

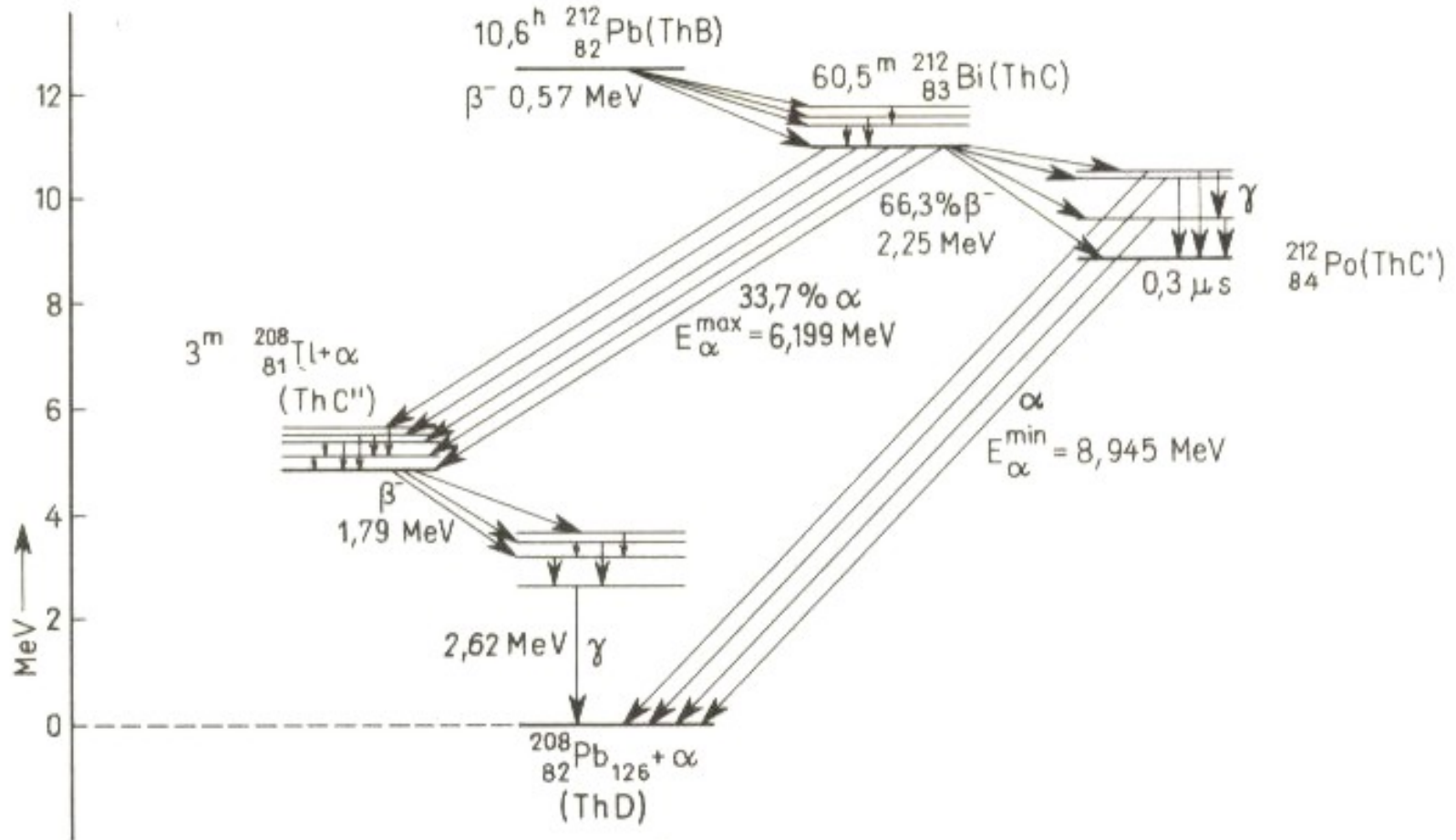
# Fortgeschrittene Experimentalphysik für Lehramtsstudierende Teil II: Kern- und Teilchenphysik



Prof. Markus Schumacher  
Sommersemester 2013

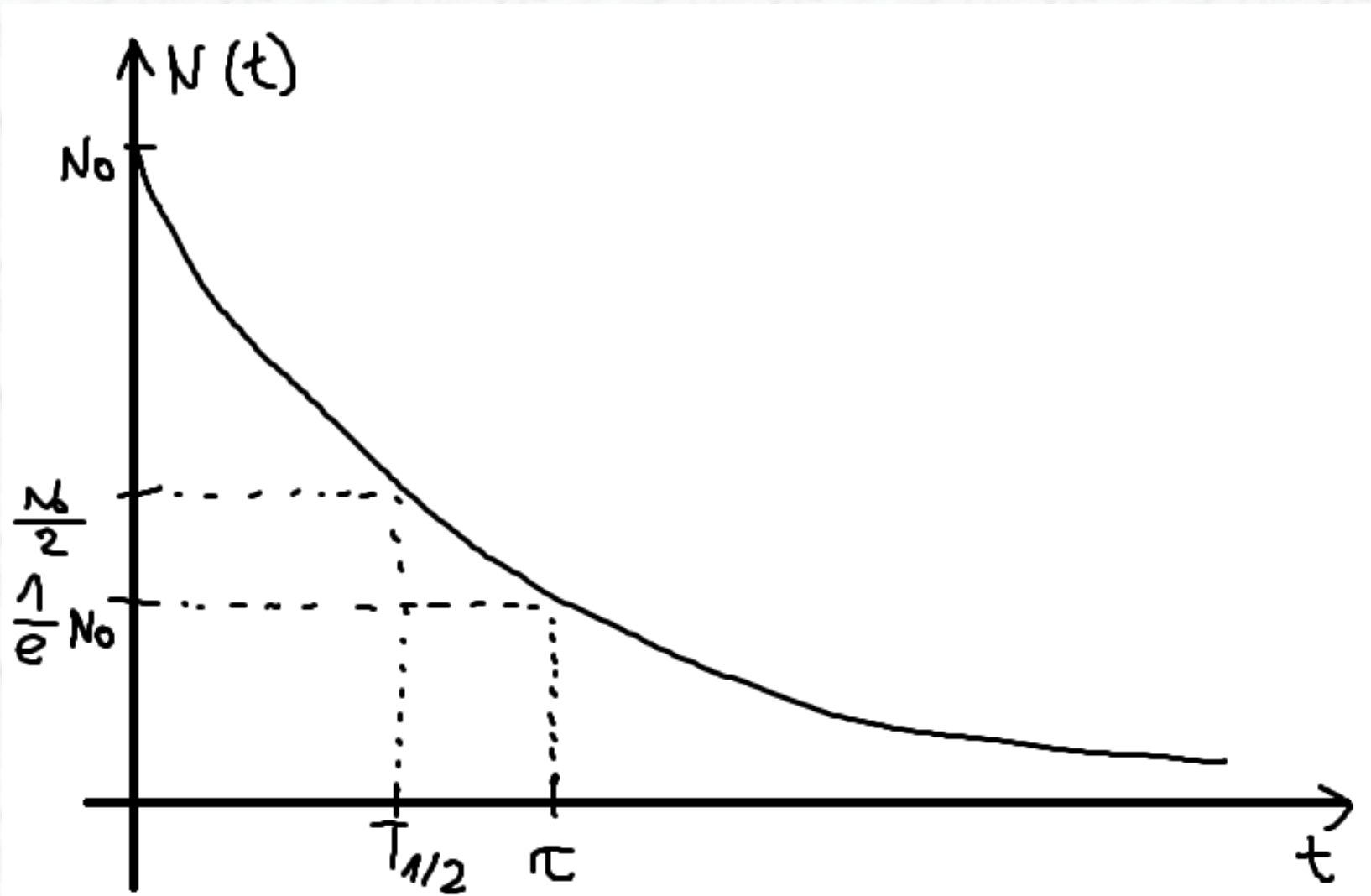
## Kapitel 4: Zerfälle instabiler Kerne

# Beispiel für radioaktive Zerfallsketten

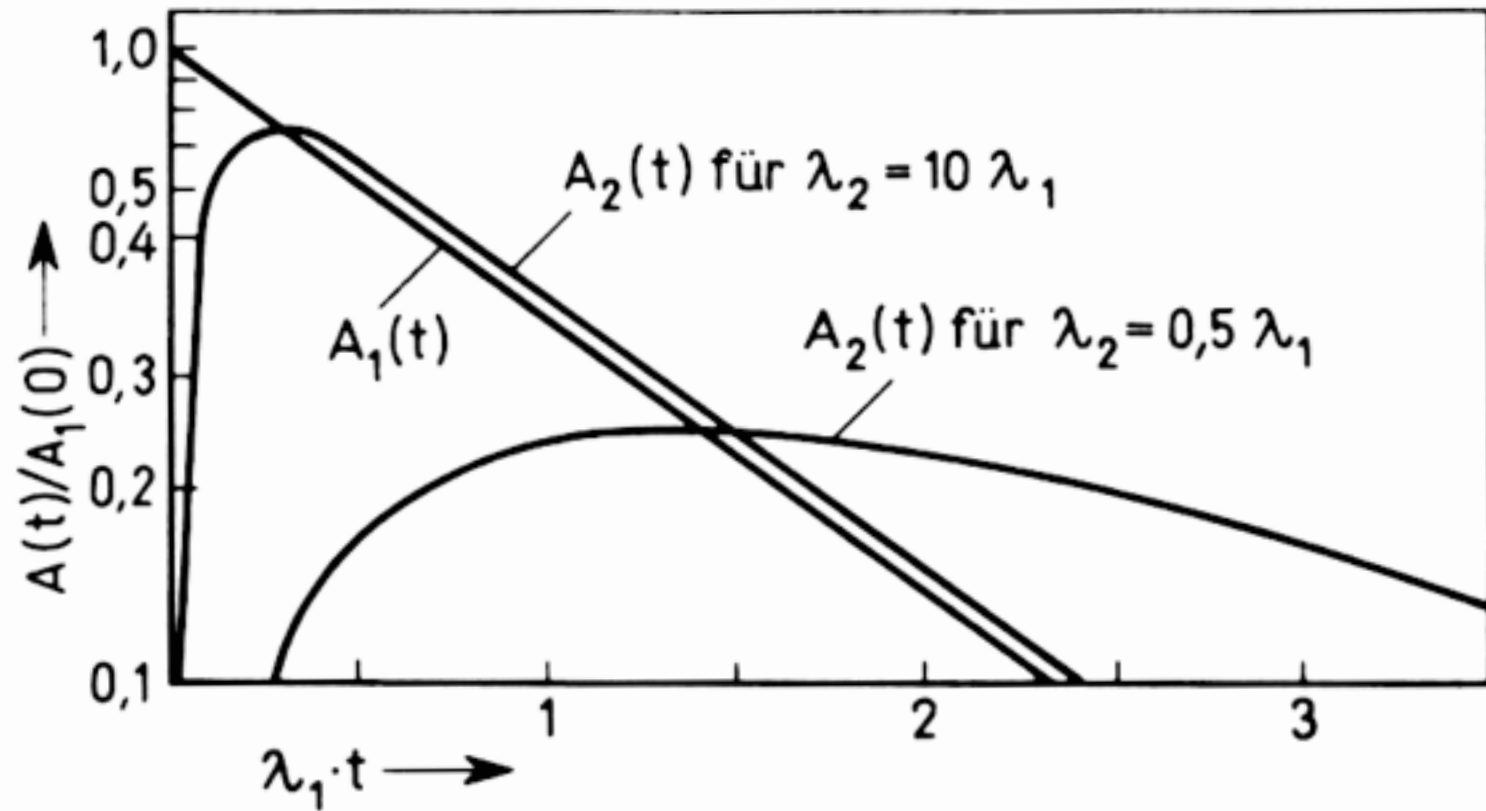


Zerfallsschema für ThB( $^{212}\text{Pb}$ ) mit Folgeprodukten, stark vereinfacht

# Halbwertszeit und mittlere Lebensdauer



## Aktivität in Zerfallsreihe $K1 \rightarrow K2 \rightarrow K3$



Beobachtung:

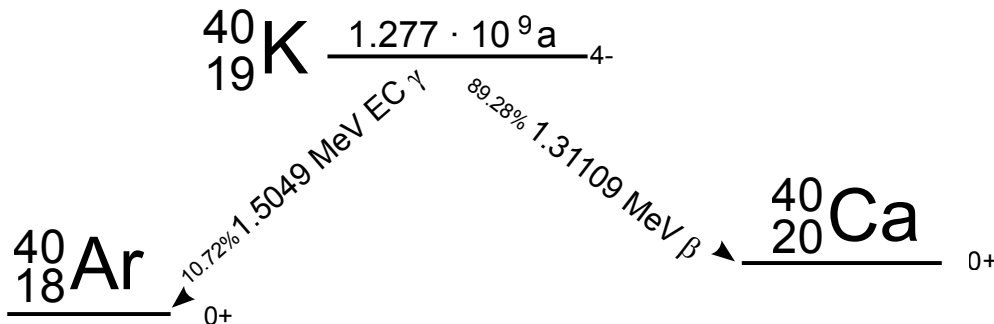
1) Maximum von  $A_2$  beim Schnittpunkt der Kurven von  $A_1$  und  $A_2$ .

2) Maximum bei  $t \approx$  kleineres  $\tau$ ; hier: 1.)  $t = 0,1 \tau_1, \lambda_1 t \approx 0,1$ ; 2.)  $t = \tau_1, \lambda_1 t \approx 1$

3) Abfall für große  $t$  wird vom größeren  $\tau$  bestimmt.

# Beispiele für radioaktive Quellen

Name	Kern	Zerfallsart	freigesetzte Energie (MeV)	Halbwertszeit (Jahre)
Tritium	${}^3_1\text{H}$	$\beta^-$	0.0186	12.3
Kalium	${}^{40}_{19}\text{K}$	$\beta^-$	1.31	$1.5 \cdot 10^9$
Cäsium	${}^{135}_{55}\text{Cs}$	$\beta^-$	0.21	$3.0 \cdot 10^6$
Radium	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	$\alpha$	4.77	1620
Uran	${}^{238}_{92}\text{U}$	$\alpha$	4.20	$4.5 \cdot 10^9$



Kalium-40 Zerfälle im Körper verursachen etwa 10% der natürlichen Strahlenbelastung.



# Einheiten

- 1. Aktivität:** 1 Becquerel Bq = 1 Zerfall / Sekunde  
Alte Einheit: Curie Ci:  $1 \text{ Bq} = 1 / (3.7 \times 10^{10}) \text{ Ci}$  (Curie)  
1 Ci ist die Aktivität von 1 g Radium-226 =  $3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .  
Die Aktivität des menschlichen Körpers ist etwa 3700 Bq  
(hauptsächlich von  $^{40}\text{K}$  und  $^{13}\text{C}$ ).
- 2. Absorbierte Dose:** Gray Gy:  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} = 6.24 \cdot 10^{12} \text{ MeV/kg}$   
Alte Einheit: rad :  $1 \text{ Gy} = 10^4 \text{ erg/g} = 100 \text{ rad}$
- 3. Ladungsdosis, Ionendosis:** Erzeugte Ladungsdichte durch radioaktive Strahlung  
Einheit: 1 Coulomb/kg  
Alte Einheit Röntgen:  $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
- 4. Equivalente Dosis:** Berücksichtigt den Schaden in biologischem Gewebe  
Einheit Sievert Sv:  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot w_R$   
Alte Einheit: rem (Röntgen equivalent for man):  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

# Relative biologische Wirkungsfaktoren $W_R$ (RBW)

Radiation type	$w_R$	von PDG
Photons, electrons and muons	1	
Neutrons, $E_n < 1$ MeV	$2.5 + 18.2 \times \exp[-(\ln E_n)^2/6]$	
$1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5.0 + 17.0 \times \exp[-(\ln(2E_n))^2/6]$	
$E_n > 50 \text{ MeV}$	$2.5 + 3.25 \times \exp[-(\ln(0.04E_n))^2/6]$	
Protons and charged pions	2	
Alpha particles, fission fragments, heavy ions	20	

<b>Approximiert:</b>	Neutrons < 10 keV	5
	10–100 keV	10
	> 100 keV to 2 MeV	20
	2–20 MeV	10
	> 20 MeV	5

# Strahlungsbelastung und Strahlungsschäden

## Natürliche Strahlenbelastung:

Die jährliche Ganzkörperstrahlenbelastung durch natürliche Quellen beträgt **1-13 mSv** mit einem Mittelwert von **2.4 mSv**. Der größte Anteil kommt von Radongas (0.1-0.2 mSv Draußen, 2 mSv im Haus, 20 mSv in Minen).

## Kosmische Strahlung: Hauptsächlich Myonen.

Typische Werte: **0.1  $\mu$ Sv / h** auf Meereshöhe (= **0.9 mSv / y**)

einige  $\mu$ Sv / h im Flugzeug: bei **5  $\mu$ Sv / h** und **100 h Flug/Jahr** → **0.5 mSv/y**

Man unterscheidet zwei Arten von Gesundheitsschäden: deterministisch und stochastisch.

### 1. Deterministisch

Schädigungen von Zellen tritt nur auf, wenn eine bestimmte Dosis überschritten wird. Die Stärke der Schädigungen ist proportional zur absorbierten Dosis (Gray).

### 2. Stochastisch

DNA Schäden (Vererbungs, Krebs) können bei jeder Dosis entstehen. Die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens (aber nicht die Stärke der Schädigung) ist proportional zur Dosis ohne untere Schwelle.

### 3. Tödliche Dosis

Bei **2.5-4.5 Gy** Ganzkörperdosis beträgt die Sterblichkeitsrate **50%** in **30 Tagen**.

### 4. Krebswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit Krebs zu bekommen beträgt **5%** pro Sv.

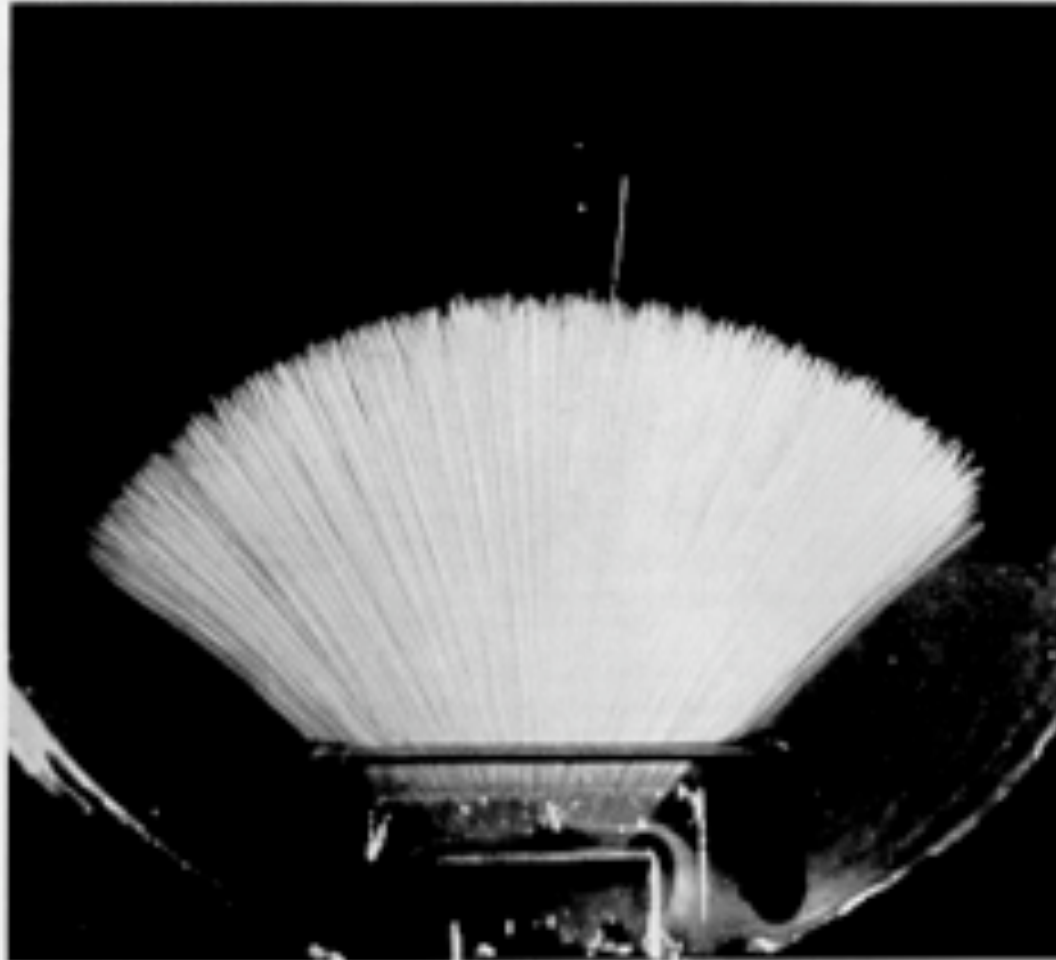
### 5. Empfohlene Grenzwerte (Ganzkörperdosis):

ICRP Empfehlung, Richtwerte in EU und CH:

Equivalent Dosis **< 20 mSv / y** gemittelt über **5 Jahre**, in keinem Jahr mehr als **50 mSv**.



# Alpha-Teilchen in Nebelkammer



*Fig. 13. K. Przire, Naturwiss. 14, 1203 (1926).*

Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen in Gas,  
gemessen mit einer Nebelkammer, Philips 1926

# Alpha-Spektrum im Americium-Zerfall

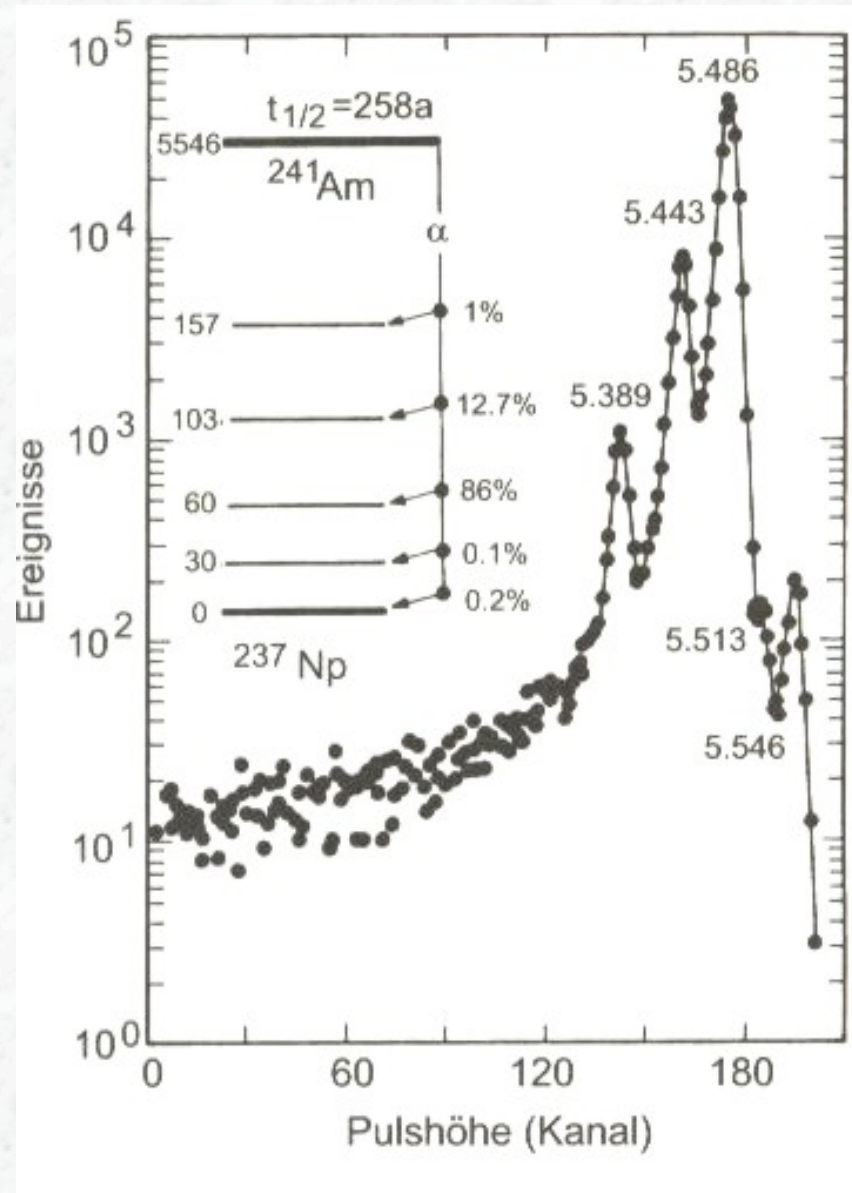
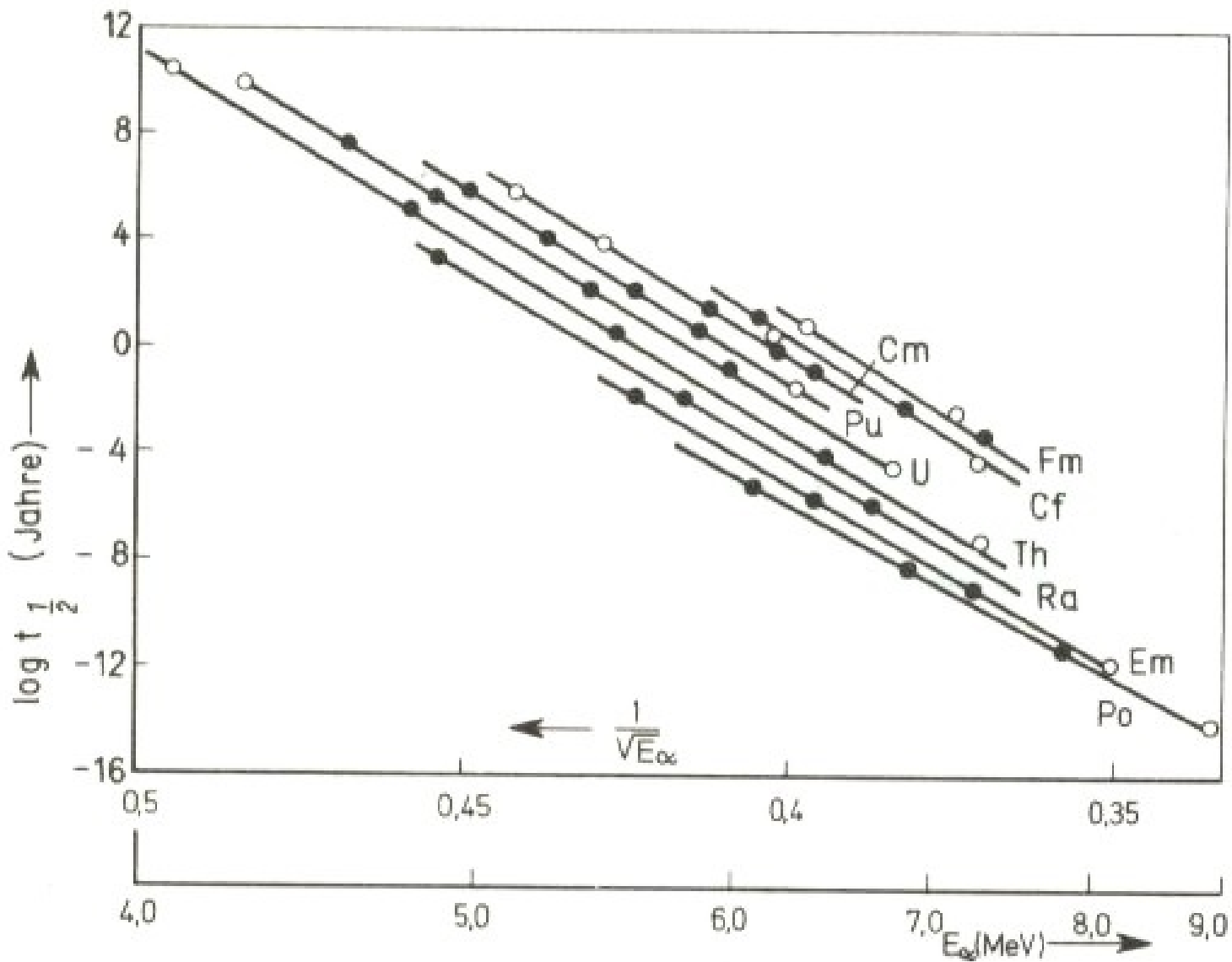


Abbildung 3.6:  $\alpha$ -Zerfallsspektrum von Americium  $^{241}\text{Am}$  (aus Ref. [4])

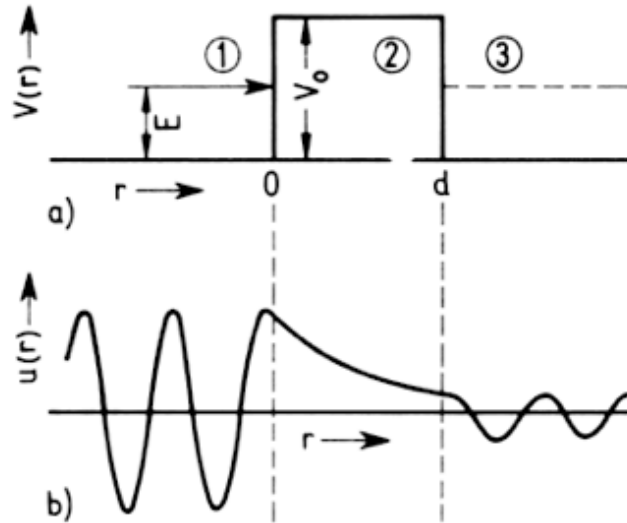
# Geiger-Nuttal-Regel



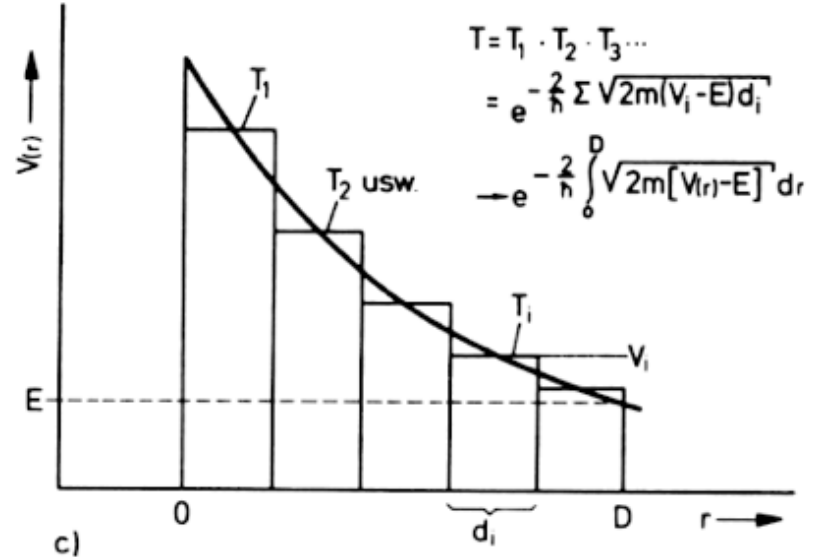
# Zur Berechnung des Gamov-Faktors

SE  
ER

## Rechteckpotential



## Coulombpotential



Schrödinger-Gl.: 
$$\frac{d^2 u(r)}{dr^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - V_0] u(r) = 0$$

$$\frac{d^2 u(r)}{dr^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(r)] u(r) = 0$$

Transmissionskoeffizient:

$$T = T_0 \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V_0 - E)} d\right]$$

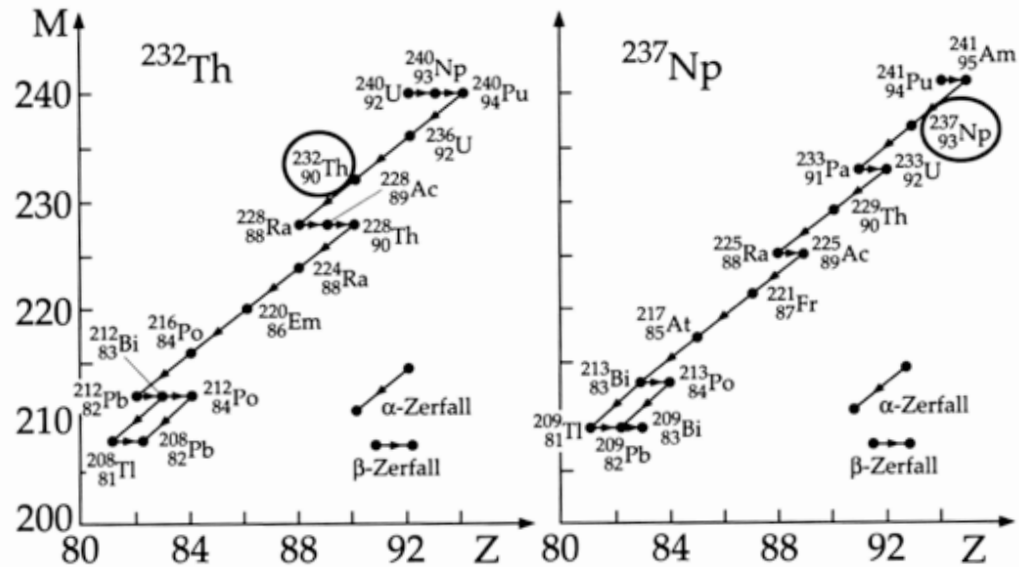
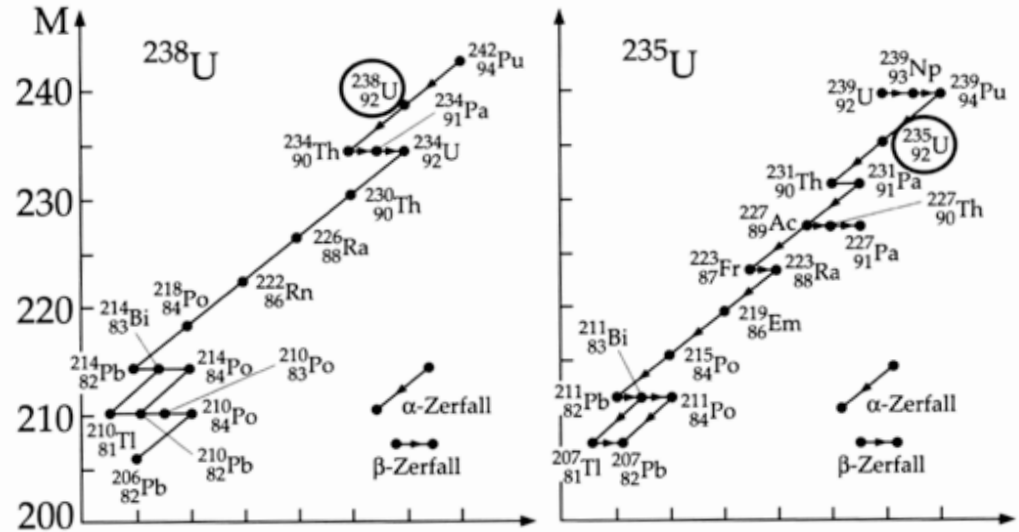
$$T = T_0 \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_0^D \sqrt{2m(V(r) - E)} dr\right]$$

# Zerfallsreihen

Bei Zerfällen sehr schwerer Kerne, z.B. **Uran**, beobachtet man eine Sequenz von Zerfällen, die schließlich in einem stabilen Kern (**Blei**) endet.

Die **Zerfallsreihen** werden nach den **Hauptelementen** benannt, die in den Zerfällen vorkommen.

Wichtig sind die **Uran-Radium-Reihe**, **Uran-Actinium-Reihe**, **Thorium-Reihe**, **Neptunium-Reihe**.

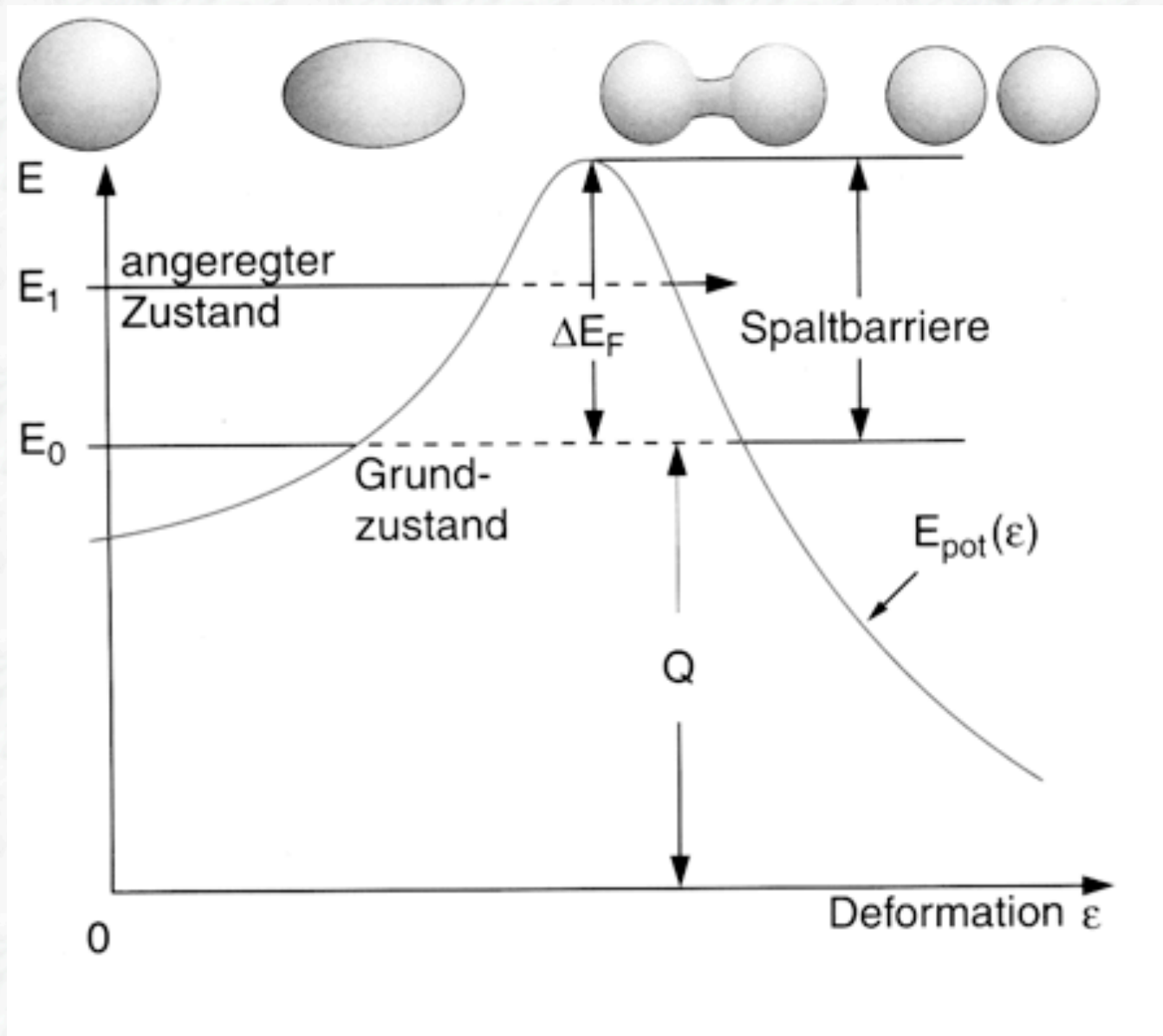


Natürliche Zerfallsreihen. Die Zerfallsreihe, die beim Neptunium beginnt, kommt in der Natur wegen der vergleichsweise kurzen Halbwertszeit nicht mehr vor. Diese Elemente sind jedoch zur Zeit der Entstehung der Erde ebenfalls vorhanden gewesen

Nomenklatur	Mutternuklid	Halbwertszeit	Endprodukt	Zerfälle
4n	$^{232}\text{Th}$	$1.405 \cdot 10^{10}$ a	$^{208}\text{Pb}$	$6\alpha, 4\beta^-$
4n+1	$^{237}\text{Np}$	$2.14 \cdot 10^6$ a	$^{209}\text{Bi}$	$7\alpha, 4\beta^-$
4n+2	$^{238}\text{U}$	$4.468 \cdot 10^9$ a	$^{206}\text{Pb}$	$\begin{cases} 8\alpha, 6\beta^- \\ 10\alpha, 8\beta^- \end{cases}$
4n+3	$^{235}\text{U}$	$7.038 \cdot 10^8$ a	$^{207}\text{Pb}$	$7\alpha, 4\beta^-$

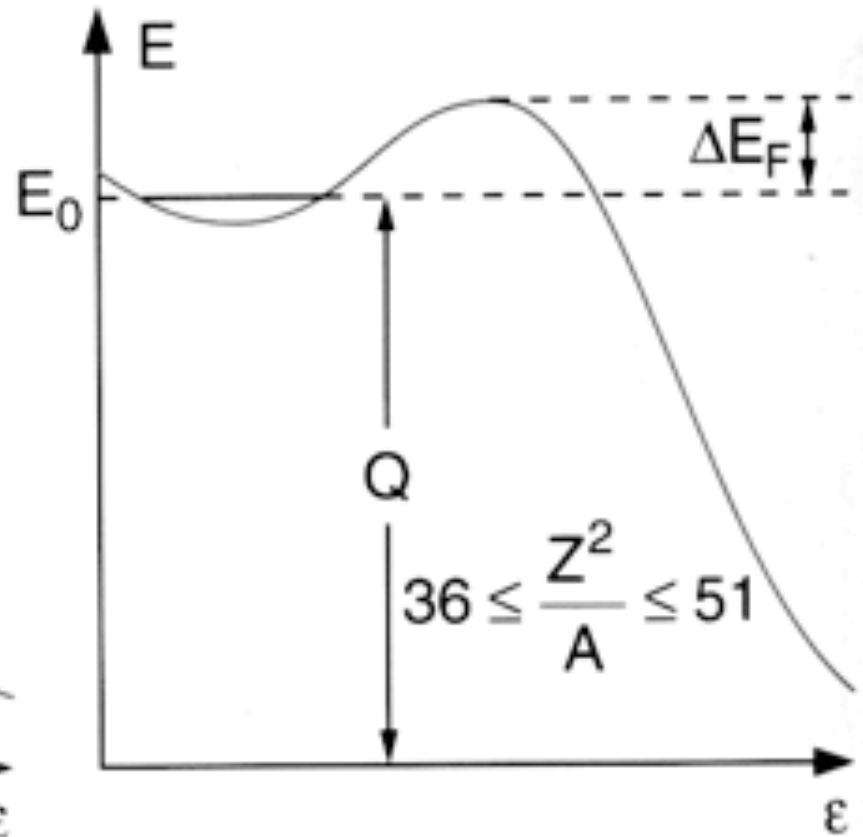
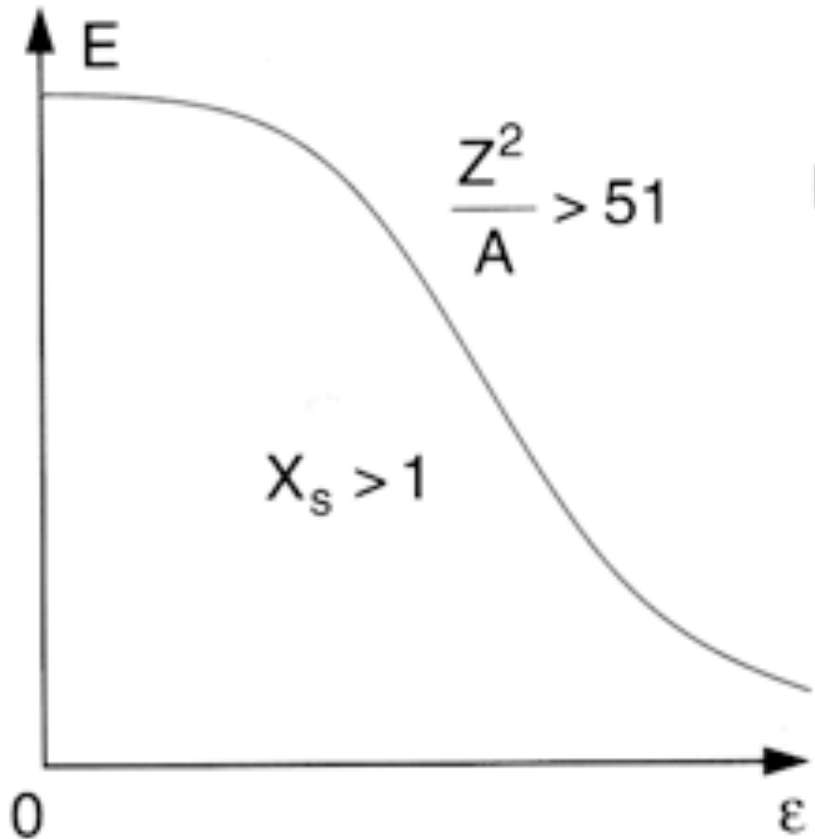


# Zur Potentialbarriere bei der Kernspaltung

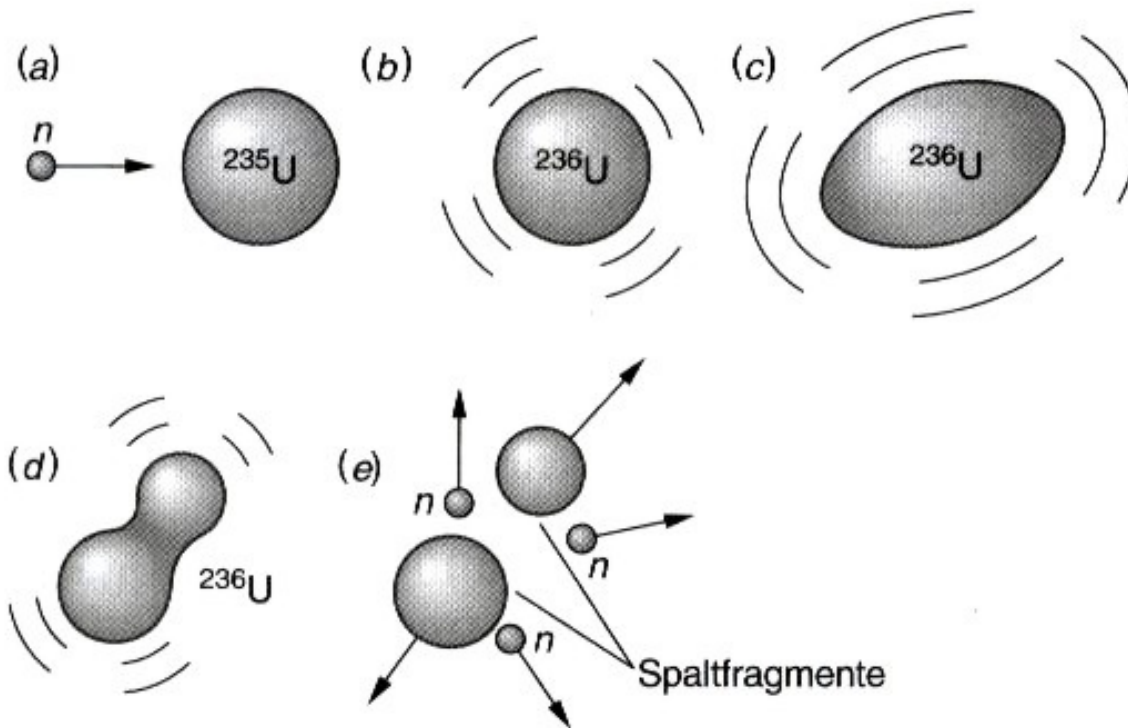




# Zur Potentialbarriere bei der Kernspaltung

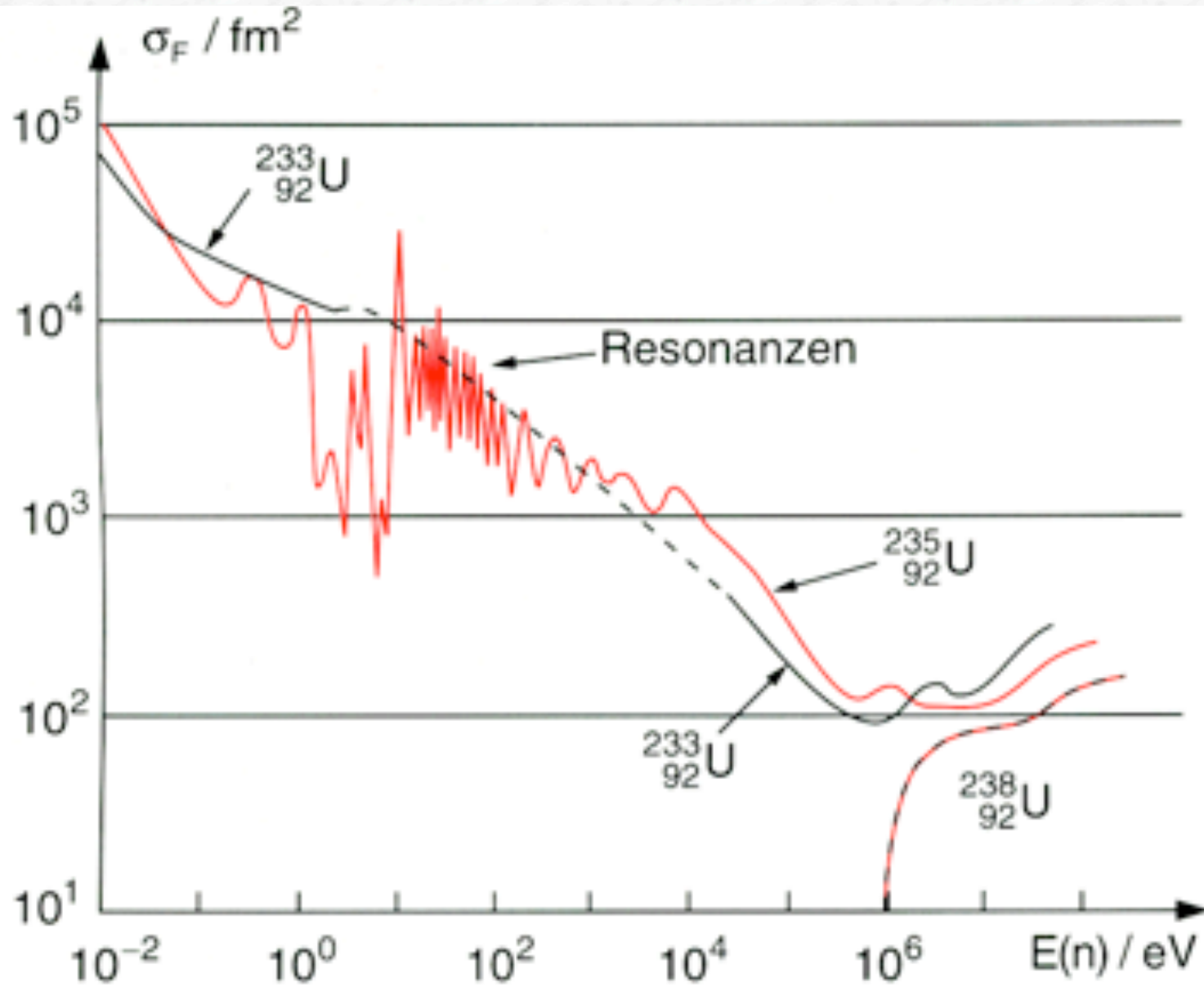


# Anschauung zur induzierten Spaltung

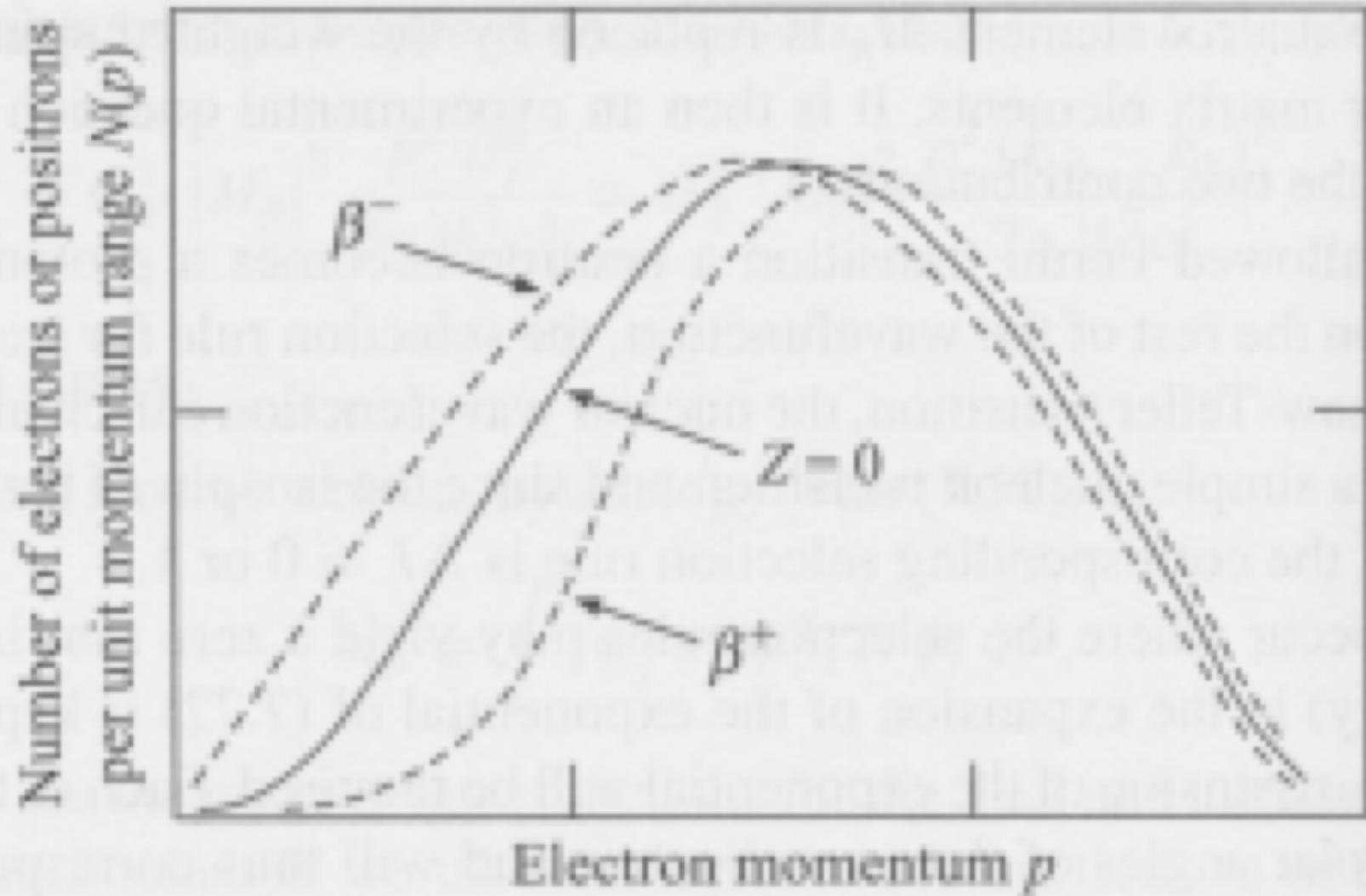


Schema einer Kernspaltung. Die Absorption eines Neutrons durch  $^{235}\text{U}$  (a) führt zu einem angeregten Zustand von  $^{236}\text{U}$  (b). Dieser angeregte Kern wird durch Schwingungen verformt (c), der schwingende Kern wird instabil (d) und zerfällt in zwei Bruchstücke (e) mittlerer Massenzahl unter Emission mehrerer Neutronen, die ihrerseits die Spaltung weiterer Kerne auslösen können.

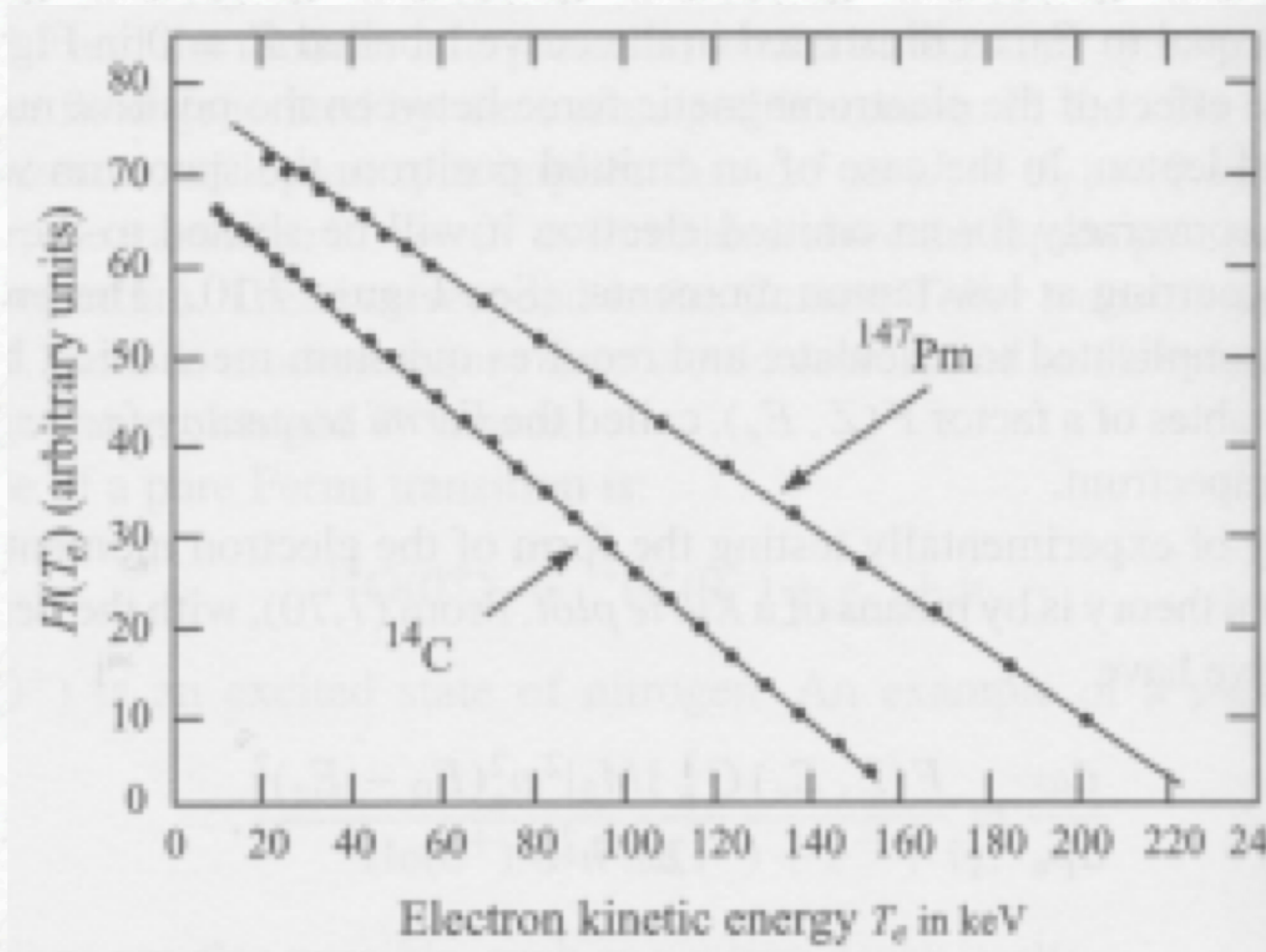
# Wirkungsquerschnitt für induzierte Spaltung



# Elektronspektrum im Beta-Zerfall

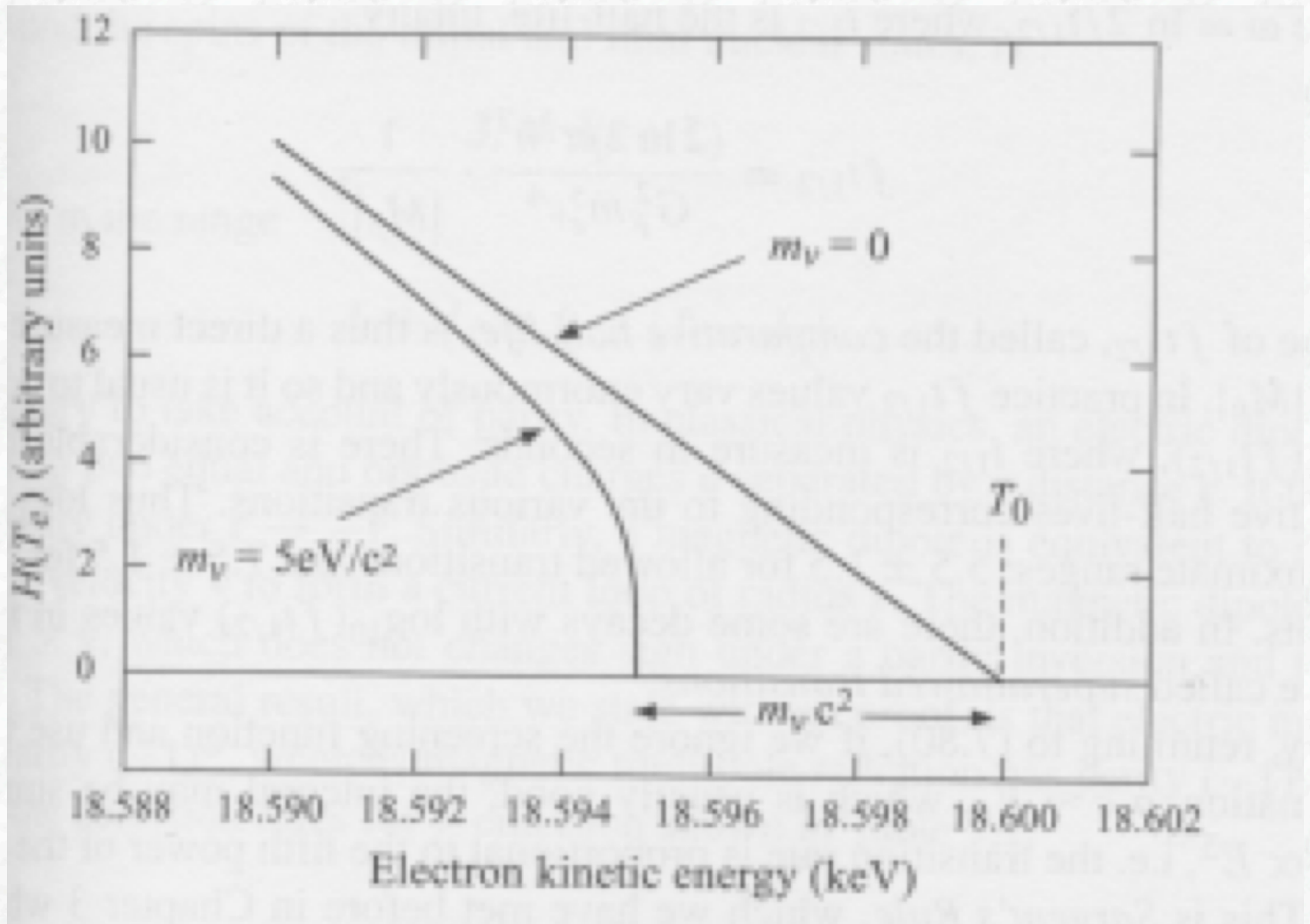


# Elektronspektrum im Beta-Zerfall: Kurie-Darstellung





# Kurie-Darstellung in der Nähe des Endpunktes





# Bestimmung der Neutrinomasse

58

Messung des  $\beta$ -Spektrums mit **Magnetspektrometern**.

Die Fermi-Darstellung eignet sich gut zur Messung der **Neutrinomasse**. Am besten geeignet ist **Tritium** ( $E_0=18$  keV)

Messung: Elektron-Neutrino Masse:  $m_\nu < 2$  eV

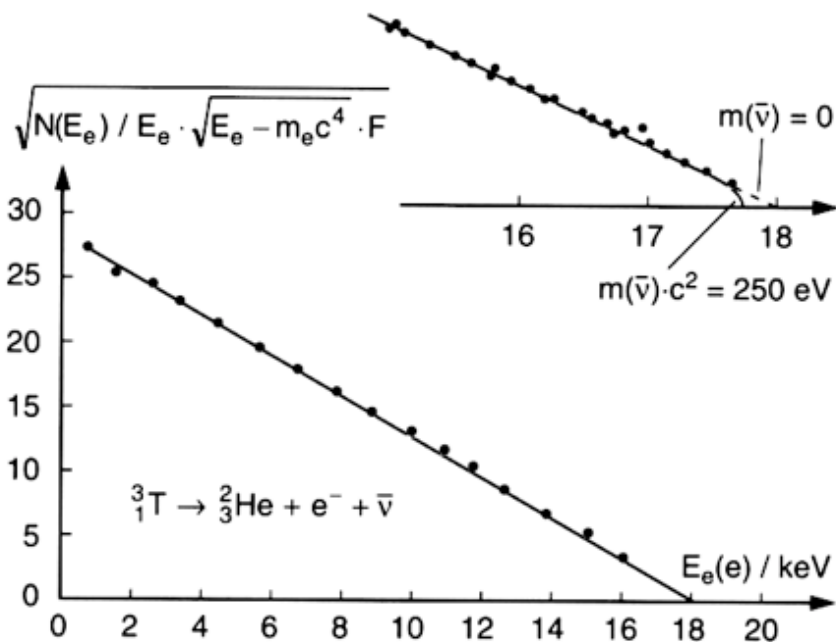
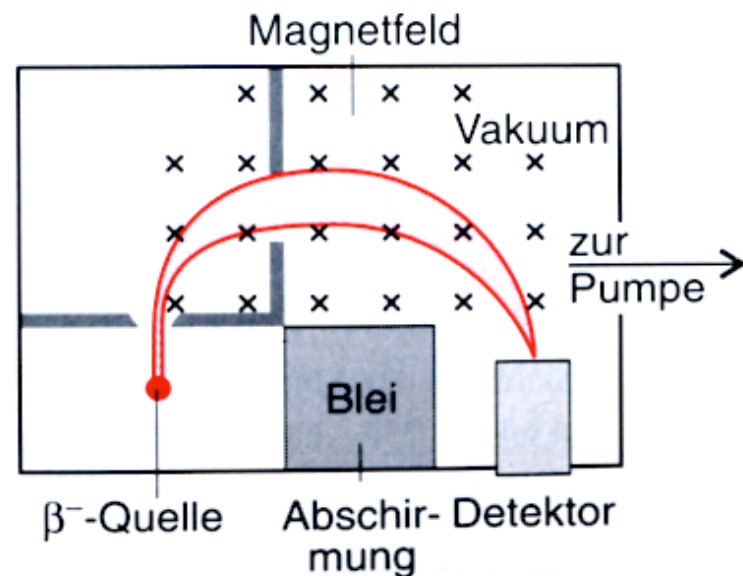


Abb. 3.26. Fermi-Kurie-Diagramm für den  $\beta^-$ -Zerfall des Tritiums  ${}^3_1\text{T}$

