \leq \alpha < 95\%$$



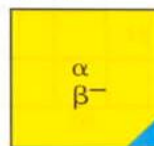
$$5\% < \epsilon \leq 50\%$$

$$50\% \leq \epsilon < 95\%$$



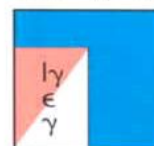
$$5\% < \alpha \leq 50\%$$

$$\alpha \geq 95\%$$



$$\beta^- \leq 5\%$$

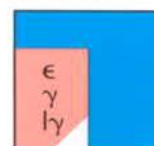
$$50\% \leq \gamma < 95\%$$



$$5\% < \epsilon \leq 50\%$$

$$\gamma > \gamma$$

$$\epsilon \geq 95\%$$



$$\gamma \leq 5\%$$

$$\gamma < \gamma$$

Primordial radionuclides, i. e. those formed in the build-up of the terrestrial matter and still present today.



Primordiale Radionuklide, d. h. solche, die bei der Bildung der irdischen Materie entstanden und heute noch vorhanden sind.

$\beta^+$ : Positron decay  
 $\epsilon$ : Electron capture  
 $\beta^-$ : Negatron decay  
 $\alpha$ : Alpha decay  
 $sf$ : Spontaneous fission  
 $p$ : Proton decay  
 $C12$ : Cluster emission



The data given in the left part apply to the metastable state, those in the right part to the ground state.  $\gamma$  denotes  $\gamma$ -quanta due to the decay to the groundstate of the same nuclide (isomeric decay).



Die Angaben in der linken Spalte gelten für den metastabilen, die in der rechten Spalte für den Grundzustand.  $\gamma$  kennzeichnet  $\gamma$ -Quanten, die beim Zerfall in den Grundzustand desselben Nuklids auftreten (Isomerenzerfall).

The assignment of decay properties to the metastable or ground state is uncertain.



Die Zuordnung der Zerfallsdaten zum metastabilen bzw. Grundzustand ist unsicher.

One or more shortlived states, for which only decay via spontaneous fission has been observed (spontaneously fissioning isomers) are indicated by a vertical green bar.



Ein oder mehrere kurzlebige Isomere, die ausschließlich durch Spontanspaltung zerfallen, sind durch einen senkrechten grünen Balken gekennzeichnet.

Emission of  $\gamma$ -quanta; they are always listed together with the respective parent nuclide.



Emission von  $\gamma$ -Quanten; sie sind stets beim jeweiligen Mutternuclid aufgeführt.

Emission of conversion electrons; the symbol is quoted only, if more conversion electrons than  $\gamma$ -quanta are emitted.



Emission von Konversionselektronen; das Symbol ist nur aufgeführt, wenn mehr Konversionselektronen als  $\gamma$ -Quanten emittiert werden.

Emission of the specified particles or spontaneous fission from an excited level of the daughter nuclide, populated via  $\beta$ -decay (" $\beta$ -delayed particle emission or fission").



Emission der jeweils angeführten Teilchen oder Spontanspaltung aus einem angeregten Zustand des Tochternuklids, der durch  $\beta$ -Zerfall bevölkert wird ( $\beta$ -verzögerte Teilchenemission oder Spaltung).

Simultaneous emission of two  $\beta$ -particles ("double  $\beta$ -decay", e. g.  $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ ).



Gleichzeitige Emission zweier  $\beta$ -Teilchen ("doppelter  $\beta$ -Zerfall", z. B.  $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ ).

Emission of the specified particles from the ground state of a particle-unstable nuclide (white field without indication of the half-life, e. g.  $^7\text{Li}$ ,  $^4\text{He}$ ). Simultaneous emission of two particles is indicated only, if one-particle-emission is excluded for energetical reasons (e. g.  $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ ).



Emission der jeweils angeführten Teilchen aus dem Grundzustand eines teilcheninstabilen Nuklids (weißes Feld ohne Angabe der Halbwertszeit, z. B.  $^7\text{Li}$ ,  $^4\text{He}$ ). Die Emission von zwei Teilchen ist nur dann aufgeführt, wenn die Emission eines einzelnen Teilchens aus energetischen Gründen nicht möglich ist (z. B.  $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ ).

### Abundance and Energy of the Emitted Radiation

The relative abundances of the decay modes and the emitted radiation are indicated by 3 different sizes of the colored sections and by the sequence of the symbols and energy values.

### Häufigkeit und Energie der Strahlungen

Die relative Häufigkeit der Zerfallsarten und Strahlungen ist durch 3 verschiedene Größen der Farbflächen sowie durch die Reihenfolge der Symbole und der Energiewerte angegeben.

Examples:

$$\epsilon + \beta^+ = 100\%$$



$$\% \epsilon > \% \beta^+$$

$$\epsilon + \beta^+ = 100\%$$



$$\% \beta^+ > \% \epsilon$$

$$\alpha \leq 5\%$$



$$(\epsilon + \beta^+) \geq 95\%$$

$$\% \epsilon > \% \beta^+$$

$$50\% \leq \alpha < 95\%$$



$$5\% < \epsilon \leq 50\%$$

$$50\% \leq \epsilon < 95\%$$



$$5\% < \alpha \leq 50\%$$

$$\alpha \geq 95\%$$



$$\beta^- \leq 5\%$$

$$50\% \leq \gamma < 95\%$$



$$5\% < \epsilon \leq 50\%$$

$$\gamma > \gamma$$

$$\epsilon \geq 95\%$$



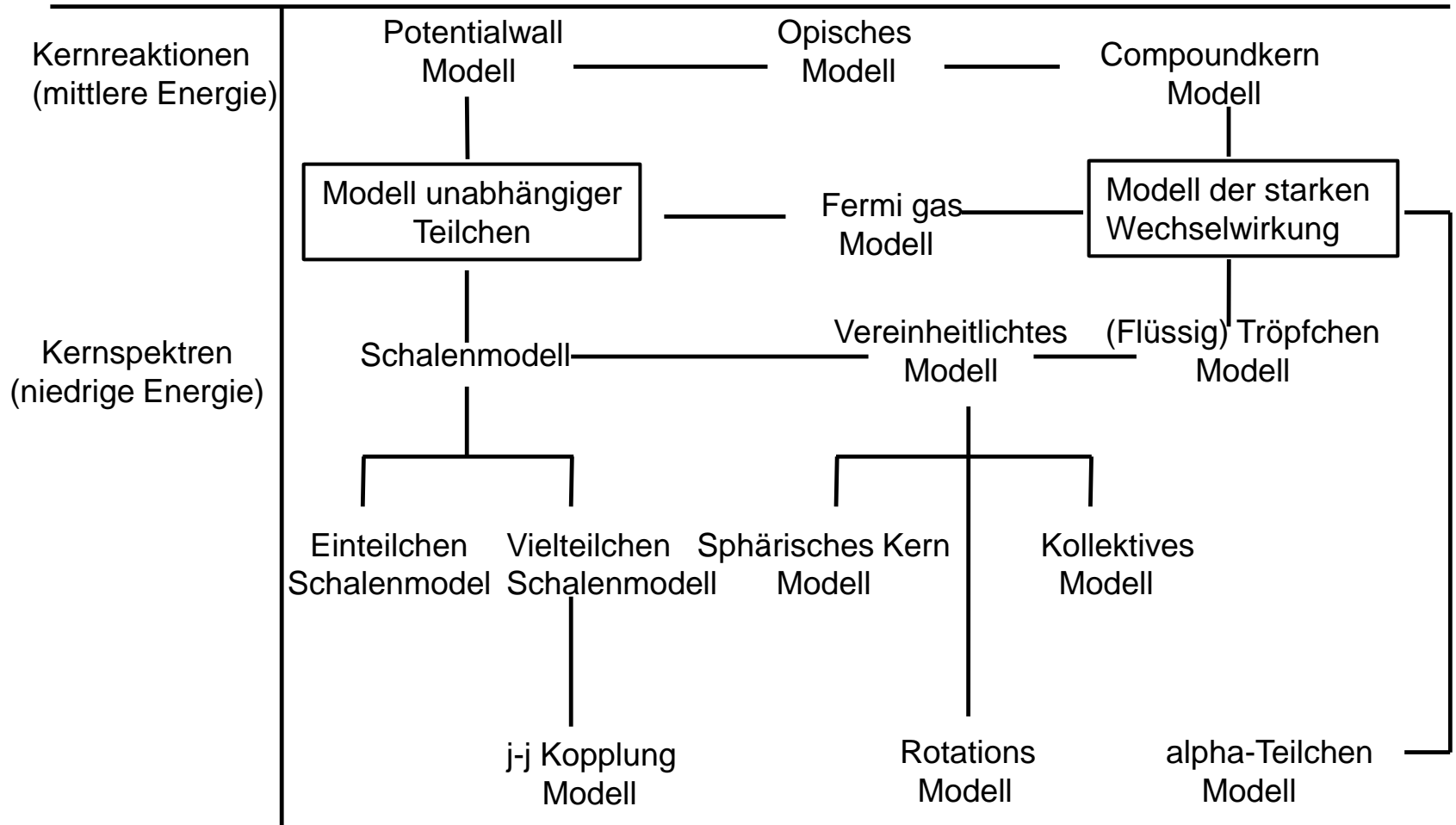
$$\gamma \leq 5\%$$

$$\gamma < \gamma$$



[illegible]





$$1 \text{ u} = 1.6605402 (10) \times 10^{-24} \text{ g} = 931.49432 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$1 \text{ u} = 1.6605402 (10) \times 10^{-24} \text{ g} = 931.49432 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 1.007276470 (12) \text{ u} = 938.27231 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 1.008664904 (14) \text{ u} = 939.56563 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n - m_p = (1.29332 \pm 0.00040) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 0.51099906 (15) \text{ MeV}/c^2$$

$$1 \text{ u} = 1.6605402 (10) \times 10^{-24} \text{ g} = 931.49432 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 1.007276470 (12) \text{ u} = 938.27231 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 1.008664904 (14) \text{ u} = 939.56563 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n - m_p = (1.29332 \pm 0.00040) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 0.51099906 (15) \text{ MeV}/c^2$$

$$m(Z, A) < Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n$$

$$1 \text{ u} = 1.6605402 (10) \times 10^{-24} \text{ g} = 931.49432 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 1.007276470 (12) \text{ u} = 938.27231 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 1.008664904 (14) \text{ u} = 939.56563 (28) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n - m_p = (1.29332 \pm 0.00040) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 0.51099906 (15) \text{ MeV}/c^2$$

$$m(Z, A) < Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n$$

**Der Massendefekt  $\delta m$ :**  $\delta m = Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m(Z, A)$

- Bei welcher Masse haben Kerne die höchste Bindungsenergie pro Nukleon?

➤ Zahl eingeben

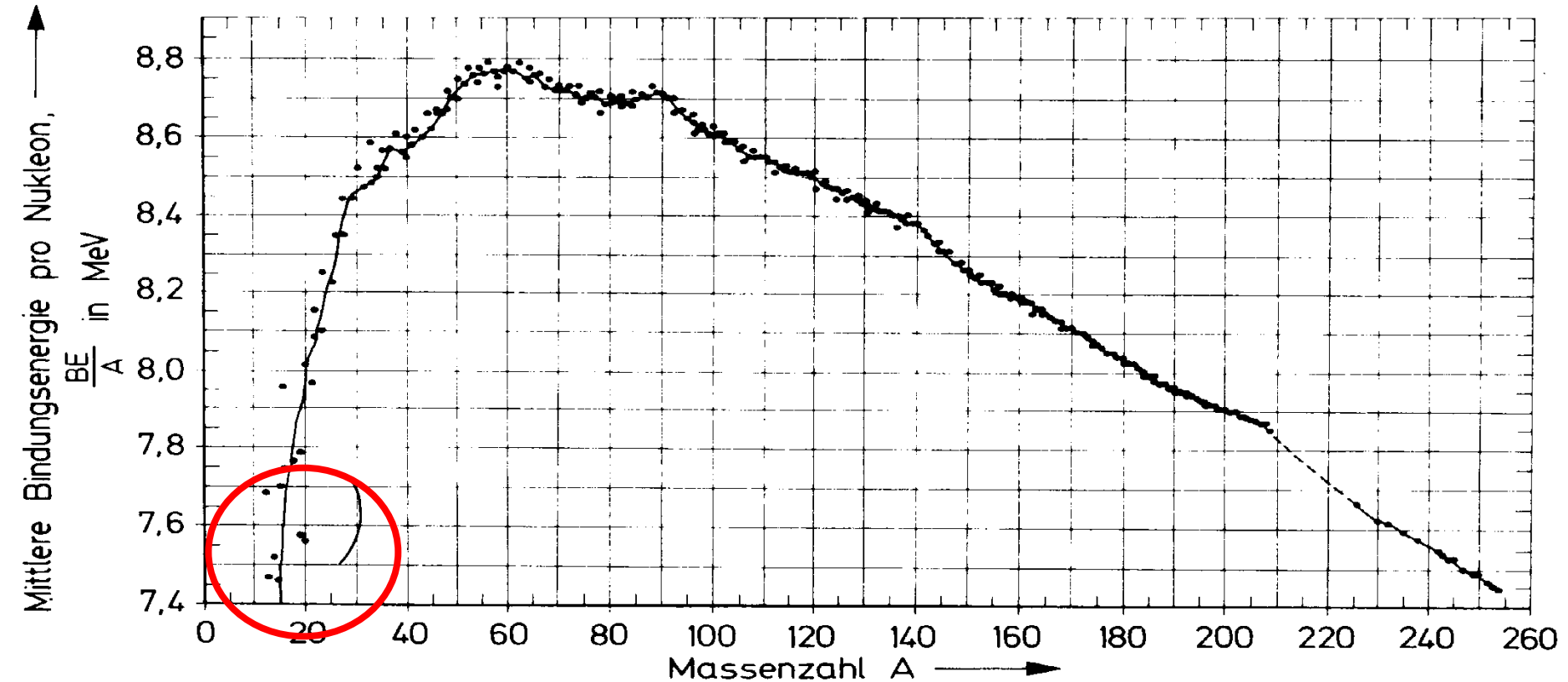


## SMART Response Question

To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...



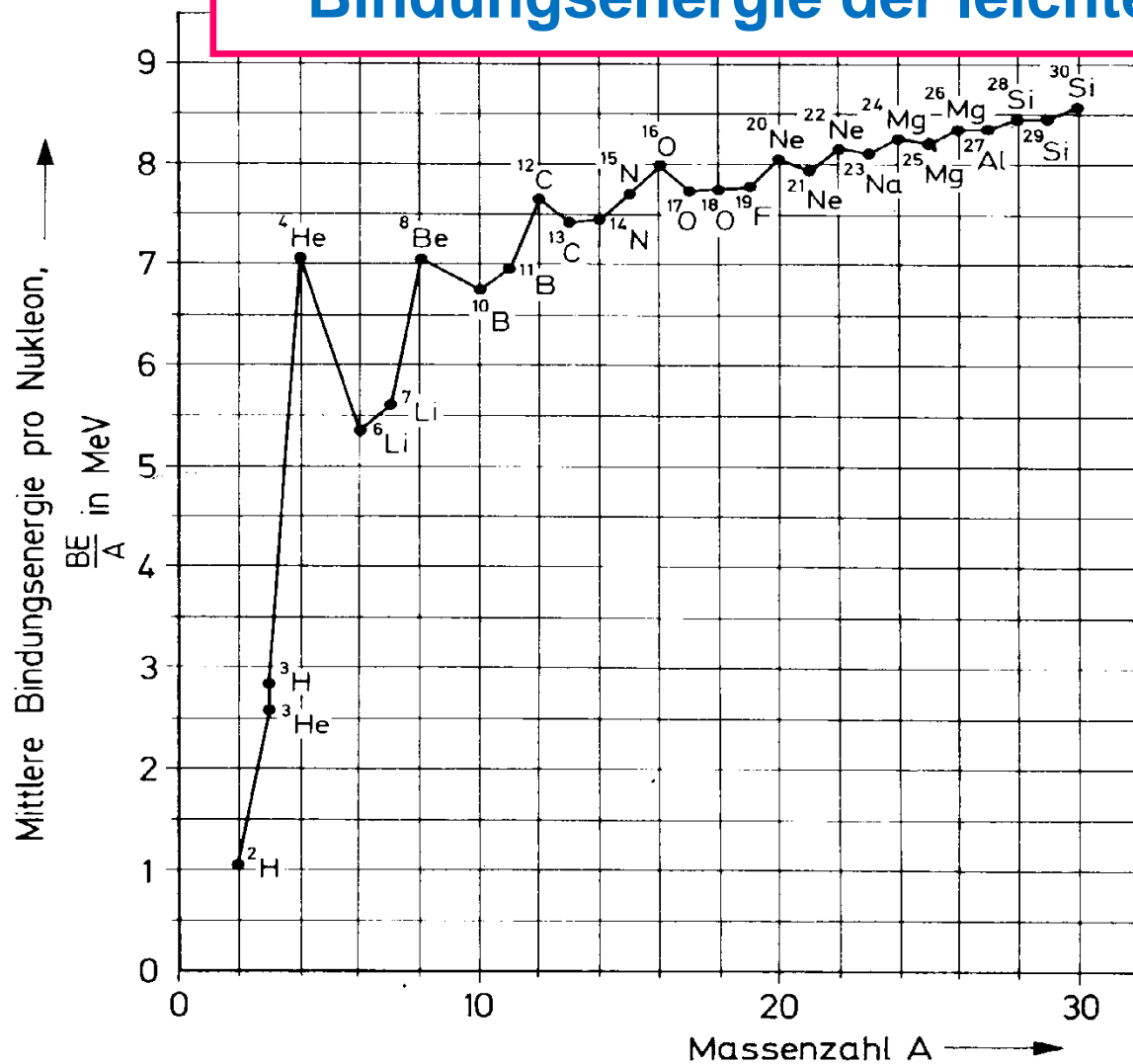




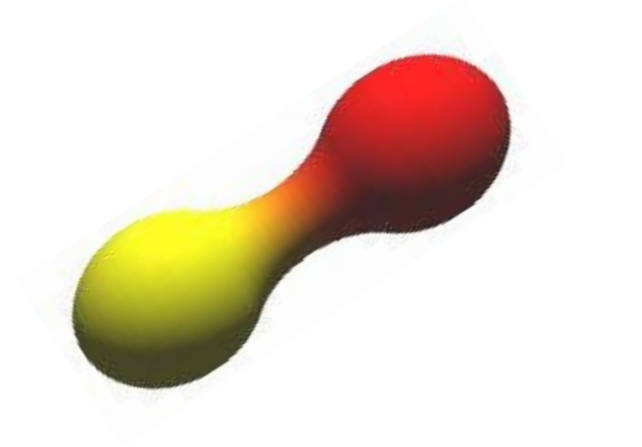
# Bindungsenergie der leichten Nuklide

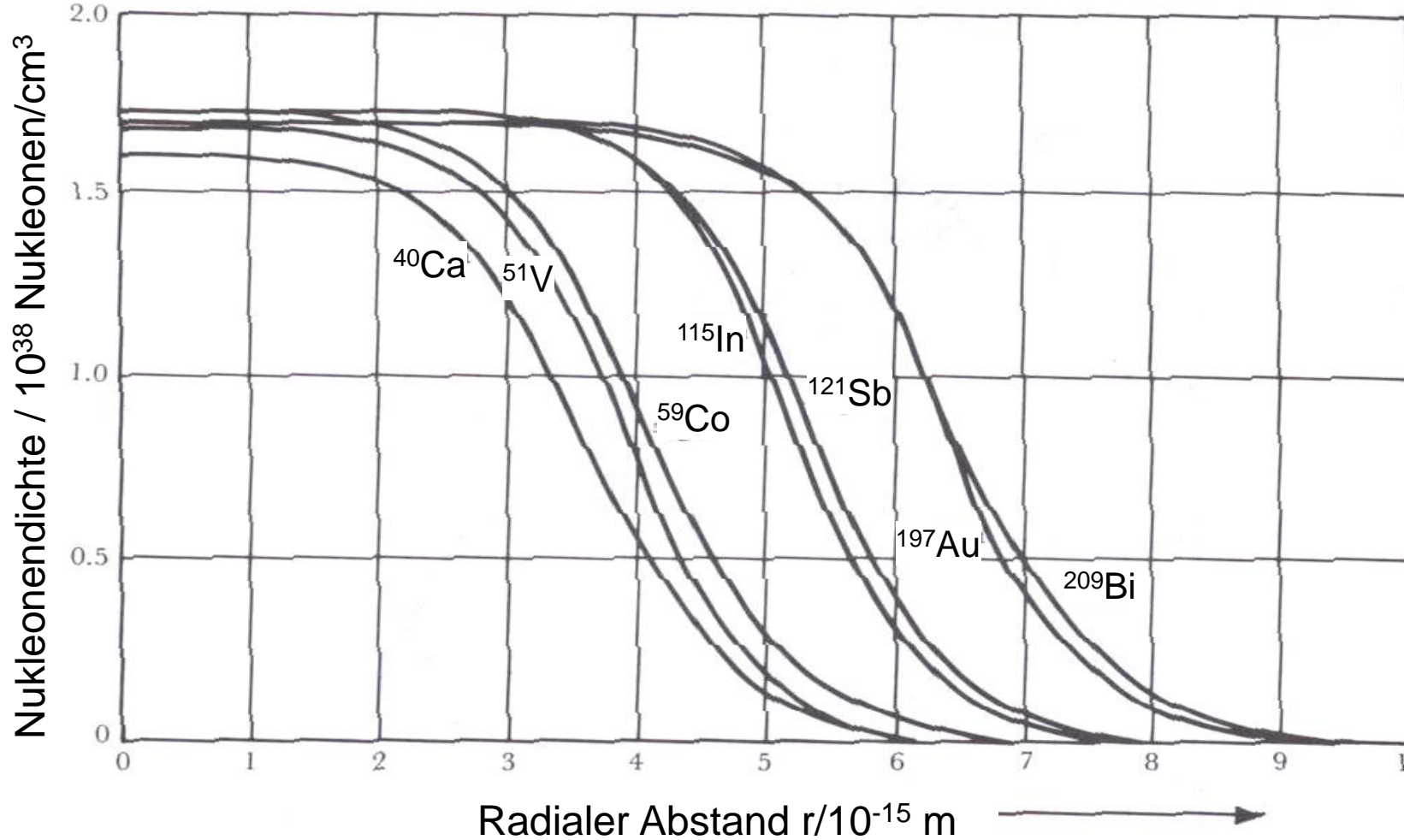
11  
10:2  
100:4

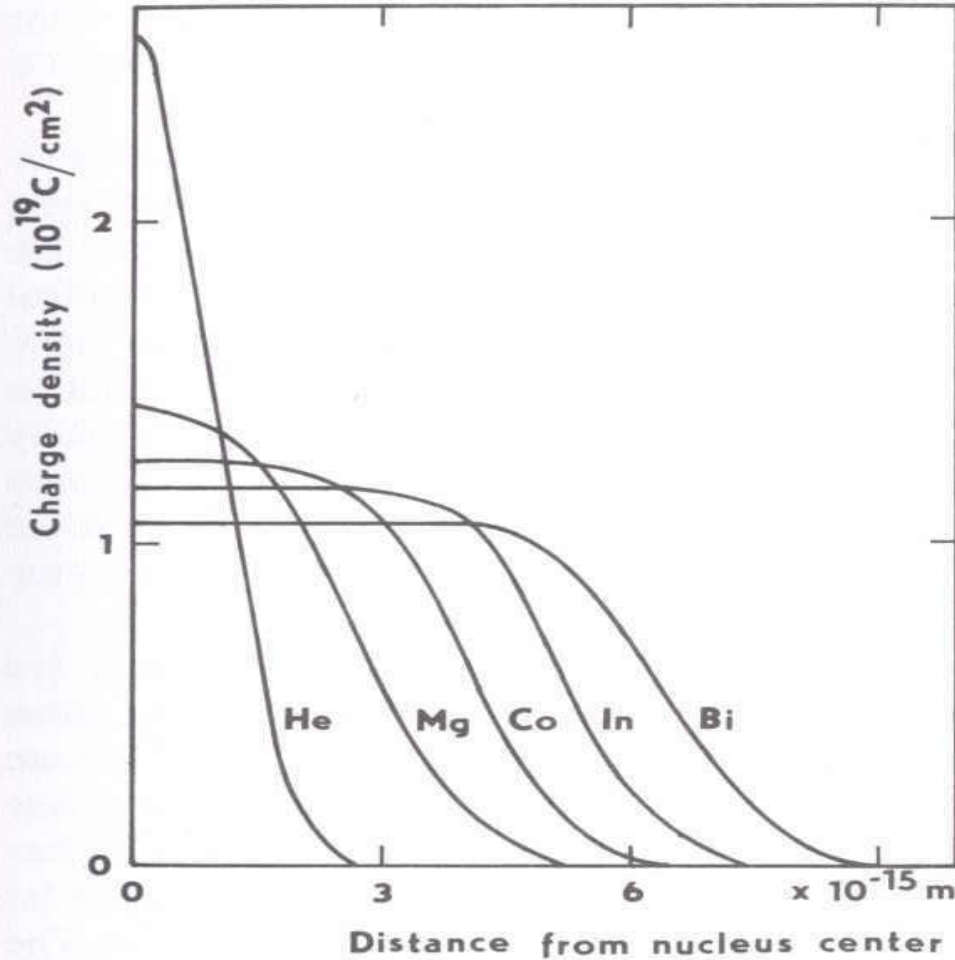
Leibniz  
Universität  
Hannover



- Konstante Dichte der Nukleonen  
(analog: inkompressible Flüssigkeit)



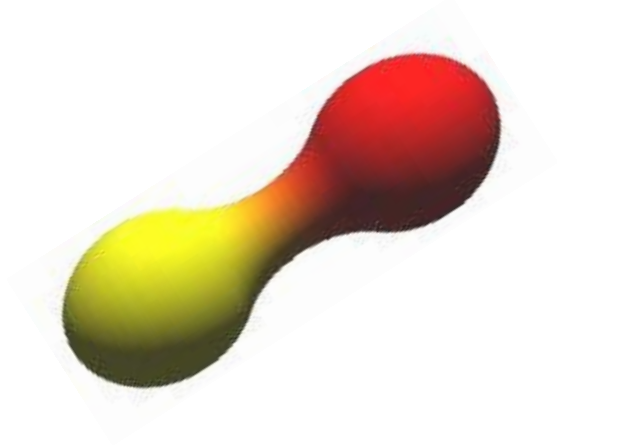




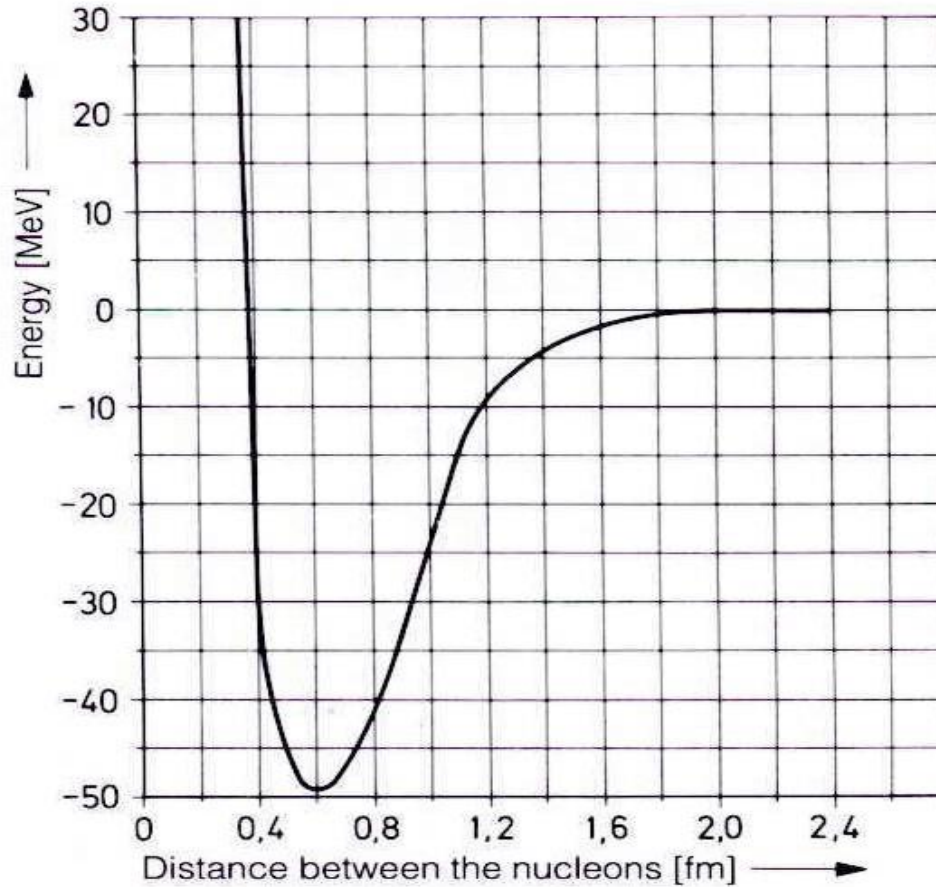
$$R = r_0 \cdot A^{1/3}$$

$$r_0 = (1.28 \pm 0.05) \text{ fm}$$

- Konstante Dichte der Nukleonen
- Kurzreichweitige (starke) Kernkraft mit Sättigungscharakter

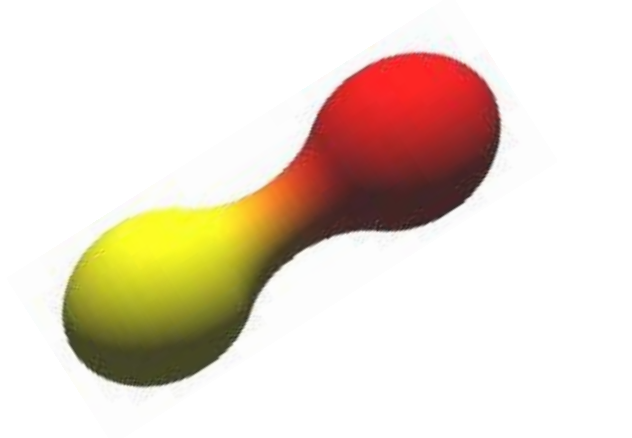


# Nukleon-Nukleon Potential ohne Coulomb Wechselwirkung





- Konstante Dichte der Nukleonen
- Kurzreichweitige (starke) Kernkraft mit Sättigungscharakter
- Coulombwechselwirkung zwischen Protonen



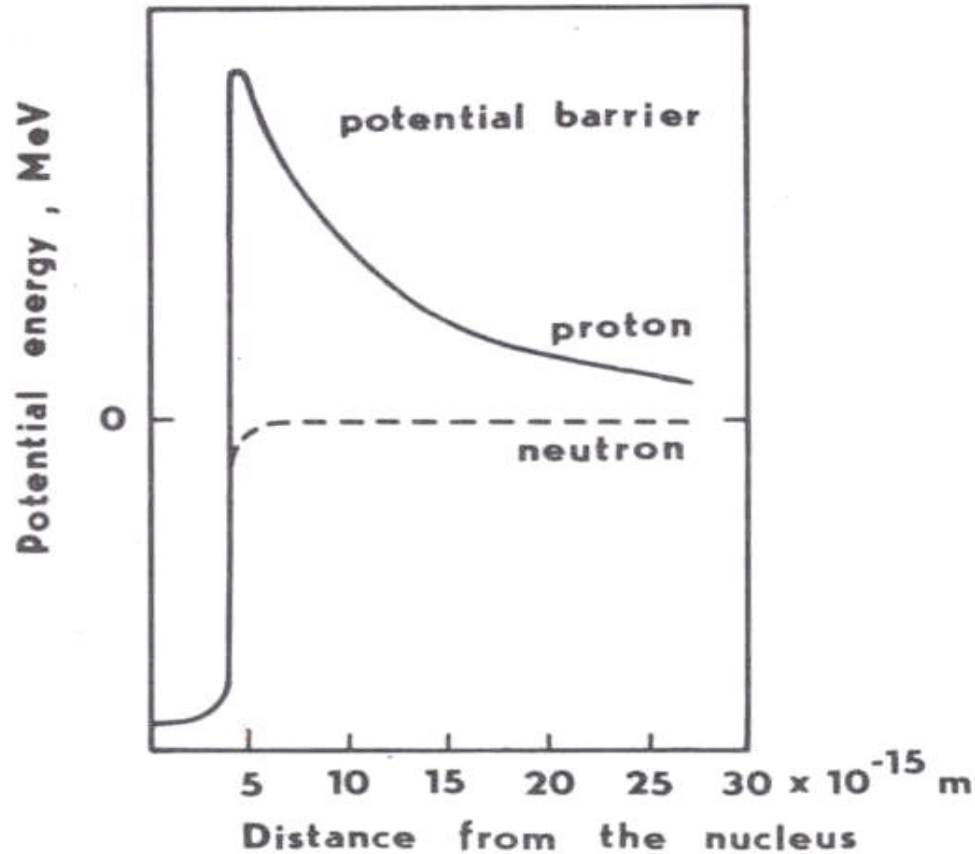


Fig. 1.1  
Variation of the potential energy of a proton and neutron as they approach the atomic nucleus

## 6 Was ist der **Isospin** ?

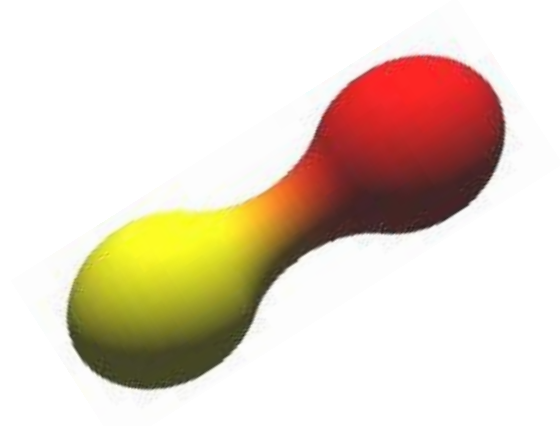
- A Unterscheidet Elektron von Positron
- B Wie Elektronenspin, aber für Protonen
- C Wie Elektronenspin, aber für Neutronen
- D Unterscheidet Protonen von Neutronen

### SMART Response Question

To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...



- Konstante Dichte der Nukleonen
- Kurzreichweitige (starke) Kernkraft mit Sättigungscharakter
- Coulomb Wechselwirkung zwischen Protonen
- Fermi Gas der Nukleonen
- Protonen und Neutronen unterscheiden sich durch Isospin  $T$



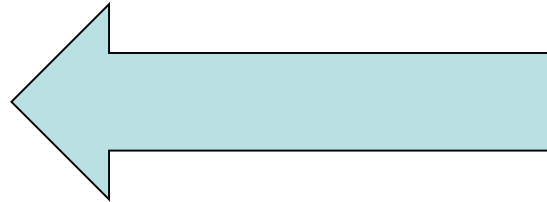


**Z** atomic number (Kernladungszahl),  
proton number (Protonenanzahl)

**N** neutron number (Neutronenanzahl)

**A** Mass number (Massenzahl)

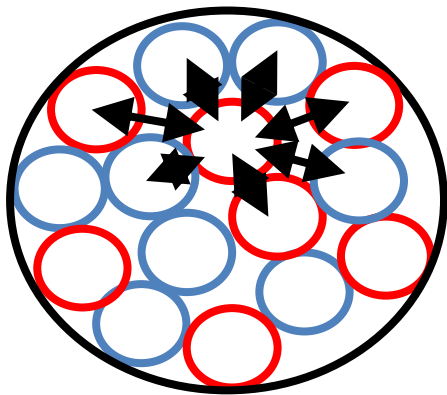
$$A = Z + N$$





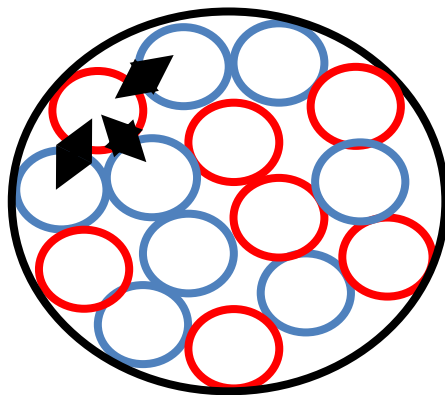
$E_{\text{bind}} =$

Volumen



$\propto A$

Oberfläche

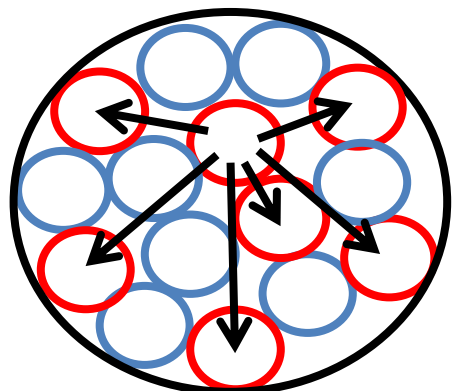


$\propto A^{2/3}$

+

+

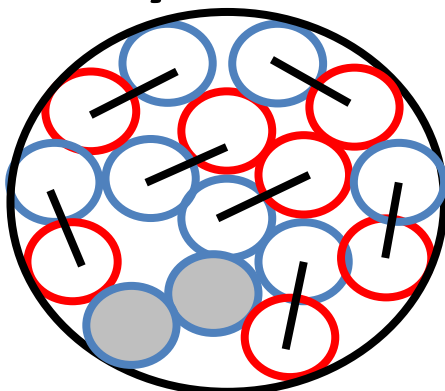
Coulomb



$\propto Z(Z-1)/A^{1/3}$

+

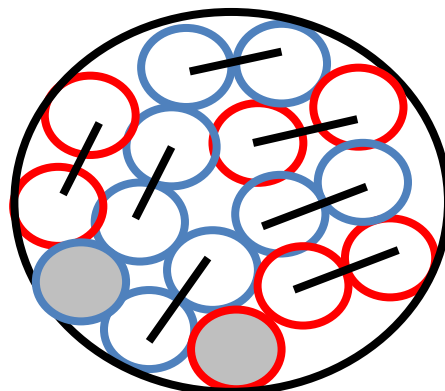
Asymmetrie



$\propto (A-2Z)^2/A$

+

Paar

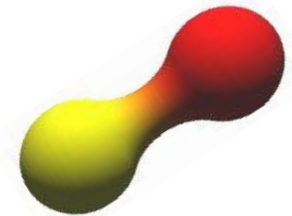


$\pm \delta$

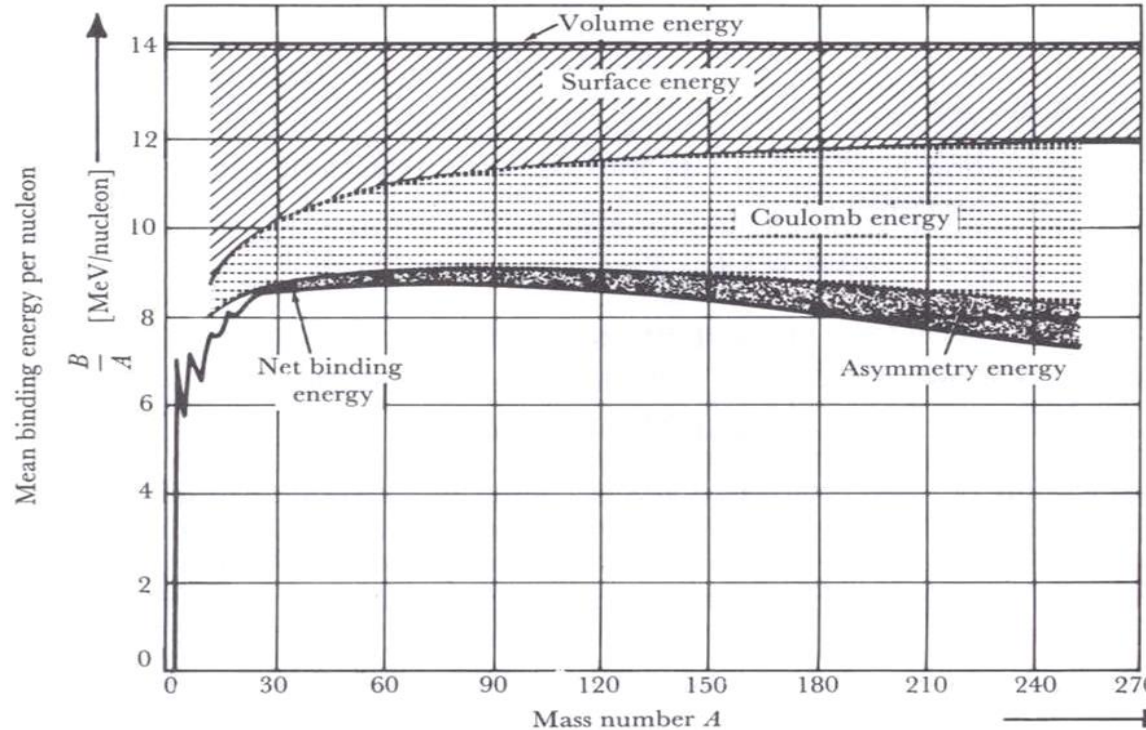
$$m(Z, A) = Z \cdot m_{\text{H}} + (A - Z) \cdot m_{\text{n}} - BE_{\text{Kern}} - BE_{\text{Elektronen}}$$

$$BE_{\text{Kern}} = a_v \cdot A - a_s \cdot A^{2/3} - a_c \cdot \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \cdot \frac{(A - 2 \cdot Z)^2}{A} + \delta$$

Volumen Energie	$a_v A$	mit	$a_v = 15.56 \text{ MeV}$
Oberflächen Energie	$a_s A^{2/3}$	mit	$a_s = 17.23 \text{ MeV}$
Coulomb Energie	$a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$	mit	$a_c = 0.7 \text{ MeV}$
Asymmetrie Energie	$a_a \frac{(A-2Z)^2}{A}$	mit	$a_a = 23.285 \text{ MeV}$



Paarungs Energie	$\delta = \begin{cases}$	$+11/A^{1/2} \text{ MeV}$	für gerade - gerade	(gg / ee) Kerne
		0	für ungerade - gerade gerade - ungerade	(ug/ oe) (gu/ eo) Kerne
		$-11/A^{1/2} \text{ MeV}$	für ungerade - ungerade	(uu / oo) Kerne



Masse (Kern)



Summe der  
Nukleonenmassen

→ Massen Defekt

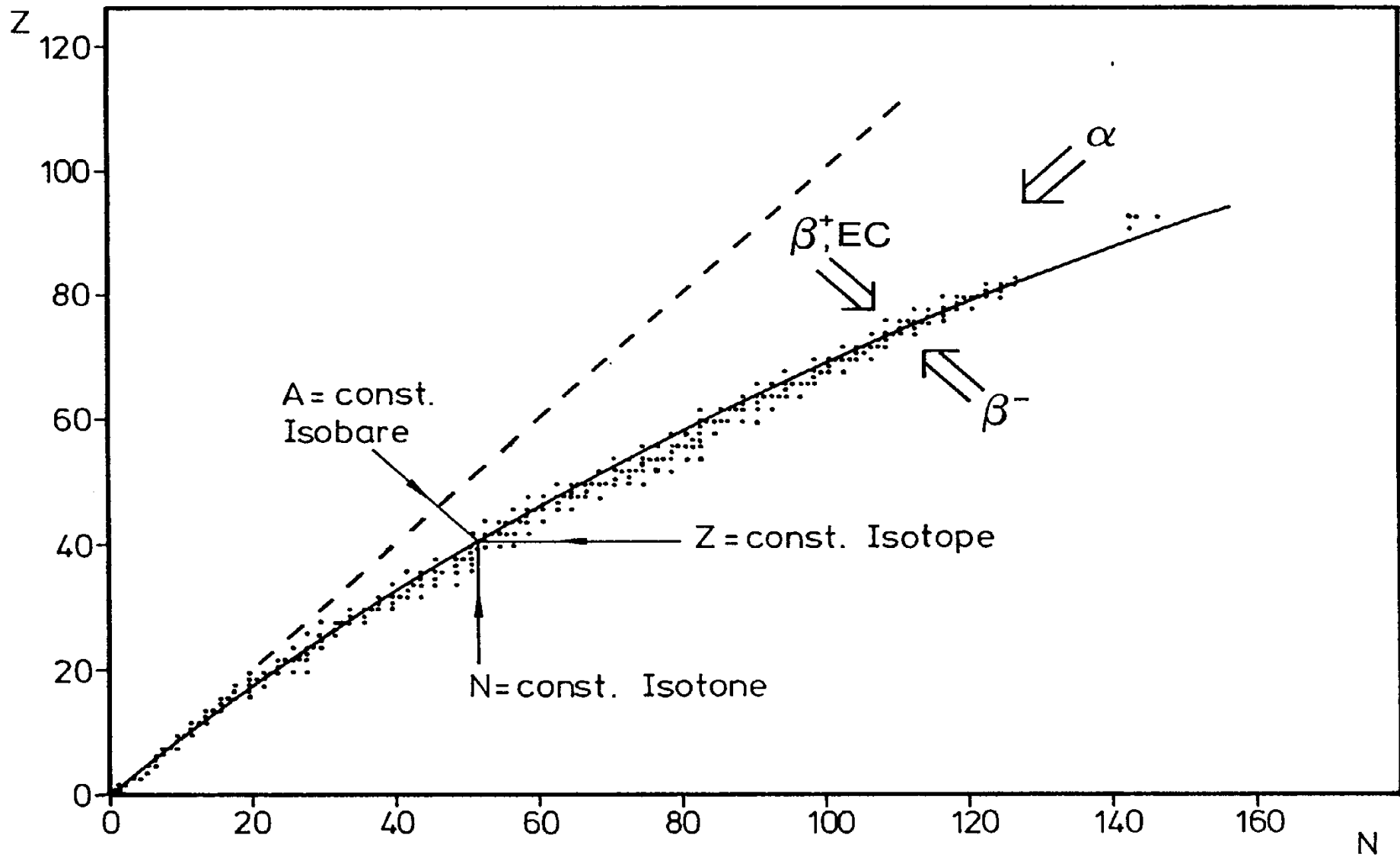
→ Bindungsenergie

**Bindungsenergie=**  
Kondensationsenergie

- Oberflächen Energie
- Coulomb Energie
- Asymmetrie Energie (N-Z)
- + Paarungs Energie

(Kräfte zwischen benachbarten  
Nukleonen abhängig von gg, uu, ug,gu)

**-> Übungsaufgabe**



**Isobaren,  $A = \text{constant}$ :**

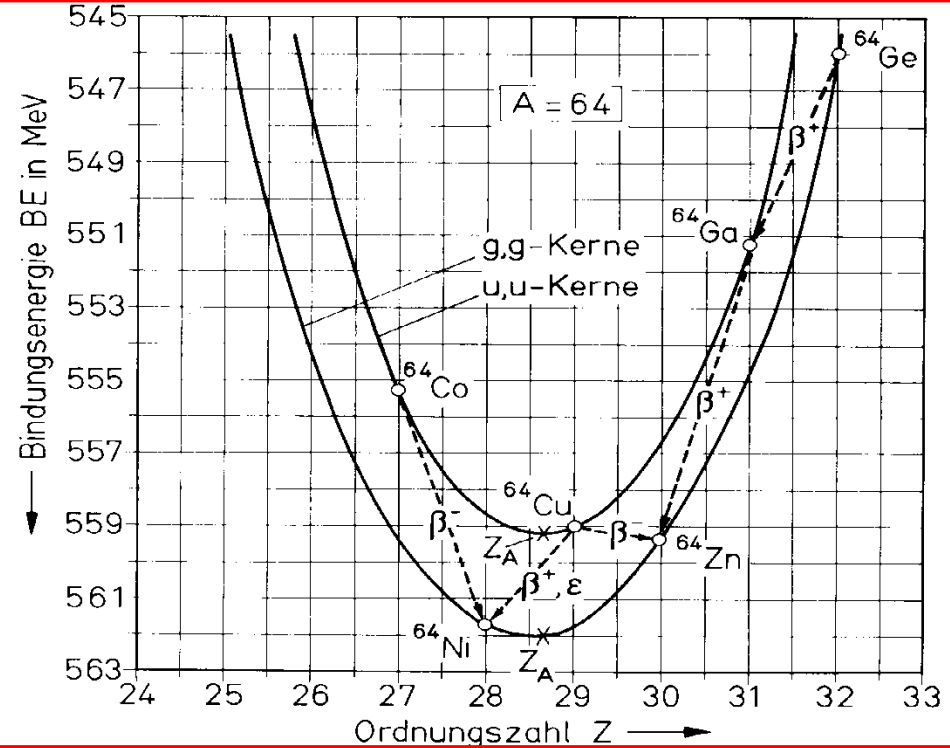
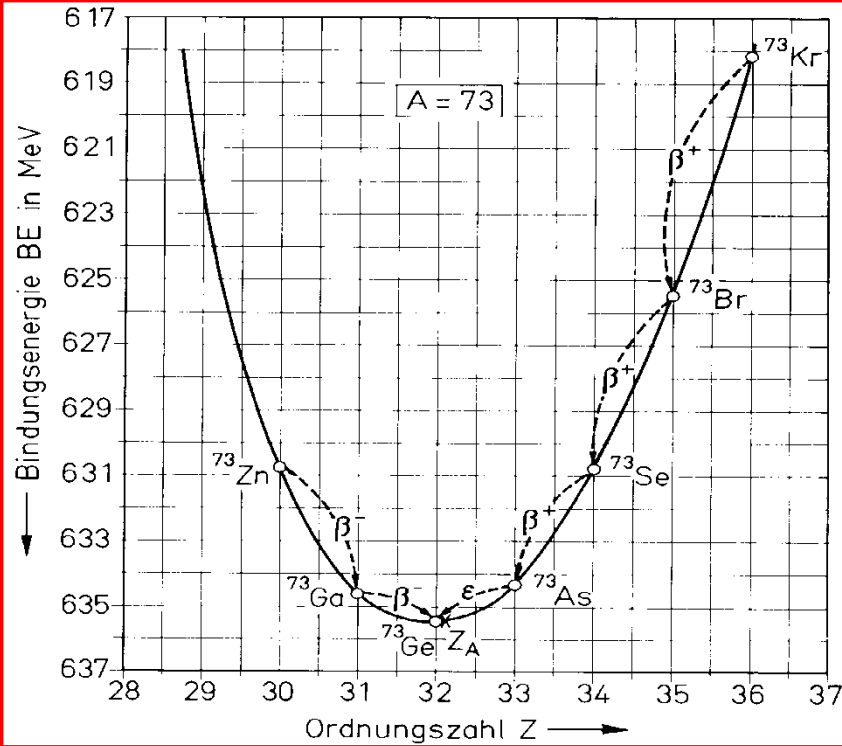
$$M(Z, A) = \alpha(A) \cdot Z^2 + \beta(A) \cdot Z + \gamma(A) + \delta$$

**Definiere:**  $Q_\beta = [M(Z, A) - M(Z \pm 1, A)] \cdot c^2$

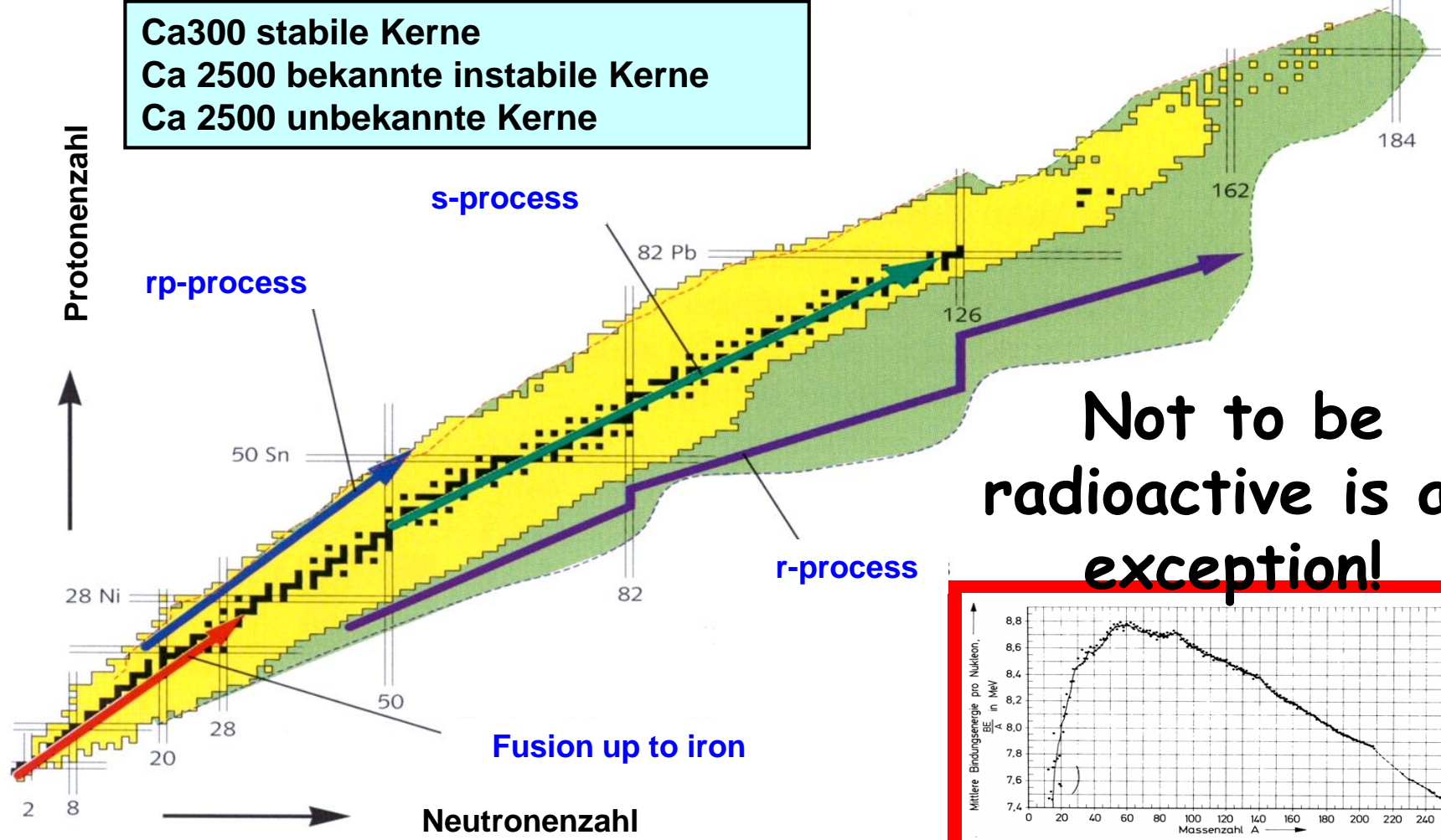
**Für  $\beta$ -Zerfall :**

$$\beta^-, \text{EC} \quad Q_\beta > 0$$

$$\beta^+ \quad Q_\beta > 1,02 \text{ MeV} = 2 \cdot m_e c^2$$



Ca300 stabile Kerne  
Ca 2500 bekannte instabile Kerne  
Ca 2500 unbekannte Kerne





Die Energieerhaltung ist eine ***conditio sine qua non***.

Aber es gibt weitere Erhaltungsgrößen.

Erhaltung von

- Impuls (momentum)
- Drehimpuls (angular momentum)
- Isospin (isospin)
- Leptonenzahl (lepton number)
- Parität (parity)

Auch wichtig: Pauli Prinzip und Coulomb Barriere!

## Eingangszustand

## Ausgangszustand

Ruhemassen

$$\sum_i m_i \cdot c^2$$

$$\sum_j m_j \cdot c^2$$

Kinetische Energien

$$\sum_i E_{\text{kin},i}$$

**Kernreaktion**

$$\sum_j E_{\text{kin},j}$$

Anregungsenergien

$$\sum_i E_i^*$$

$$\sum_j E_j^*$$

---


$$E_{\text{initial}}$$

---


$$E_{\text{final}}$$

**Q-Wert:  $Q = E_{\text{ein}} - E_{\text{aus}}$**

**Q-Wert**  $Q = E_{\text{ein}} - E_{\text{aus}}$

**$Q > 0$**                       **exotherm (c.f. Chemie)**

**$Q < 0$**                       **endotherm**

$$E_{\text{kin}} = 0, E^* = 0 \Rightarrow Q = \sum_i m_i \cdot c^2 - \sum_j m_j \cdot c^2$$

**Bei Kernreaktionen unterscheiden wir:**

- **mono-nukleare Reaktionen**, e.g. Zerfall, Spontanspaltung
- **Binukleare Reaktion**, e.g.  $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ ,  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ ,  $^{235}\text{U}(n,f)$
- **Ternäre Reaktion**, e.g.  $3 \times ^4\text{He} \longrightarrow ^{12}\text{C}^*$

$\alpha$ -Zerfall

$$Z, A \longrightarrow Z - 2, A - 4$$

$\beta$ -Zerfall

$$Z \longrightarrow Z \pm 1, A = \text{const.}$$

$\gamma$ -Zerfall

$$Z = \text{const.}, A = \text{const.}$$

**Spontanspaltung**

seltene Zerfälle:

doppelter  $\beta$ -Zerfall

$$\longrightarrow Z \pm 2, A = \text{const.}$$

$^{12}\text{C}$  Zerfall, ...

Nur von angeregten Zuständen fern der Stabilität:

n-Emission

p-Emission

Kernreaktion:  $X(x, y)Y$

$$Q = [m(X) + m(x) - m(Y) - m(y)] \cdot c^2$$

Kernreaktion:  $X(x, y)Y$

$$Q = [m(X) + m(x) - m(Y) - m(y)] \cdot c^2$$

**Zum Beispiel symmetrische Spaltung:**

$$\begin{aligned}
 E_f &= [m(Z, A) - 2 \cdot m(Z/2, A/2)] \cdot c^2 \\
 &= a_s \cdot A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + a_c \cdot Z^2 \cdot A^{1/3} (1 - 2^{-2/3}) \\
 &= (-5.12 \cdot A^{2/3} + 0.284 \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3}) \text{ u}
 \end{aligned}$$

Kernreaktion:  $X(x, y)Y$

$$Q = [m(X) + m(x) - m(Y) - m(y)] \cdot c^2$$

**Zum Beispiel symmetrische Spaltung:**

$$\begin{aligned} E_f &= [m(Z, A) - 2 \cdot m(Z/2, A/2)] \cdot c^2 \\ &= a_s \cdot A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + a_c \cdot Z^2 \cdot A^{1/3} (1 - 2^{-2/3}) \\ &= (-5.12 \cdot A^{2/3} + 0.284 \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3}) \text{ u} \end{aligned}$$

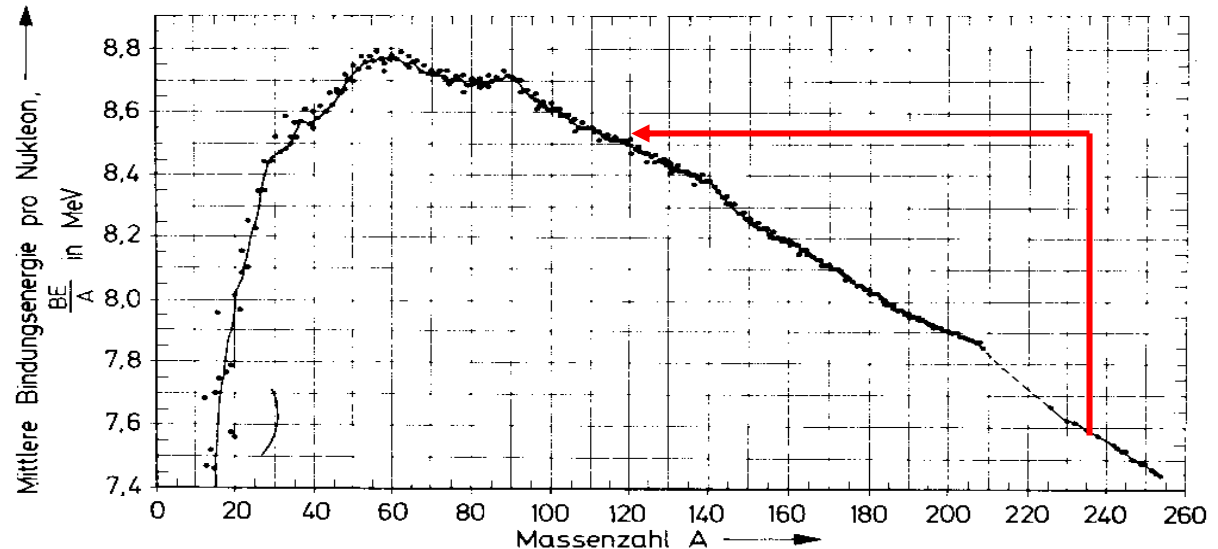
$$E_f > 0: -5.12 + 0.284 \cdot \frac{Z^2}{A} > 0 \Rightarrow \frac{Z^2}{A} = \frac{5.12}{0.284} = 18 \Rightarrow Z \approx 40, A \approx 90$$

$$Q_f > 0: \quad -5,12 \cdot A^{2/3} + 0,284 \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3} > 0$$

$$-5,12 + 0,284 \cdot Z^2/A > 0$$

$$Z^2/A > 18$$

Aber...



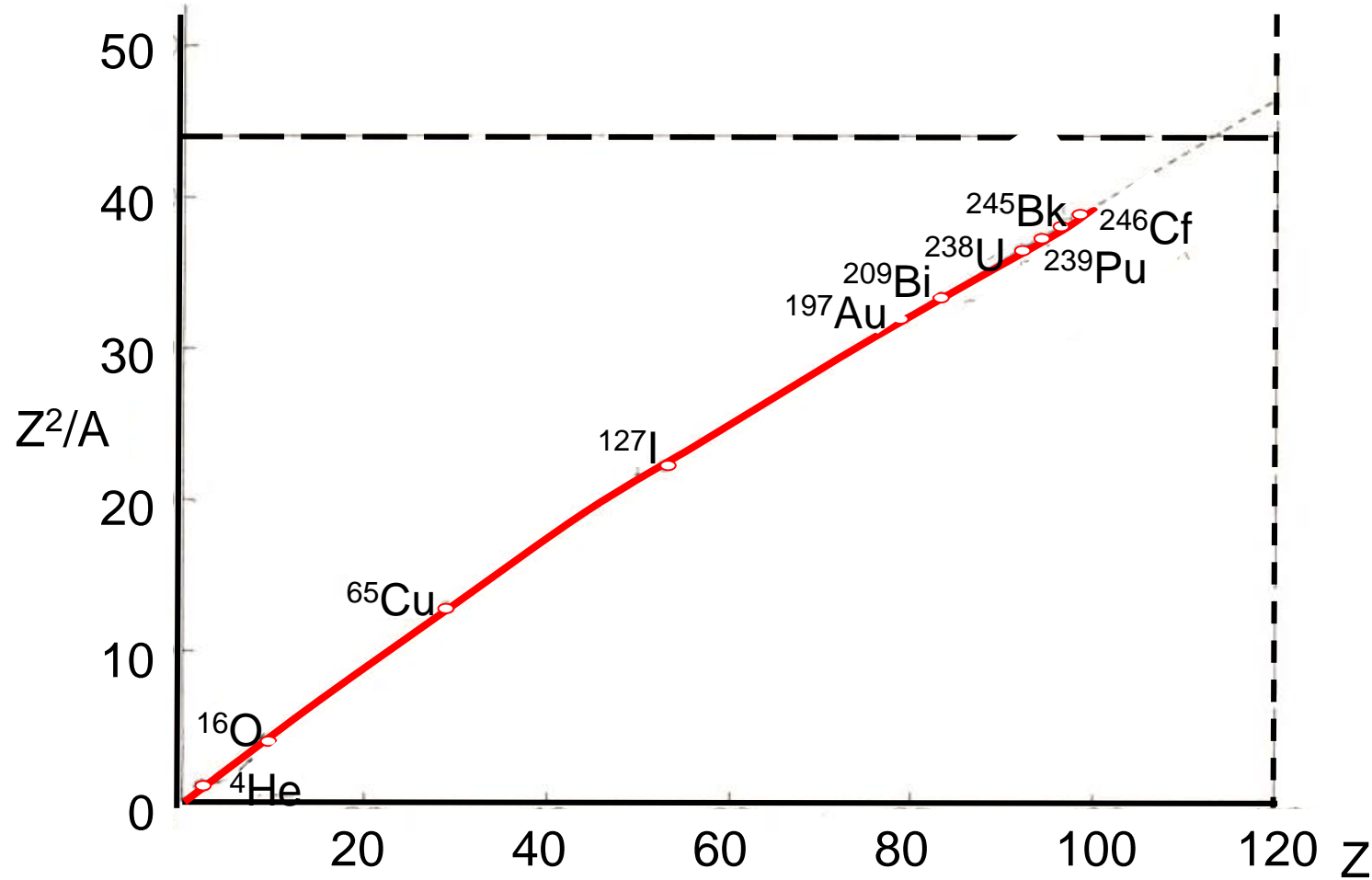


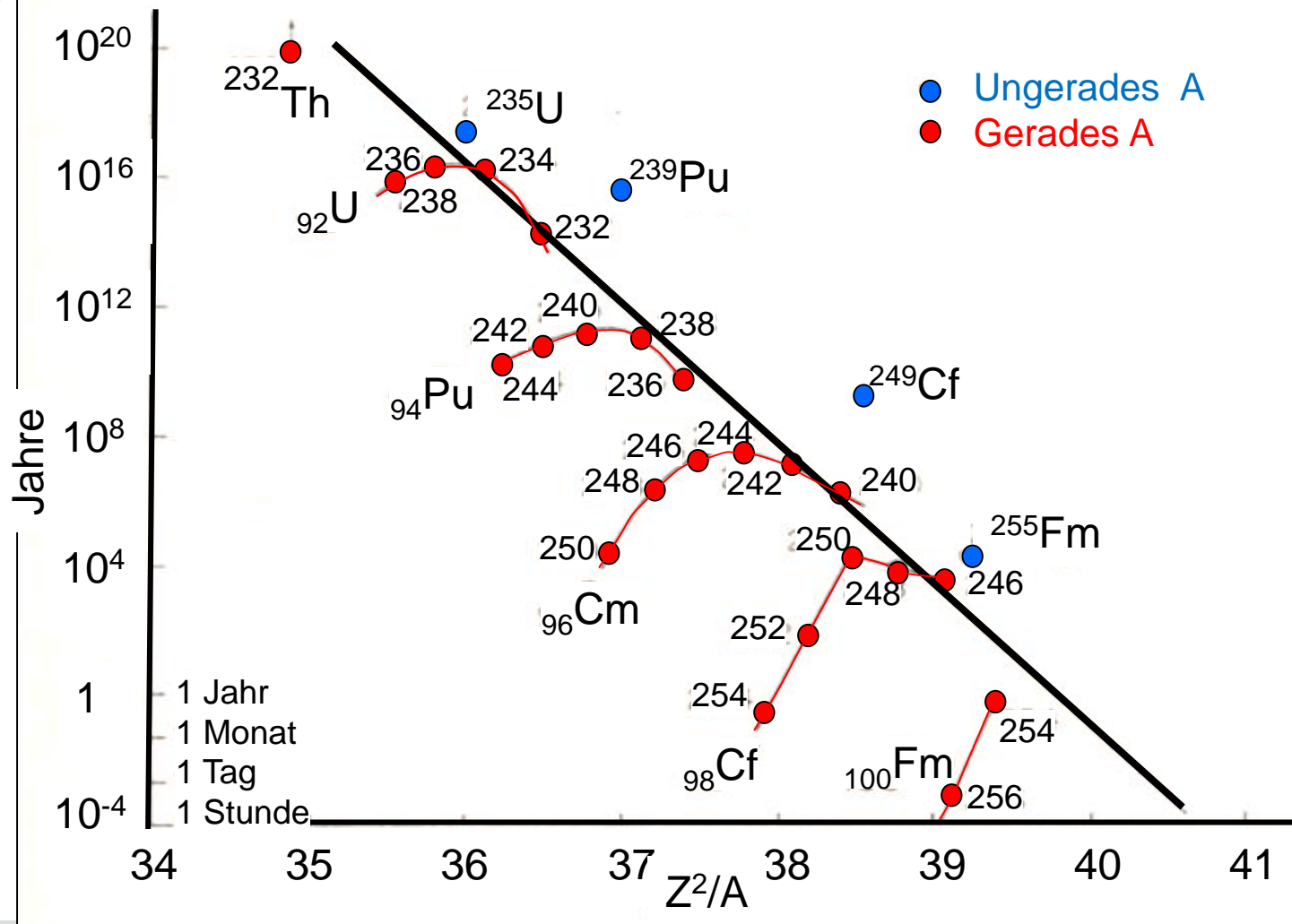
Die Spaltprodukte müssen durch die Coulomb Barriere tunneln

$$\frac{Z^2}{A} = 37 \text{ i.e. } Z \approx 95, A \approx 245 \Rightarrow T_{1/2} = 10^{10} \text{ a}$$

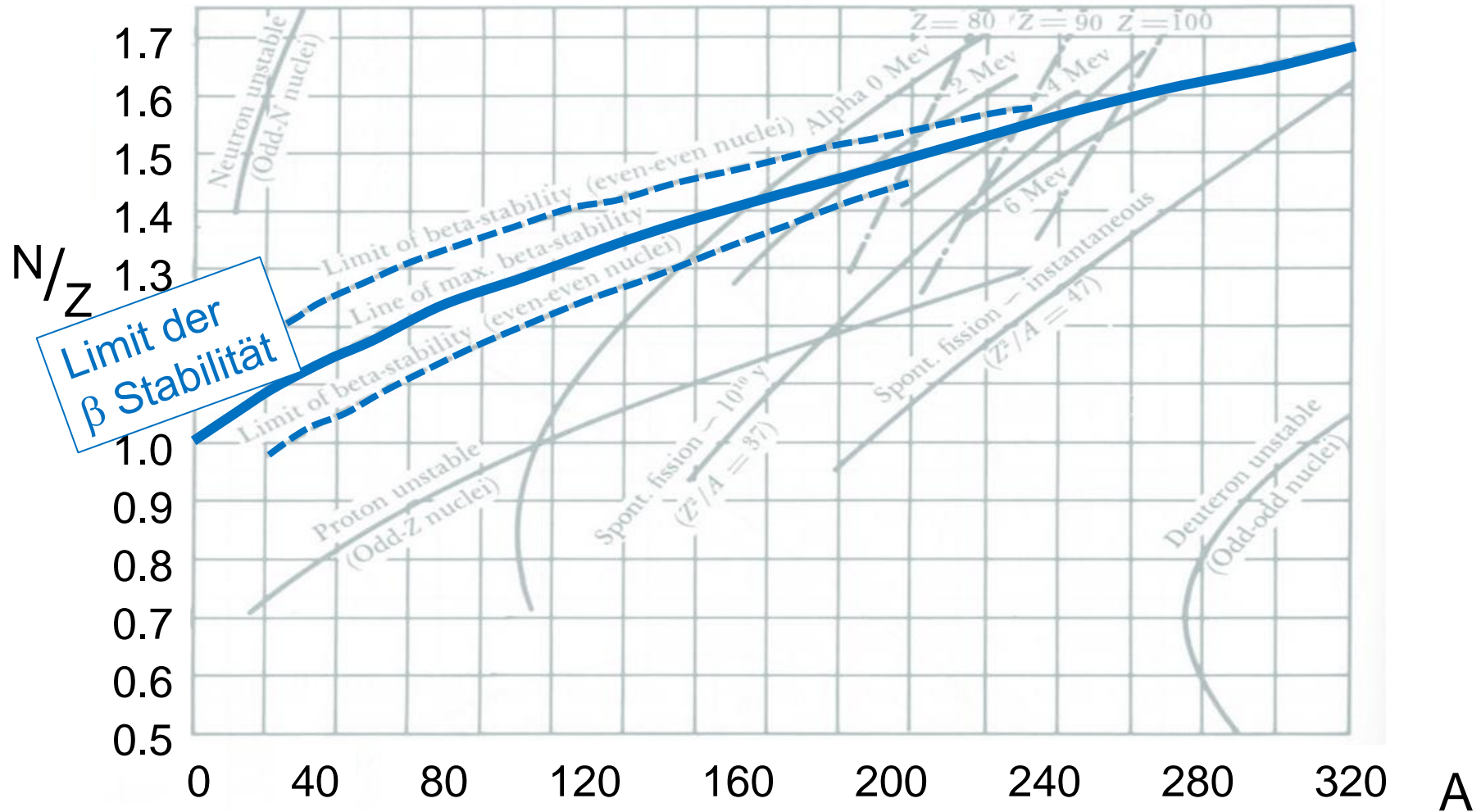
Sofortige Spontanspaltung erst ab:

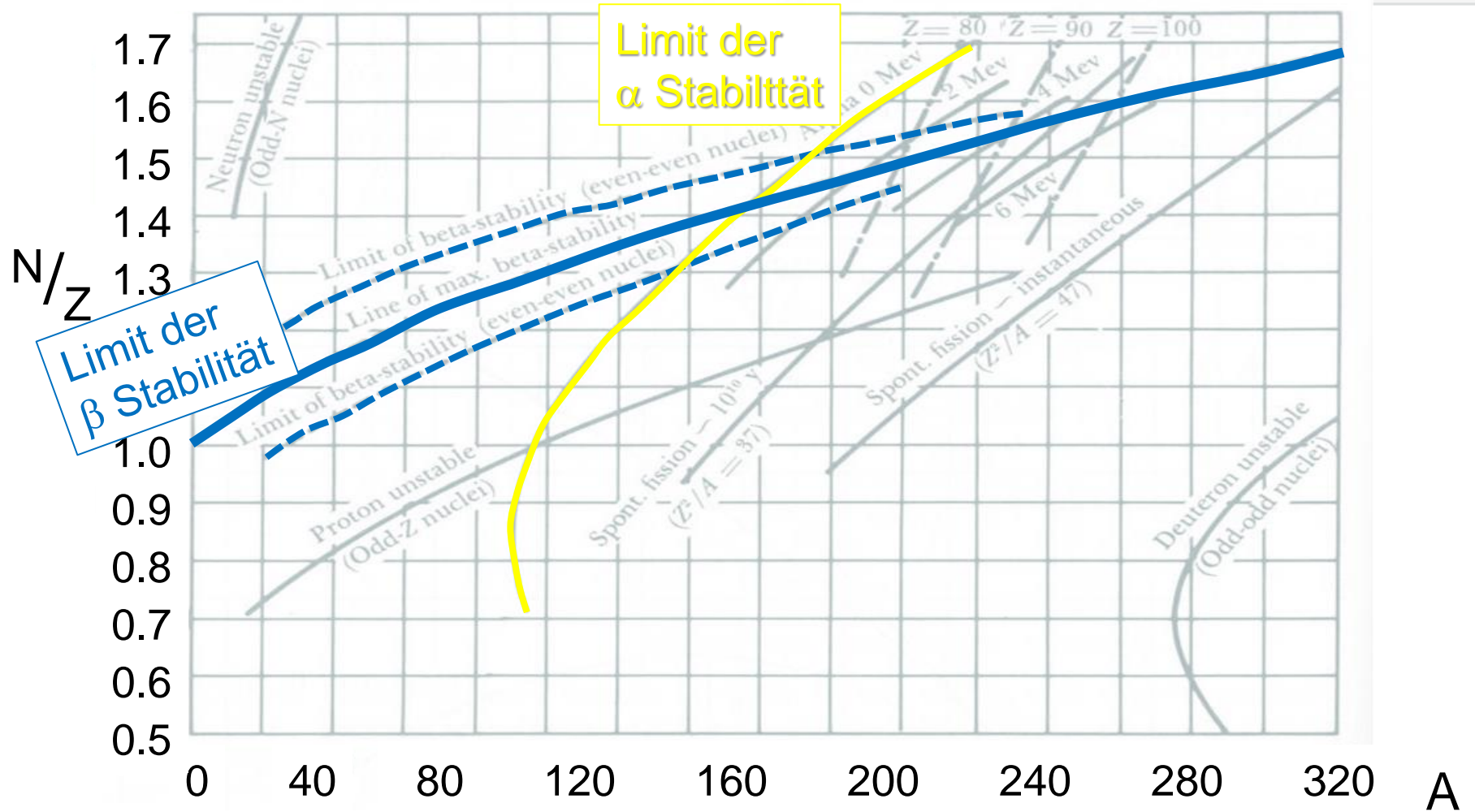
$$\frac{Z^2}{A} = 47$$

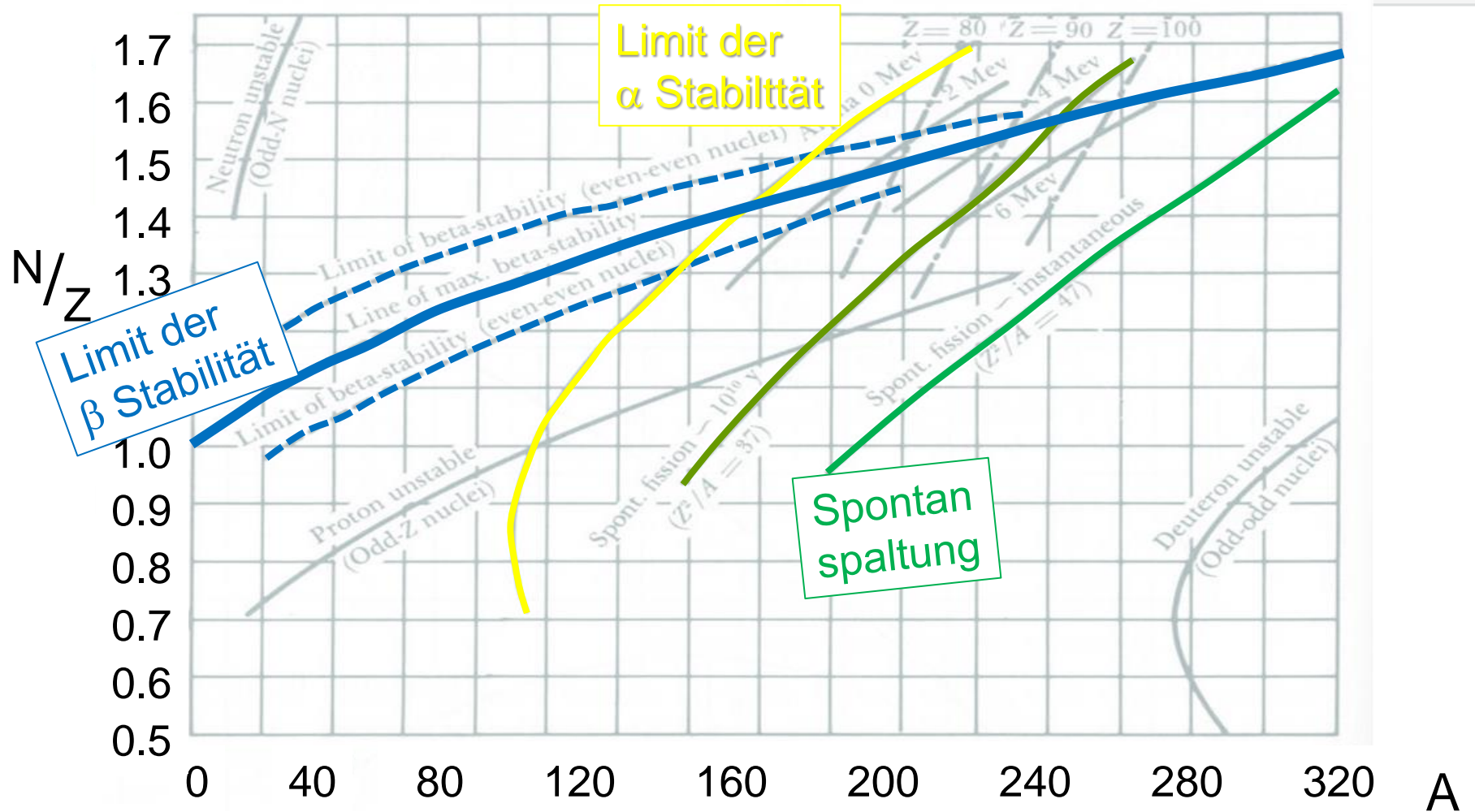




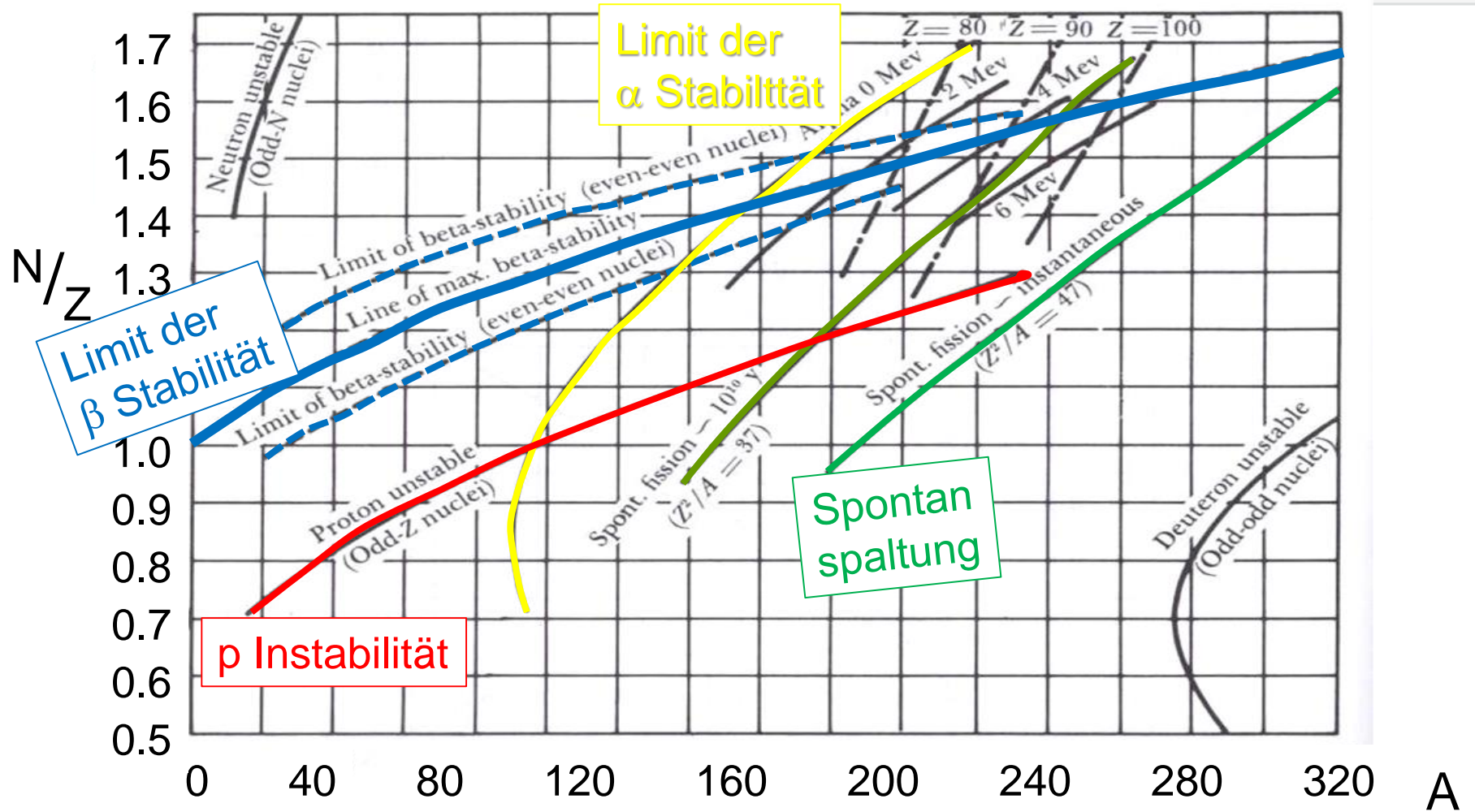
See also  
Radiochemistry  
and Nuclear Chemistry  
Rydberg, Liljenzin,  
Choppin













- **A Kernreaktion läuft von selbst ab**
- **B Die Produkte haben einen größeren Massenüberschuss als die Ausgangskerne**
- **C Die Produkte haben einen kleineren Massenüberschuss als die Ausgangskerne**
- **D Die Kernreaktion kann nicht ohne Zusatzenergie ablaufen**

## SMART Response Question

To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...





## Eingangszustand

## Ausgangszustand

Ruhemassen

$$\sum_i m_i \cdot c^2$$

$$\sum_j m_j \cdot c^2$$

Kinetische Energien

$$\sum_i E_{\text{kin},i}$$

**Kernreaktion**

$$\sum_j E_{\text{kin},j}$$

Anregungsenergien

$$\sum_i E_i^*$$

$$\sum_j E_j^*$$

---

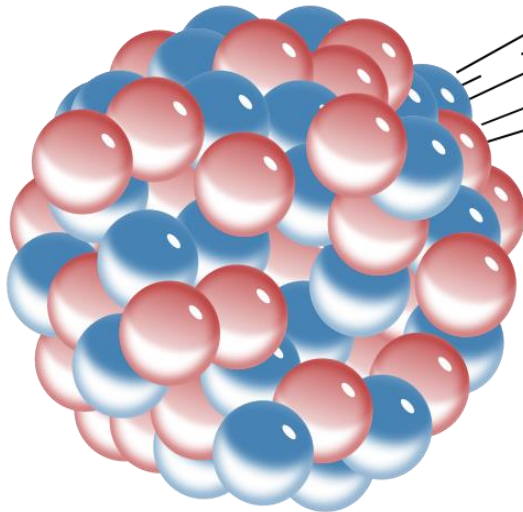
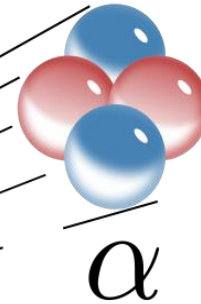
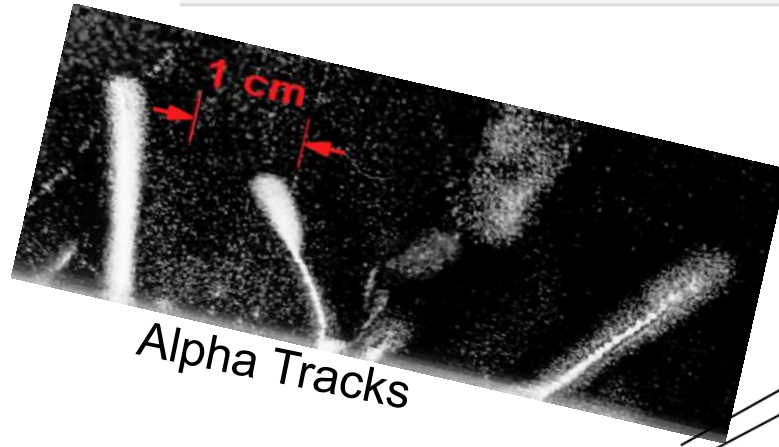

$$E_{\text{initial}}$$

---


$$E_{\text{final}}$$

**Q-Wert:  $Q = E_{\text{ein}} - E_{\text{aus}}$**



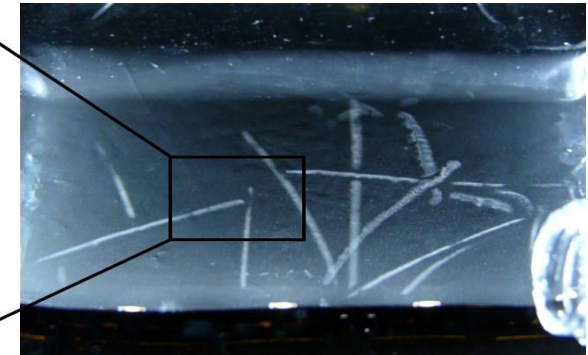
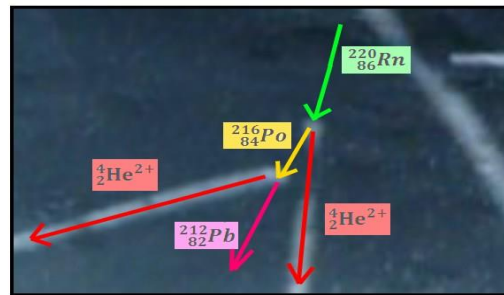


<http://25.media.tumblr.com>



Georg Gamow

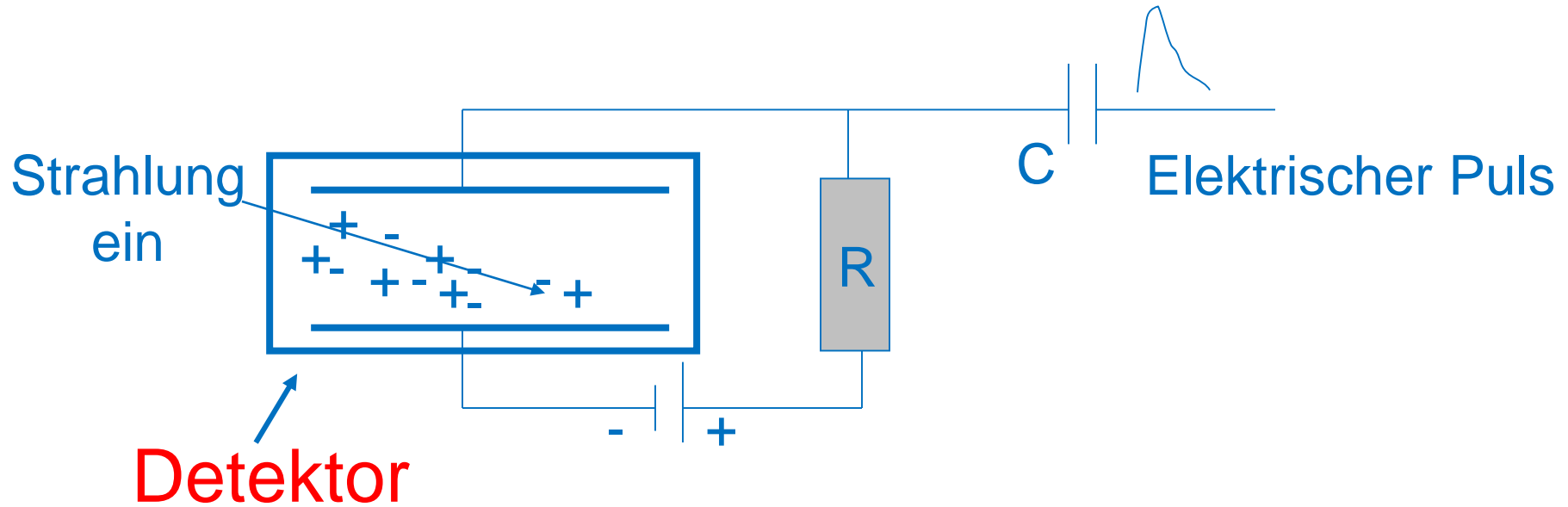
<http://de.wikipedia.org>

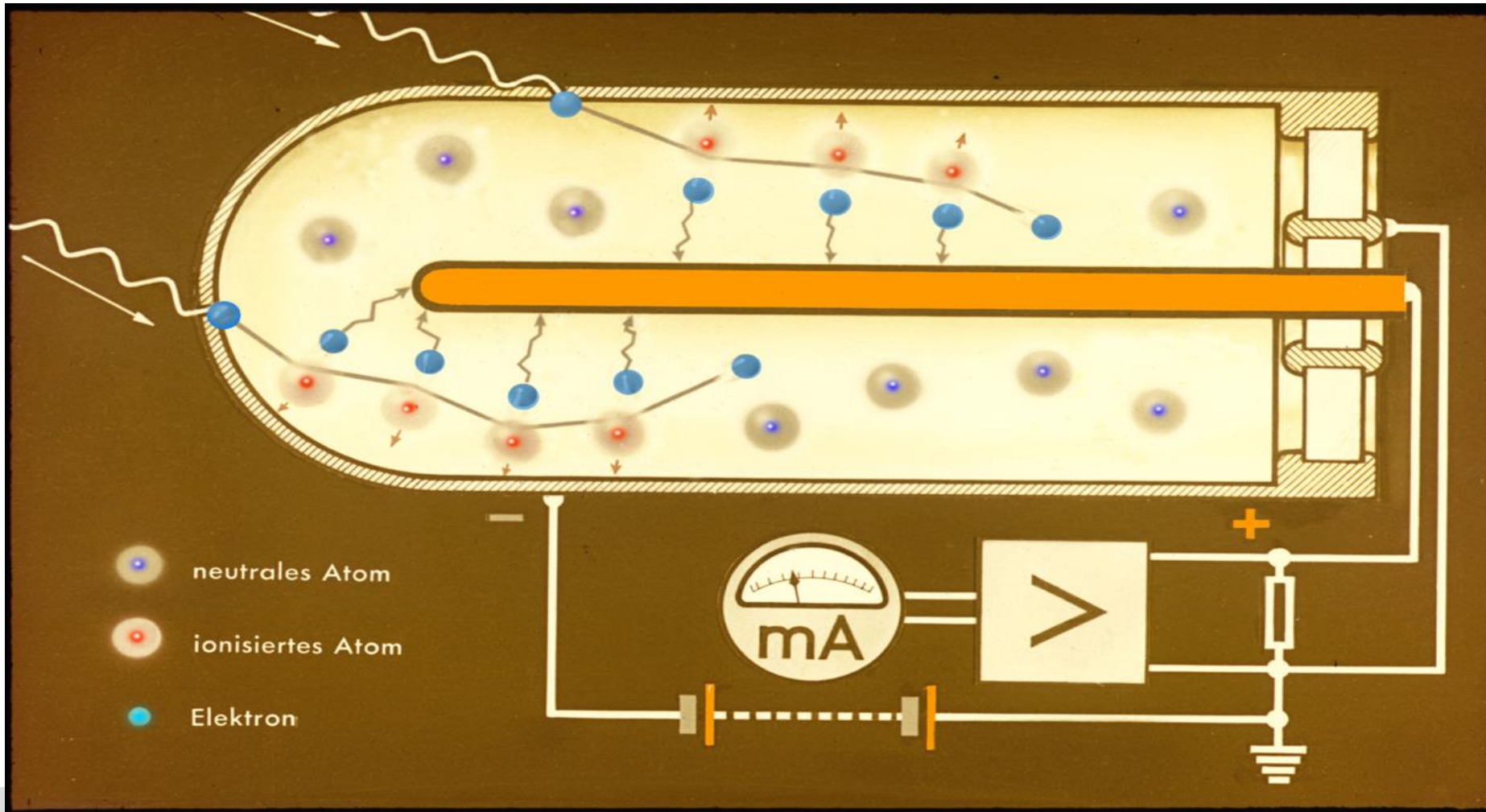


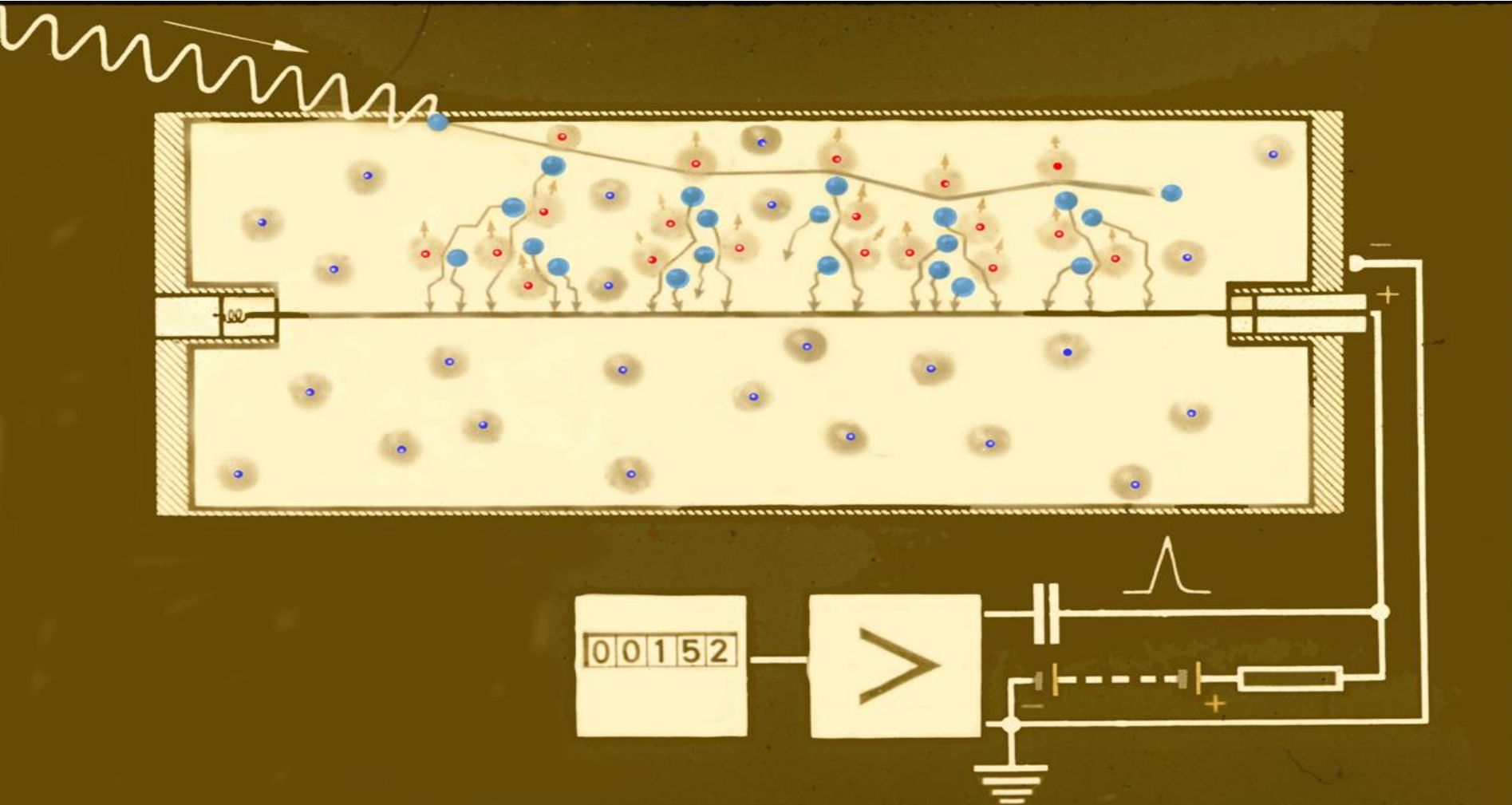
$\alpha$  Zerfall in der Nebelkammer

<http://chambrebrouillard.wifeo.com/alpha.php>

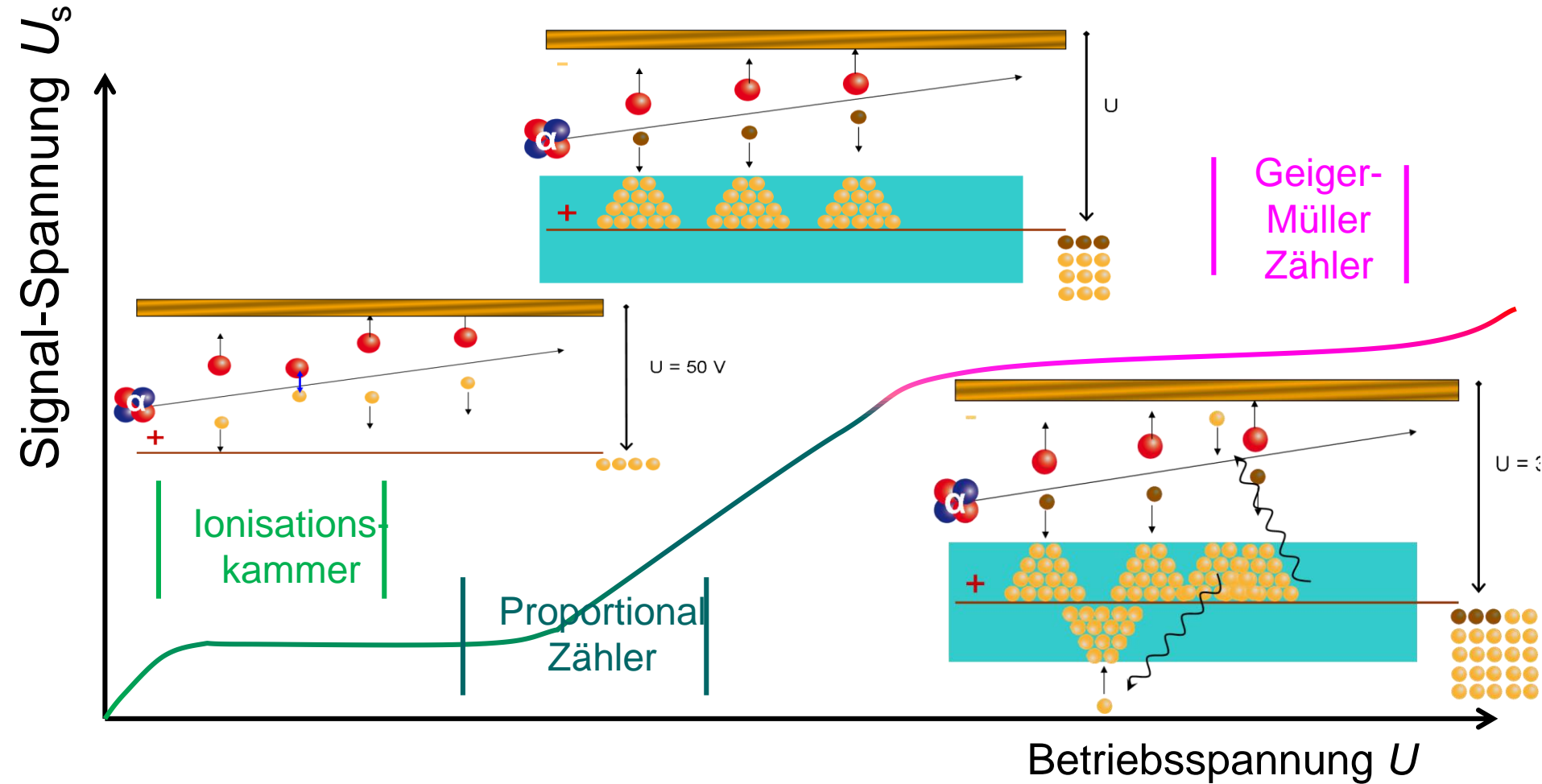




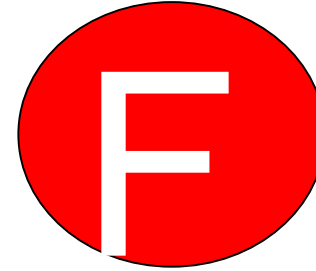
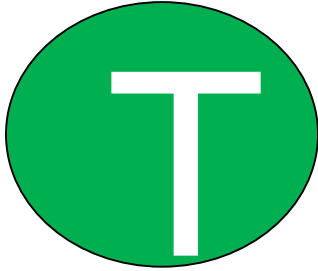








# Kann man mit jedem Geiger-Müller Zählrohr alpha Strahlen messen?



<http://www.automess.de>

## SMART Response Question

To set the properties right click and select  
SMART Response Question Object->Properties...



