RC - 03

1.3 Umwandlungsgesetz, Gleichgewichte

Radioaktivität und Kernumwandlung

- **spontane Umwandlung instabiler Kerne unter Energieabgabe**
- **Energieabgabe erfolgt in Form ionisierender Strahlung**
  * direkt vom Atomkern aus
  * indirekt durch die Kernumwandlung in der Elektronenhülle   erzeugt
- **Energetisches ungünstiges N/P-Verhältnis ändern:**
  * **Abgabe von Nukleonen erfordert Energie > 8 MeV, deshalb Abgabe von Nukleonen aus dem Grundzustand kaum möglich,**

andere Arten der Umwandlung energetisch günstiger

- **Arten der Umwandlungen:**

  Alphaumwandlung
  Betaumwandlung (β^-, β^+, Elektroneneinfang)
  Gammaübergänge (γ-Strahlung, Kernisomerie, innere Konversion, Mößbauer Effekt)
  spontane Kernspaltung
  spontane Nukleonenemission
  spontane Emission schwerer Teilchen

Emission von Teilchen oder Energiequanten

α-Strahlung:

Emission eines ^{4}He-Kernes: $^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + \alpha$

β-Strahlung:

Emission eines Elektrons: $^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^{-} + \nu$

oder

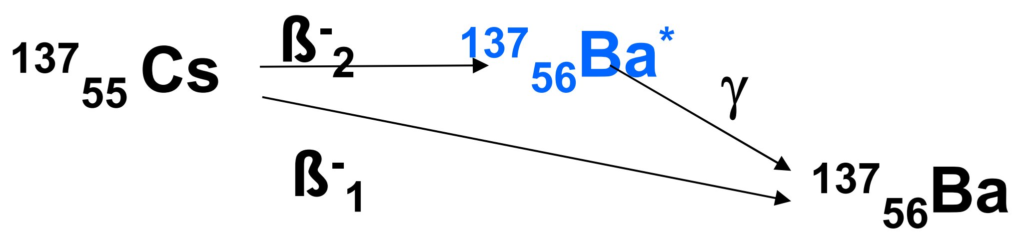
Emission eines Positrons: $^{40}_{19}K \rightarrow {}^{40}_{18}Ar + e^{+} + \nu$

oder

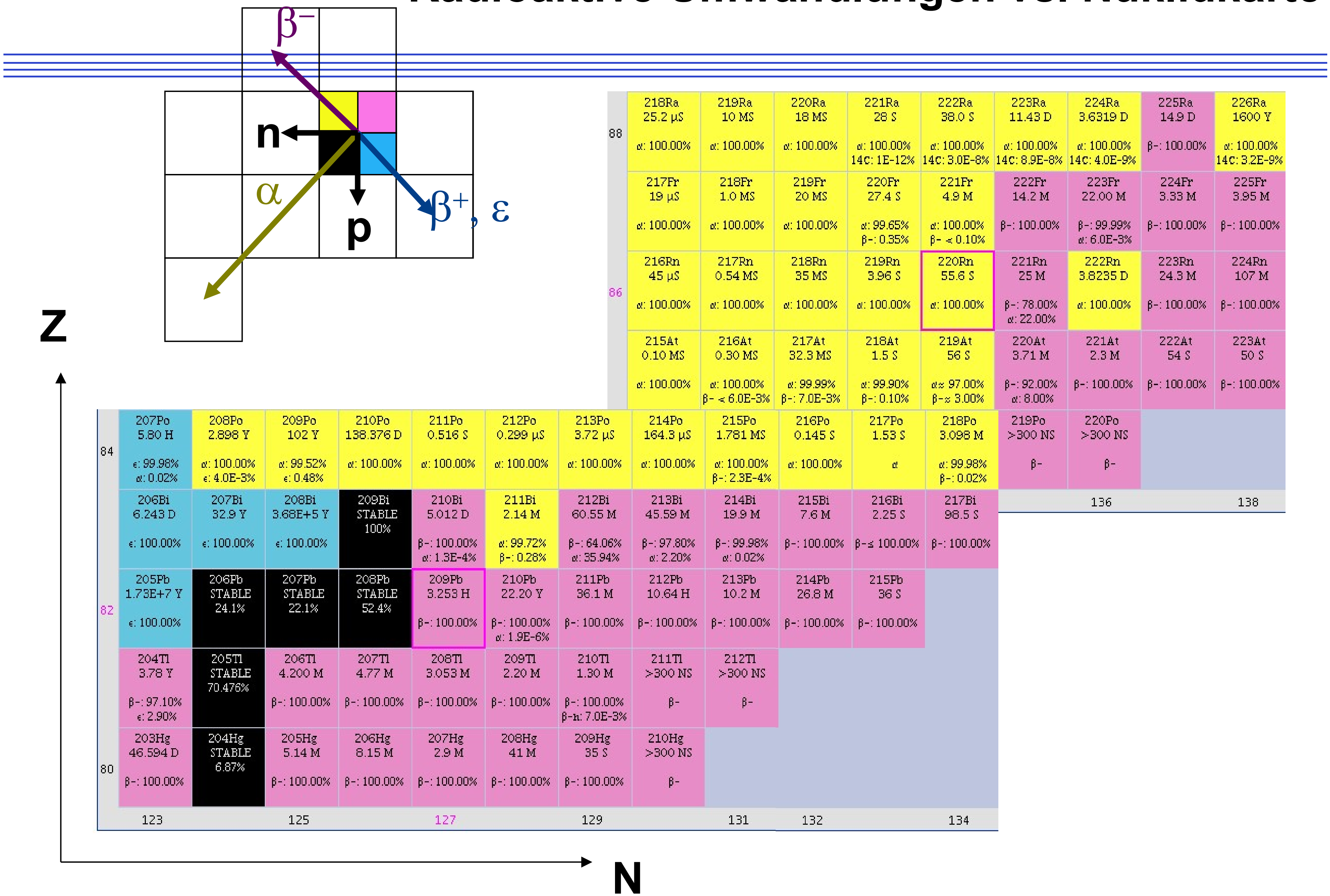
Elektroneneinfang: $^{40}_{19}K + e^{-} \rightarrow {}^{40}_{18}Ar + \nu$

γ-Strahlung:

Emission energiereicher elektromagnetischer Strahlung (γ-Quanten oder Photonen)

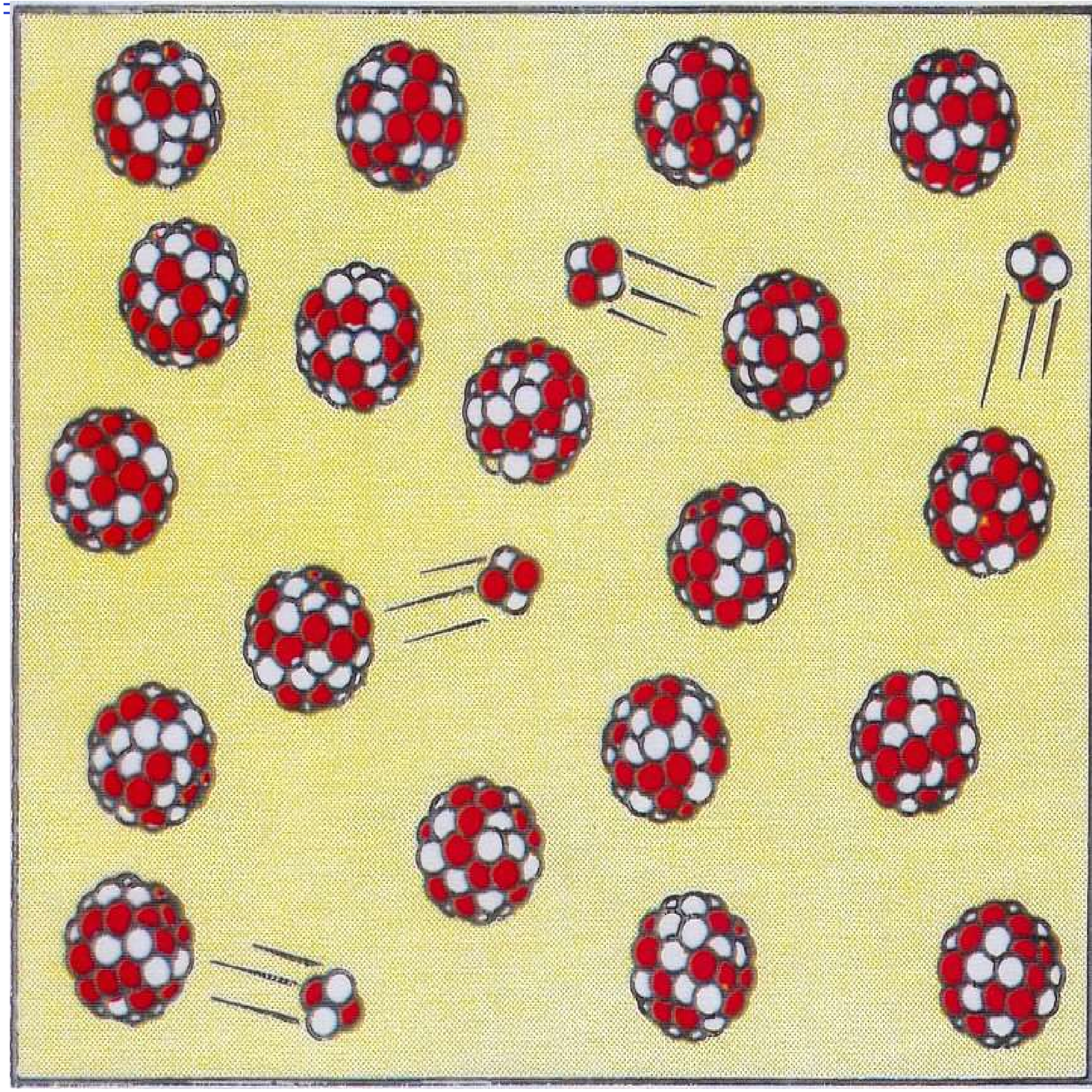


Radioaktive Umwandlungen vs. Nuklidkarte



- Umwandlungsgesetz

Radioaktive Umwandlung



?

- Auf welche Art,
- Welche Zeitdauer,
- Welcher Atomkern,
- Wie messbar,
- Welche Gesetzmäßigkeit,
- Welche Energie,
- Welche Strahlungsart,
- Welche Endprodukte,
- Welche Wirkung,
- Welcher Schutz,
- Einfluss von chem., phys. Parametern

10.)

Umwandlungsgesetz (Zerfallsgesetz)

- bei großer Anzahl von Kernen kann man angeben, wie viele Umwandlungen sich im Zeitintervall ereignen

- zum Zeitpunkt t, in einheitlicher Substanz N Atome, dann wandeln sich im Zeitintervall dt im Mittel

$dN = -\lambda N dt$ um.

λ = Umwandlungskonstante/Zerfallskonstante

- Die Integration ergibt:

$$\int_{N(0)}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt,$$

- ln $N(t)$ – ln$N(0) = -\lambda t$, daraus folgt das exponentielle Umwandlungsgesetz

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

$N(t)$ = Zahl der Atome zur Zeit t

$N(0)$ = Ausgangszahl zur Zeit $t = 0$

- Im gleichen Zeitintervall wandelt sich stets die gleiche Anzahl der Teilchen um: $\tau = 1/\lambda$ mittlere Lebensdauer [$N(0)$ auf $N(0)/e$ abgefallen]

Halbwertzeit $T_{½}$

- In der Praxis verwendet man anstelle von τ ($\tau = 1/\lambda$) die Halbwertzeit $T_{1/2}$
- diejenige Zeit, in der die Anzahl der Atome jeweils auf die Hälfte abnimmt:

$$T_{½} = \tau \ln 2 = \ln 2 / \lambda = 0{,}6931 / \lambda$$

- Halbwertzeiten liegen in einem Größenbereich von 10^{-10}a – 10^{18}a

- lässt man 10 Halbwertzeiten verstreichen $(1/2)^{10}$, d.h. 1 ‰

- Größen $T_{½}$, τ, λ sind charakteristische Konstanten eines Nuklids

- Umwandlungsgeschwindigkeit abhängig von Temperatur, Druck, magnetische und elektrische Felder?

Elektronendichte in Kernnähe kann zu geringen Änderungen der Umwandlungsgeschwindigkeit führen (vom chem. Zustand, Druck oder Temperatur abhängig kleine Änderungen z.B. bei $^{7}_{4}Be$ (Elektroneneinfang), λBe- λBeF_2 Unterschied $0{,}74 \times 10^{-3}$

Umwandlungsgesetz I
(Ableitungen ausführlich)

Atomkernzerfall erfolgt nach den Gesetzen der Statistik.
Zeitgesetz aus der chemischen Reaktionskinetik:
mono-molekulare Reaktion

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Umwandlungsgesetz II

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Integration liefert

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 – Zahl der Atome zum Zeitpunkt t = 0

Umwandlungsgesetz III

Halbwertzeit T $$N = \frac{N_0}{2}$$ **eingesetzt in**

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$e^{\lambda T} = 2 \Rightarrow \lambda T = \ln 2$$

Umwandlungsgesetz IV

Halbwertzeit T

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.69315}{\lambda}$$

Umwandlungsgesetz V

Einsetzen und Umformen

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T}t} \Rightarrow N = N_0 \left(\frac{1}{e^{\ln 2}} \right)^{\frac{t}{T}}$$

$$\Rightarrow N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

Zerfallsgesetz VI

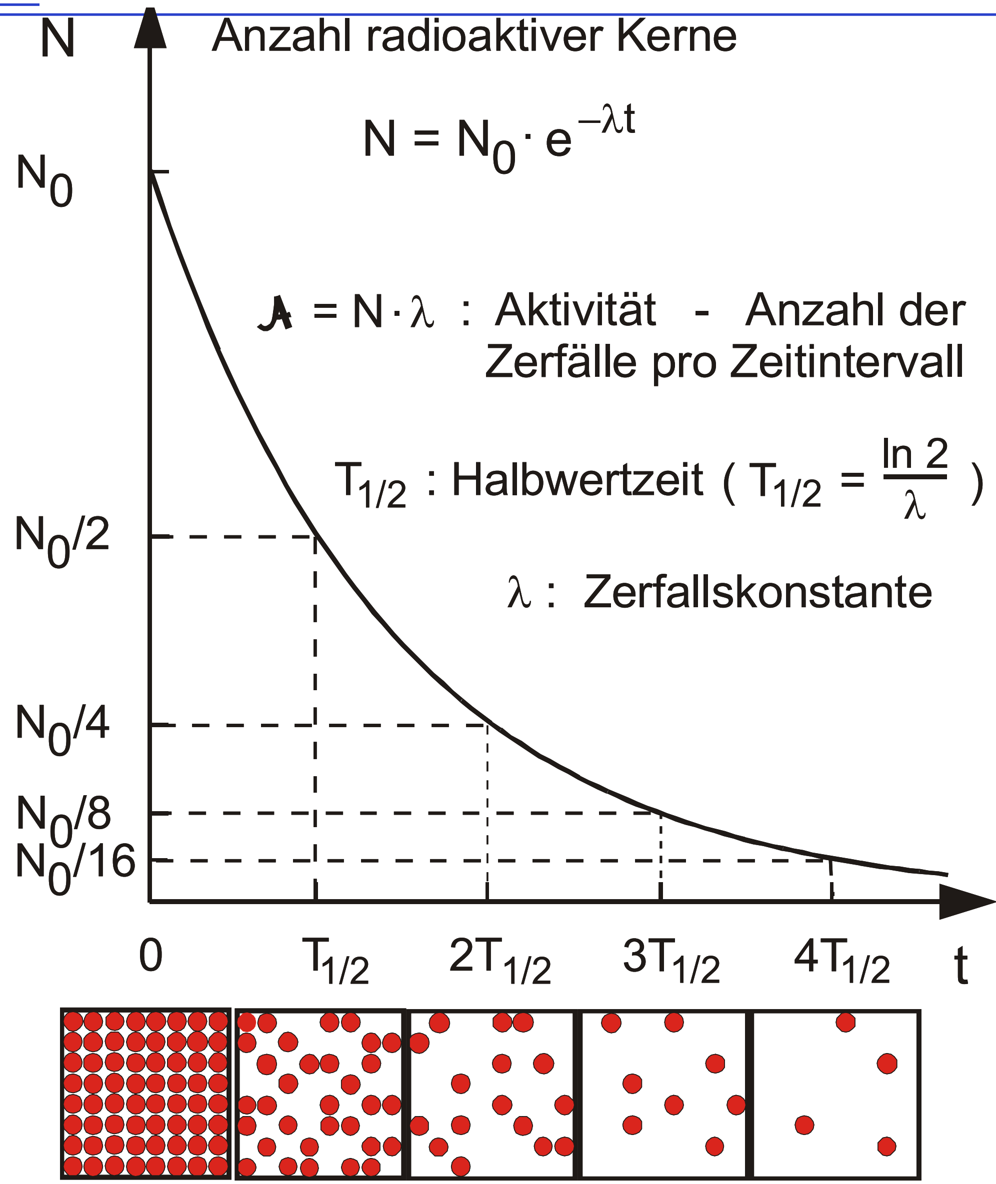
$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

für 2 Halbwertzeiten t = 2T folgt $N = 1/4 N_0$

für 7 Halbwertzeiten t = 7T folgt $N = 1/128 N_0$
(< 1% von N_0)

für 10 Halbwertzeiten t = 10T folgt $N = 1/1024 N_0$
(< 0.1% von N_0)

Radioaktive Umwandlung



Radioaktive Umwandlung (Zerfall) und Aktivität

eine wichtige Größe eines radioaktiven Präparates ist seine
Aktivität:

Anzahl der Umwandlungen pro Sekunde

Statistik des Zerfalls:

- **es gibt stabile und instabile Kerne**
- **instabiler Kern kann in den nächsten Bruchteilen von Sekunden zerfallen oder Milliarden Jahre existieren**
- **Zerfälle sind unabhängig voneinander**
- **wann der einzelne Kern zerfällt ist nicht voraussagbar**
- **misst man die Zählrate eines Radionuklids ($t_{1/2}$>Messzeit) mehrmals hintereinander so findet man, dass die Zählrate um einen Mittelwert schwankt**

Aktivität

- Zahl der Atomkerne einer radioaktiven Substanz ist der Messung nicht direkt zugängig

- Es kann nur die Umwandlungsrate oder Aktivität A ermittelt werden. Diese Größe ist der Umwandlungsrate proportional:

$$A = -\,dN/dt = \lambda N$$

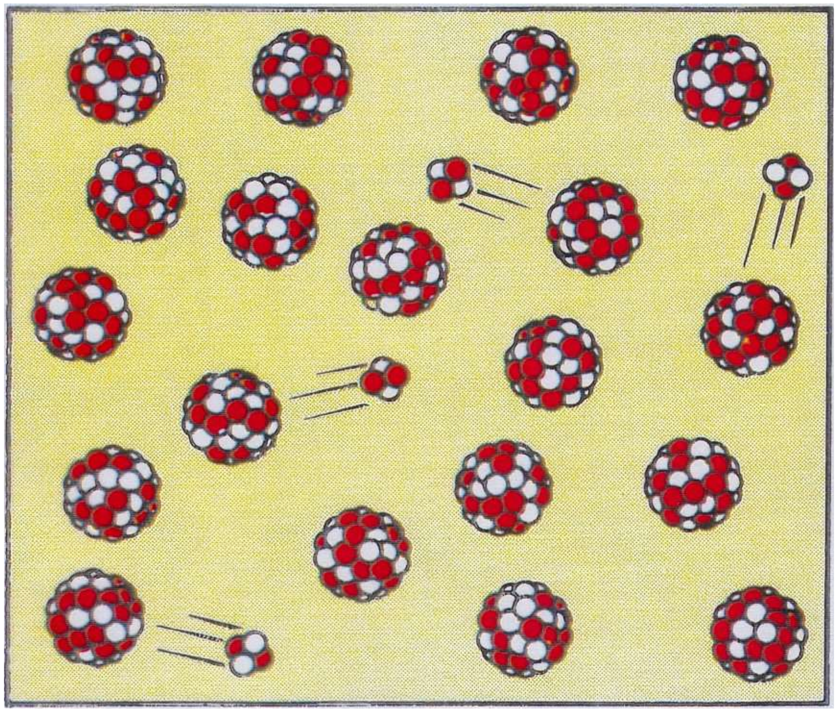
- früher Maßeinheit Curie
  (1 g Radium-226, $^{226}_{88}Ra$ im radioaktiven Gleichgewicht)
- SI-Einheit 1/s = Bq (Becquerel)

$$1\ Bq = 1\ \text{Zerfall (Umwandlung)} / s$$

- PBq, TBq, GBq, MBq, kBq, mBq
- spezifische Aktivität A/m (Bq/kg)
- Aktivitätskonzentration $C_a = A/V$ (Bq/m^3)

Einheit der Aktivität

10.)



Kernumwandlungen

$\Delta N = 4$

Zeit

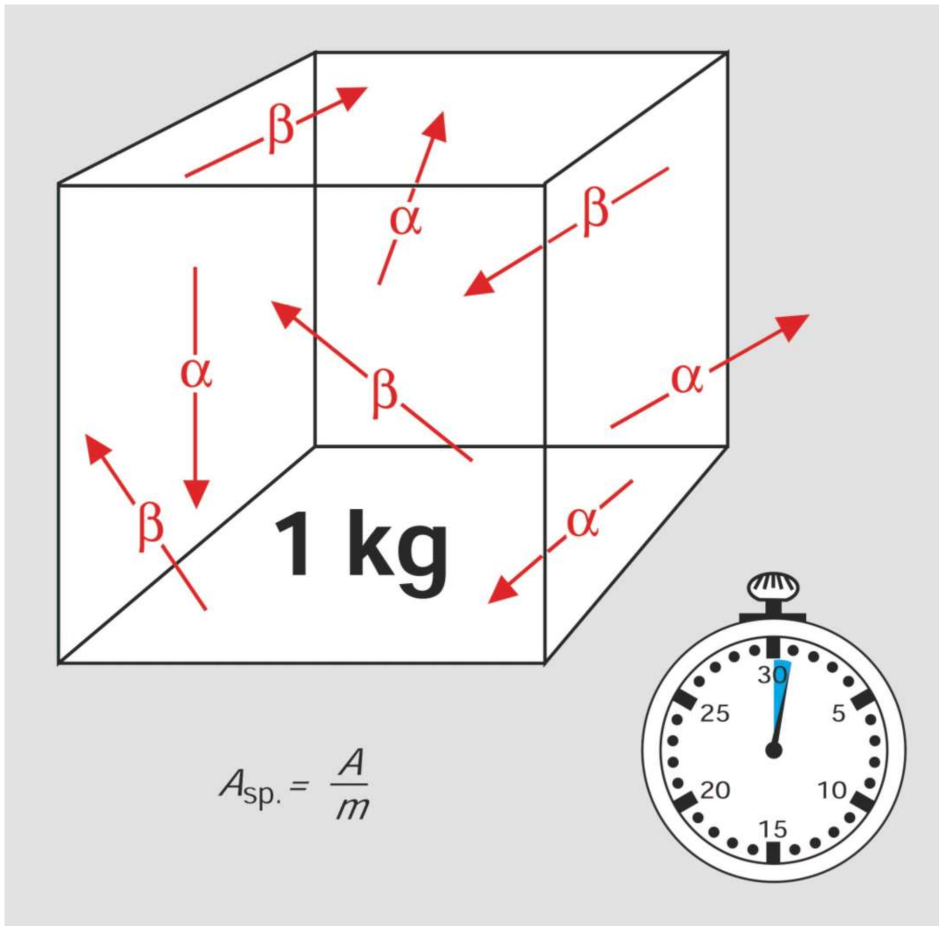
$\Delta t = 4$ s

$$\text{Aktivität (A)} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}}$$

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{4}{4\ \text{s}} = \mathbf{1\ s^{-1} = 1\ Bq}$$

(Frühere Einheit „Curie“: 1 Ci = $3{,}7 \times 10^{10} \times s^{-1} = 3{,}7 \times 10^{10}$ Bq)

Spezifische Aktivität



…auf Masse bezogen **(auch Angabe auf Volumen)**

Impulsrate – Aktivität

- Aktivität wird mit einem Detektor gemessen

- gemessene Impulsrate I ist über die Zählausbeute mit der Aktivität verknüpft

$$I = \eta \cdot A \ (\eta < 1)$$

- η ist abhängig von Art der Strahlung, der Energie, der geometrischen Anordnung des Präparates, der Selbstabsorption der Strahlung im Präparat, Rückstreuung der Strahlung

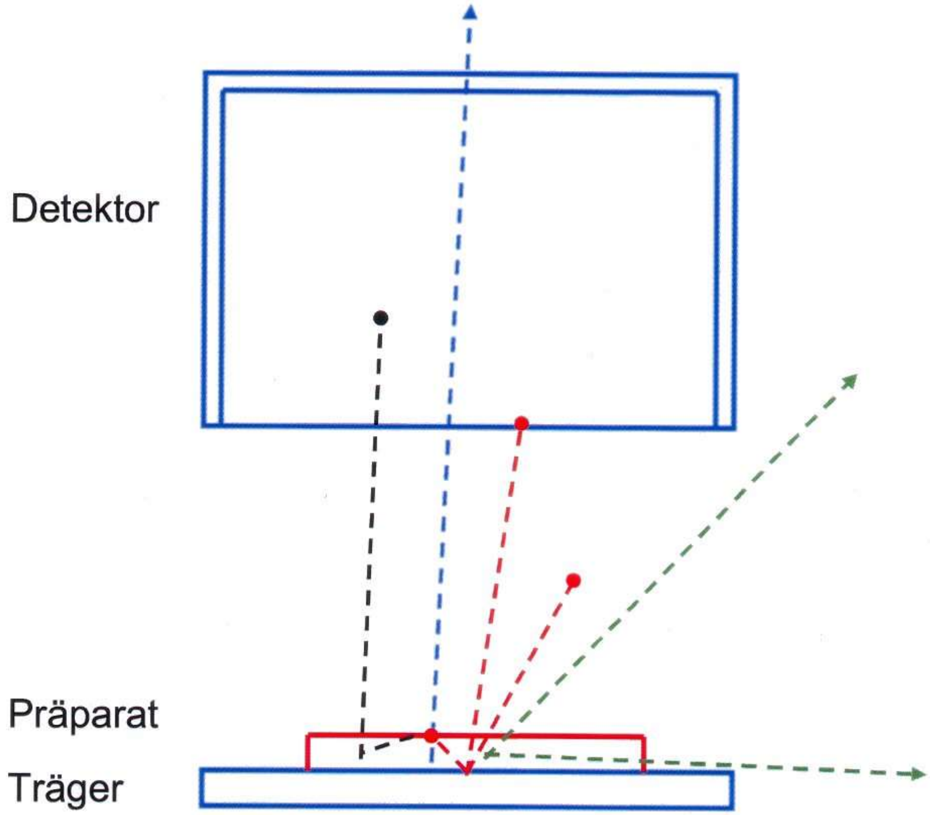
- zur Bestimmung der Zählausbeute werden Standardpräparate benutzt

- Impulsrate setzt sich zusammen aus Impulsrate des Präparates und dem Untergrund

$$I = I_o \cdot e^{-\lambda t}$$

- auf halblogarithmischem Papier ⇒ Gerade (Zerfallskurve des Radionuklids)

Aktivität und Zählrate



- Geometriefaktor (Raumwinkel < 4 π)

- Absorption im Präparat, Luft, Fenster des Detektors (α- und β- Teilchen)

- Durchqueren des Detektors ohne Wechselwirkung (γ - Quanten)

+ Rückstreuung in Präparat und Träger

Wahrscheinlichkeit der Messung

Umwandlung radioaktiver Atomkerne ist als Zufallsphänomen statistischen Gesetzen unterworfen

- die Wahrscheinlichkeit, einen Wert mit der Zählrate x zu messen, ist durch die POISSON Verteilung gegeben:

$$W(x) = (\bar{x})^{x}/x! \cdot e^{-\bar{x}}$$

- bei großen Werten (X > 100) fällt die unsymmetrische POISSON Verteilung mit der symmetrischen GAUSS Verteilung zusammen:

$$W(x) = 1/\sqrt{2\pi\bar{x}} \cdot e^{-(x-\bar{x})2/2\bar{x}}$$

- x innerhalb der Standardabweichung des Mittelwertes x (je größer die beobachtete Anzahl der Ereignisse)

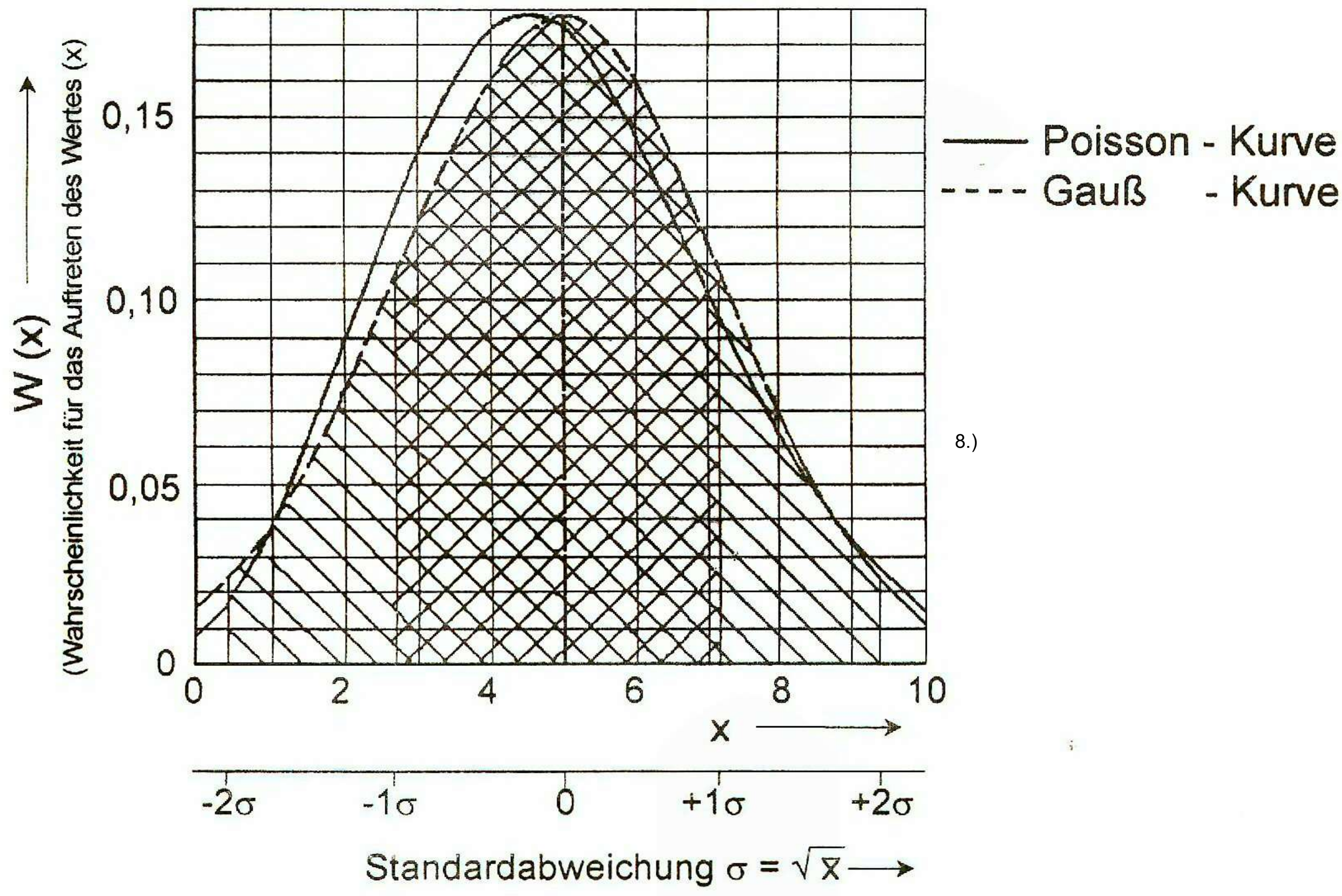
$(x \sim x)$ ☞ $\sigma = \pm\sqrt{x}$

2σ (95,5%)

3σ (99,1%)

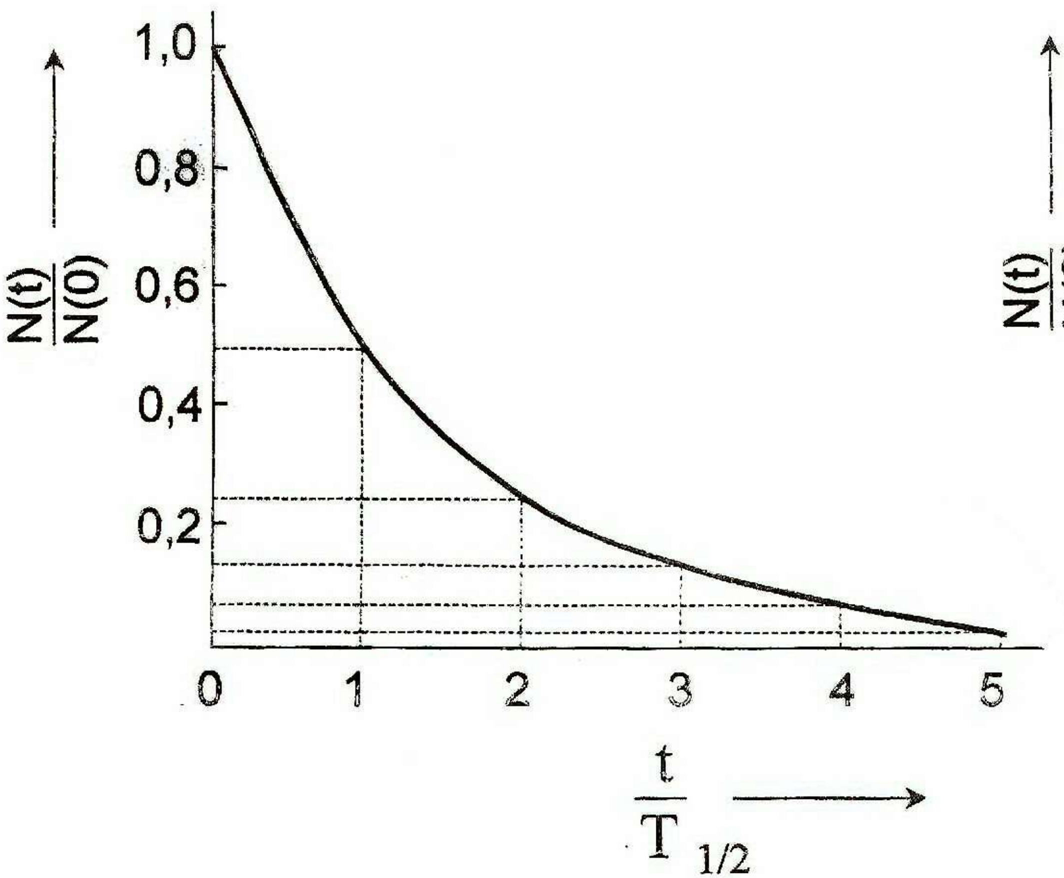
(Standardabweichung beträgt etwa 1 % vom Messergebnis, wenn 10^4 Impulse gezählt werden.)

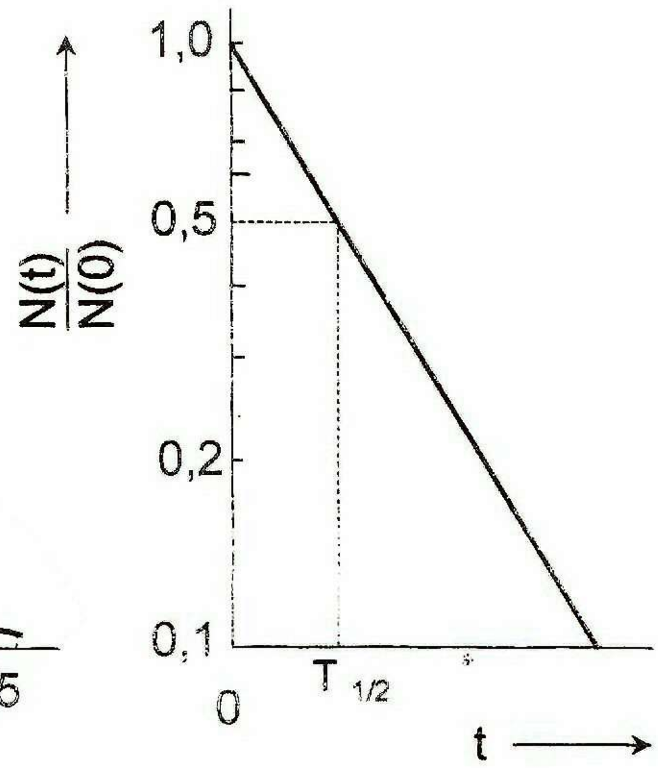
POISSON- und GAUSS-Verteilung für x = 5



8.)

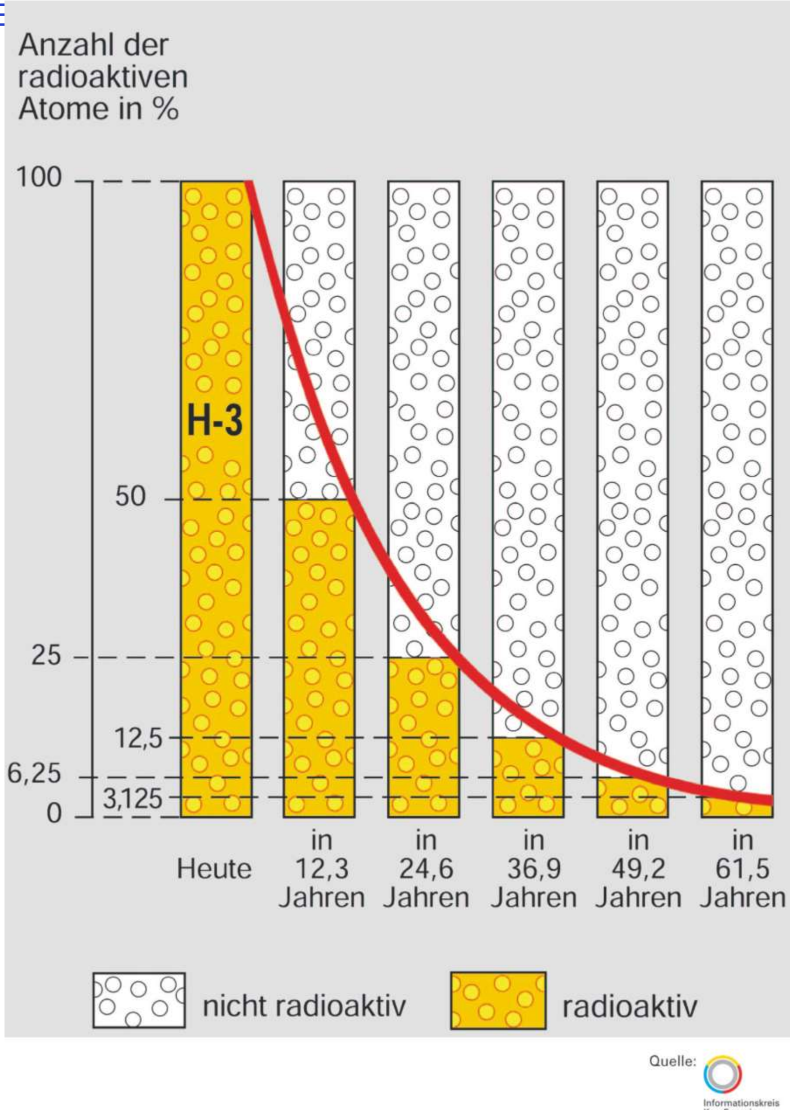
Umwandlungskurve eines radioaktiven Nuklids in linearer und halblogarithmischer Darstellung

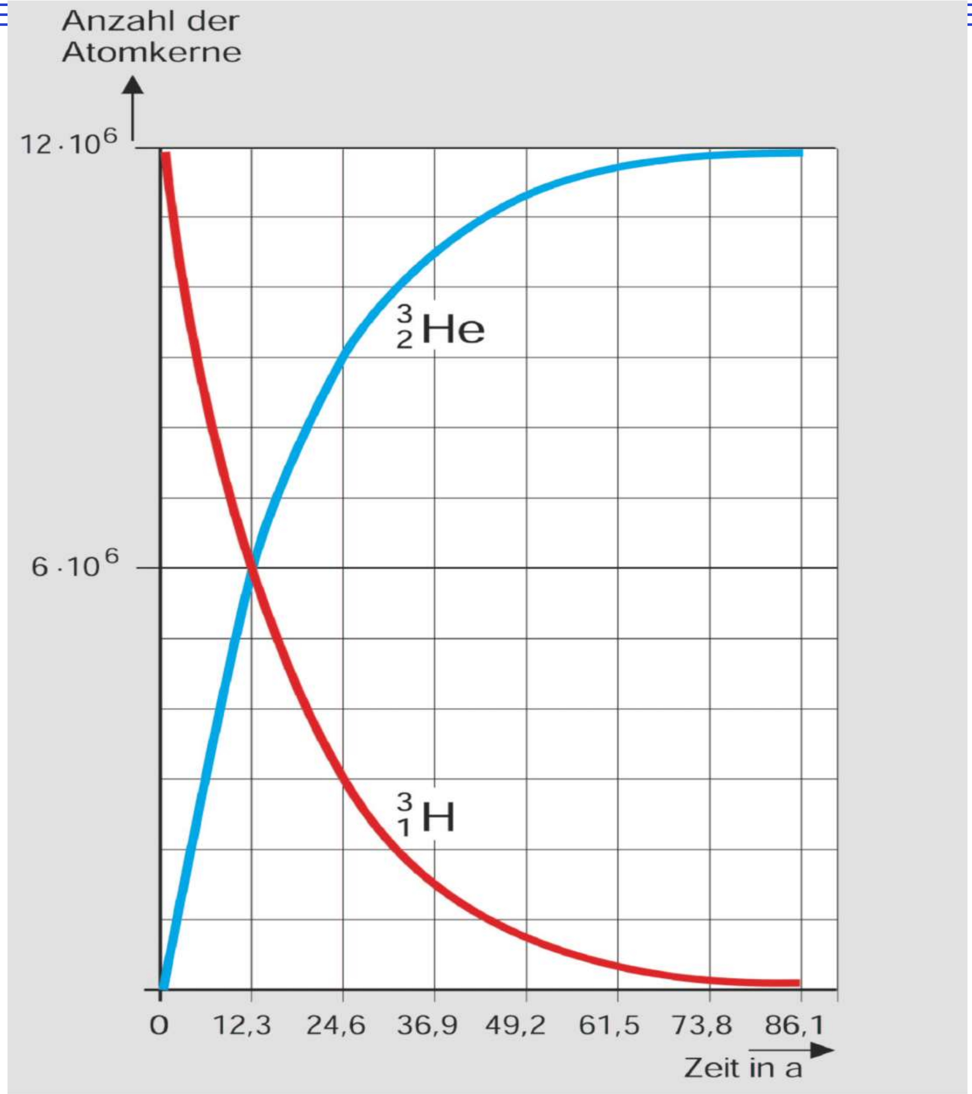




8.)

Umwandlung H-3 (radioaktiv) zu He-3 (nicht radioaktiv)





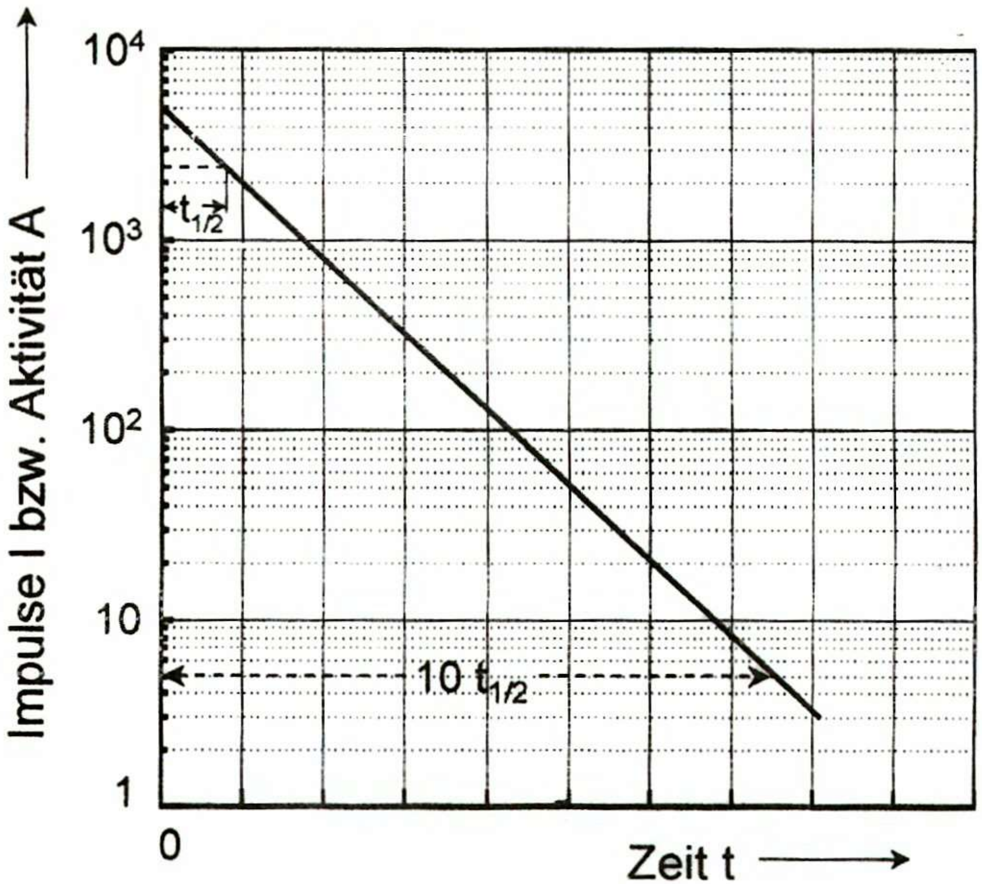
Quelle: Informationskreis KernEnergie

$$^{3}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He + e^{-} + \upsilon$$

10.)

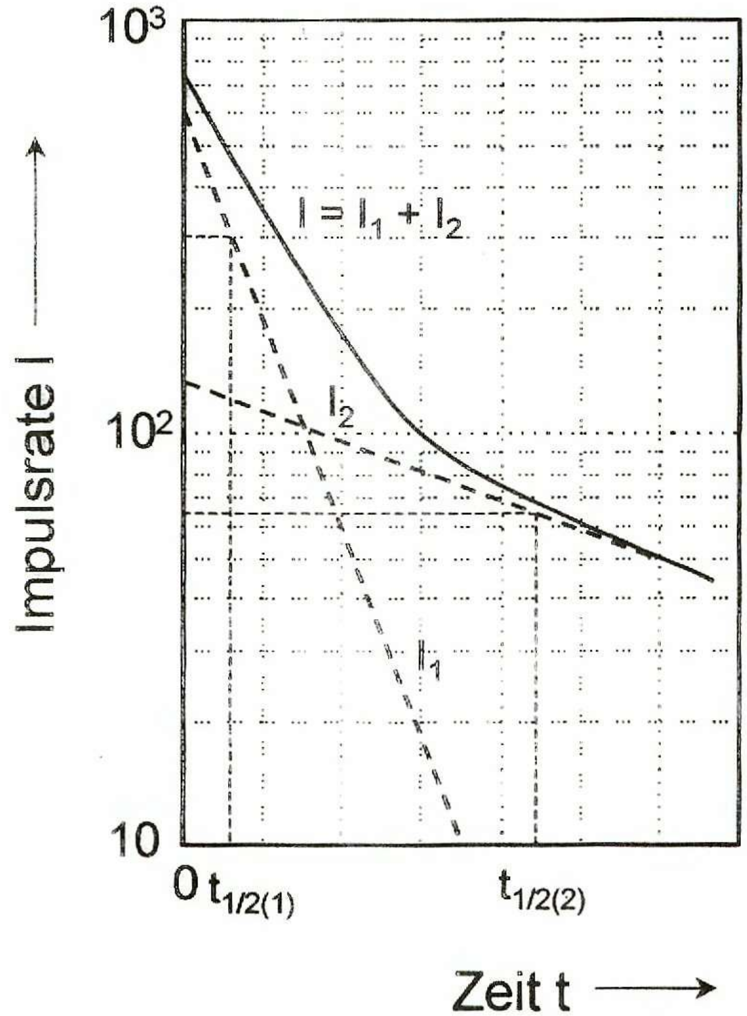
Bestimmung der Halbwertzeit-I

Impulsrate I bzw. Aktivität A als Funktion der Zeit



8.)

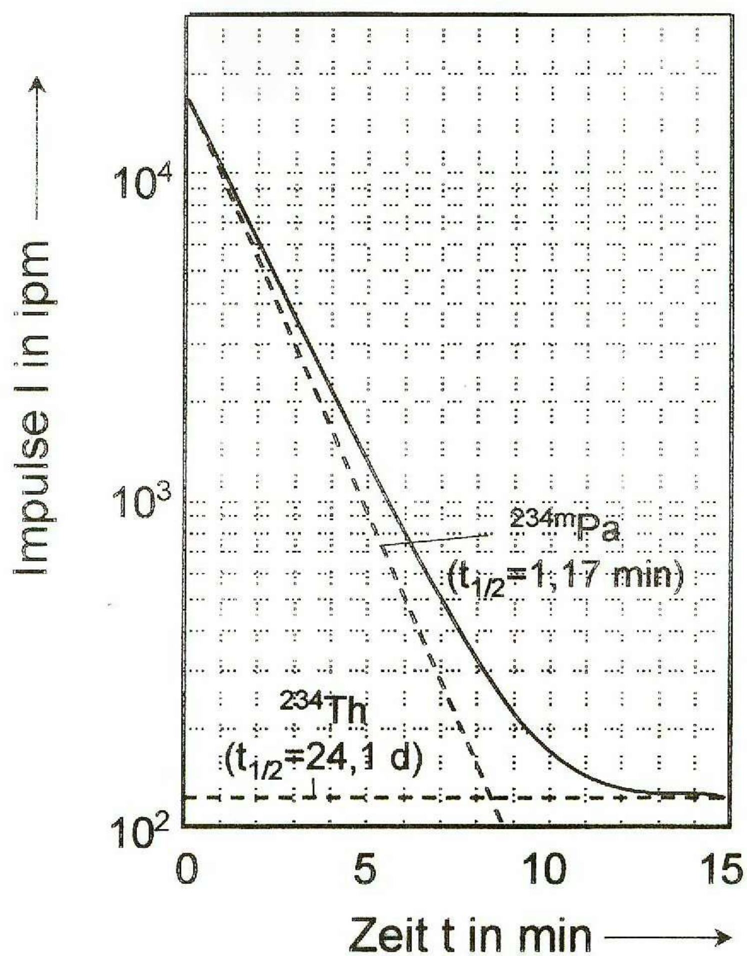
Überlagerung der Impulsraten von zwei Radionukliden



8.)

Verunreinigungen durch ein langlebiges Radionuklid

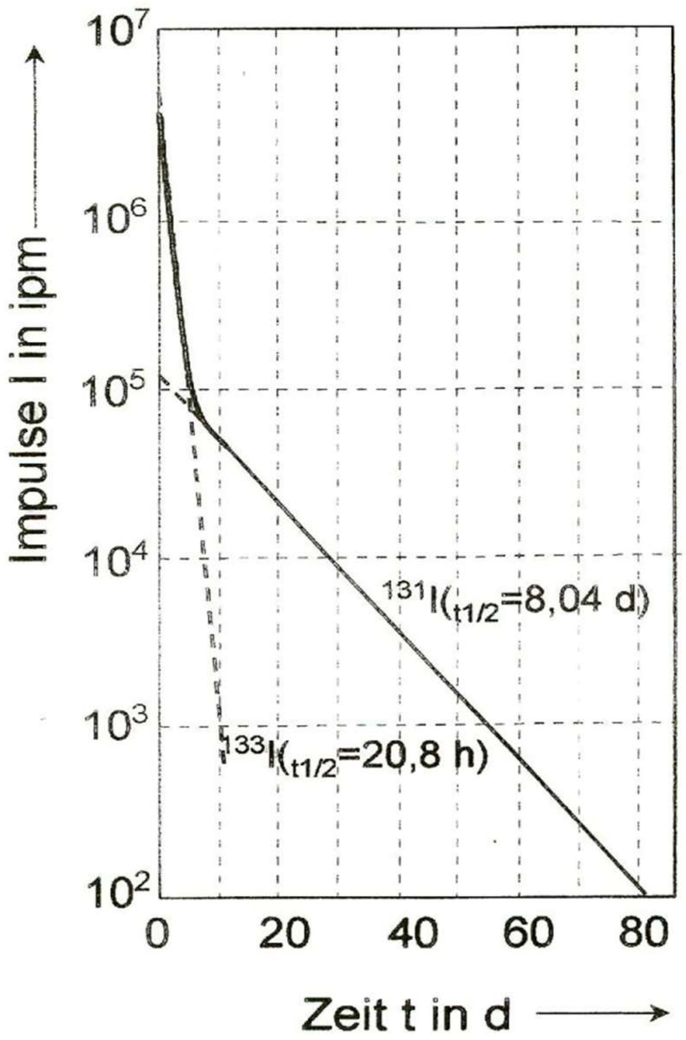
Beispiel: ^{234}Th in ^{234m}Pa



8.)

Verunreinigungen durch ein kurzlebiges Radionuklid

Beispiel: ^{133}I in ^{131}I



8.)

Bestimmung der Halbwertzeit-II

Mischung unabhängig voneinander zerfallender Nuklide

$$I = I_1 + I_2 \ldots = \eta_1 A_1 + \eta_2 A_2 + \ \ldots$$
$$= \ \eta_1 \lambda_1 N_1 + \eta_2 \lambda_2 N_2 \ldots$$

- **bei nicht zu vielen Radionukliden im Gemisch ist graphische bzw. rechnerische Bestimmung der Halbwertzeit möglich, Erkennen der Reinheit eines Präparats, Extrapolation**
- **bei zu vielen Nukliden, vorher chemische Trennung**

Masse trägerfreier radioaktiver Nuklide je 10 MBq Aktivität

Nuklid	Halbwertzeit	Masse in kg/10 MBq
Ag $^{10}_{47}$	2,41 min	$3{,}74 \times 10^{-16}$
Mn $^{56}_{25}$	2,58 h	$1{,}25 \times 10^{-14}$
I $^{131}_{53}$	8,02 d	$2{,}18 \times 10^{-12}$
P $^{32}_{15}$	14,3 d	$9{,}47 \times 10^{-13}$
S $^{35}_{16}$	87,5 d	$6{,}34 \times 10^{-12}$
Co $^{60}_{27}$	5,272 a	$2{,}39 \times 10^{-10}$
Sr $^{90}_{38}$	28,5 a	$1{,}94 \times 10^{-9}$
C $^{14}_{6}$	5730 a	$6{,}06 \times 10^{-8}$
Cl $^{36}_{17}$	$3{,}0 \times 10^{5}$ a	$8{,}16 \times 10^{-6}$
U $^{238}_{92}$	$4{,}468 \times 10^{9}$ a	$8{,}04 \times 10^{-1}$

$A_i = \lambda_i N_i; N_i = m/A_i \times m_u$

$A_i = \ln 2/T_{1/2} / m/A_i \times m_u$

$1\ u = 1{,}66654 \times 10^{-27}$ kg

$T_{1/2} = 4{,}468 \times 10^{9}$ a

Zusammenhang zwischen Halbwertzeit und spezifischer Aktivität

Isotop	Halbwertzeit	spezifische Aktivität
Iod ^{131}I	8 Tage	4.600.000.000.000 Bq/mg
Cäsium ^{137}Cs	30 Jahre	3.300.000.000 Bq/mg
Plutonium ^{239}Pu	24.110 Jahre	2.307.900 Bq/mg
Uran ^{235}U	703.800.000 Jahre	80 Bq/mg
Uran ^{238}U	4.468.000.000 Jahre	12 Bq/mg
Thorium ^{232}Th	14.050.000.000 Jahre	4 Bq/mg

- Radioaktive Gleichgewichte

Radioaktives Gleichgewicht I

Radionuklide stehen miteinander in generischer Beziehung:

Nukild 1 → Nuklid 2 → Nuklid 3
(Mutter) (Tochter) (Enkel)

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{dN_1}{dt} - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

Zerfallsrate der Mutter minus Zerfallsrate der Tochter

Radioaktives Gleichgewicht II

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

Zerfallgesetz des Mutternuklids (Nukild 1)

$$N_1 = N_{0_1} e^{-\lambda_1 t}$$

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_{0_1} e^{-\lambda_1 t} = 0$$

Lineare Differentialgleichung –
Beziehung zwischen Mutternuklid 1 und Tochternuklid 2

Radioaktives Gleichgewicht III

Zusammenfassung

- mehrere radioaktive Nuklide stehen in einer genetischen Beziehung

Nuklid 1 → Nuklid 2 → Nuklid 3

man spricht von Mutternuklid - Tochternuklid - Enkelnuklid

- Nettobildungsrate des Tochternuklids:

$$dN_2/dt = - dN_1/dt - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

- das radioaktive Gleichgewicht als Funktion der Zeit im Anschluss an die quantitative Abtrennung des Tochternuklids vom Mutternuklid ist erreicht, wenn: $N_2 = \lambda_1 / \lambda_2 - \lambda_1 * N_1$

  d.h. das Verhältnis der Atome N_2 / N_1 ist konstant

- nicht mit „Thermodynamischen Gleichgewicht“ verwechseln, „Radioaktives Gleichgewicht „ist nicht von beiden Seiten erreichbar

↓

Unterscheidung von vier Grenzfällen des Radioaktiven Gleichgewichts

Radioaktives Gleichgewicht IV

- Halbwertzeit des Mutternuklids ist sehr viel größer als die Halbwertzeit des Tochternuklids

  $t_{1/2}\ (1) \ggg t_{1/2}\ (2)$

1. Säkulares Gleichgewicht (Dauergleichgewicht)

- Halbwertzeit des Mutternuklids ist zwar größer als die Halbwertzeit des Tochternuklids (Halbwertzeit des Mutternuklids kann aber nicht unberücksichtigt bleiben)

  $t_{1/2}\ (1) > t_{1/2}\ (2)$

2.Transientes Gleichgewicht (Laufendes Gleichgewicht)

- Halbwertzeit des Mutternuklids ist kleiner als die Halbwertzeit des Tochternuklids

  $t_{1/2}\ (1) < t_{1/2}\ (2)$

3. keine Einstellung des Gleichgewichtes

- Halbwertzeit von Mutter- und Tochternuklid sind ähnlich

  $t_{1/2}\ (1) \approx t_{1/2}\ (2)$

4. Grenzfall siehe 2. oder 3.

Säkulares Gleichgewicht (Dauergleichgewicht) I

Fall 1.

- Halbwertzeit des Mutternuklids sehr viel größer als die Halbwertzeit des Tochternuklids.

- Im radioaktiven Gleichgewicht werden pro Zeitintervall ebenso viele Atome des Tochternuklids nachgebildet, wie zerfallen.

- Die Zahl der Atome und die Aktivität des Mutternuklids sowie des Tochternuklids bleiben konstant.

- Säkulares Gleichgewicht; „über Jahrhunderte“ andauernd (Saekulum – lat. Jahrhundert)

Säkulares Gleichgewicht II

$A_1 = A_2$

mit $A = \lambda N$ folgt

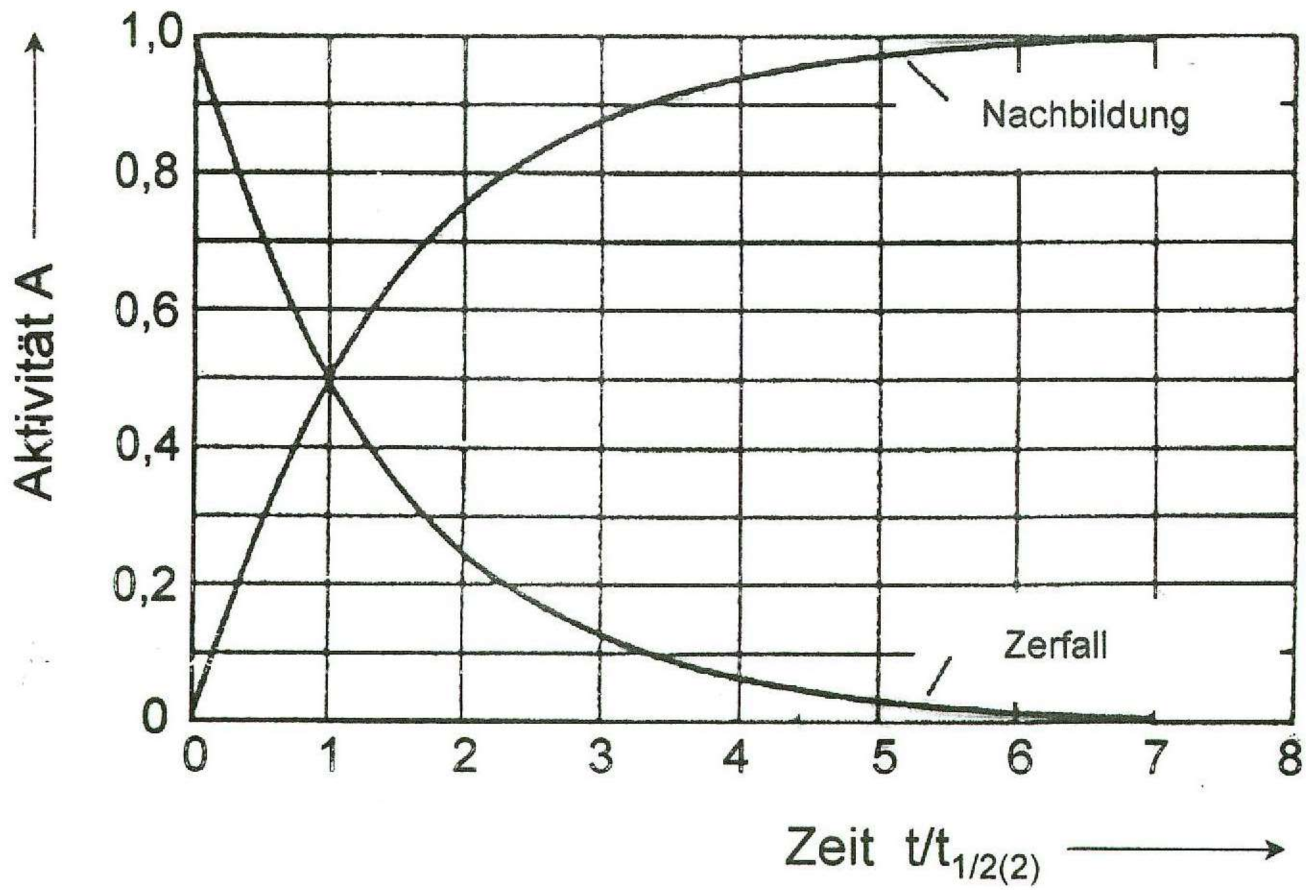
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

bzw.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

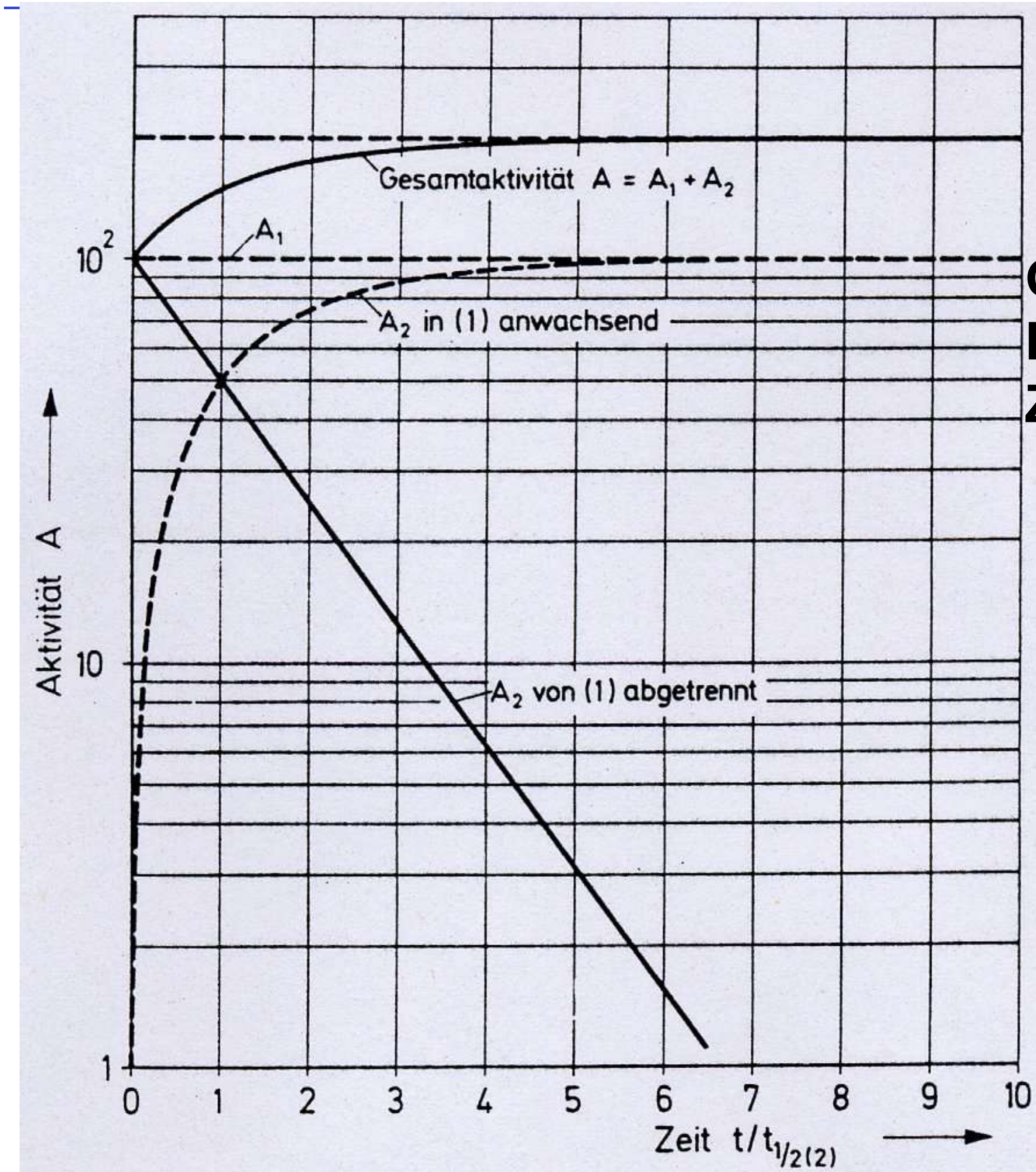
Säkulares Gleichgewicht III

Zerfall des abgetrennten Tochternuklids und Nachbildung des Tochternuklids aus dem Mutternuklid im Fall des säkularen Gleichgewichts



8.)

Säkulares Gleichgewicht IV

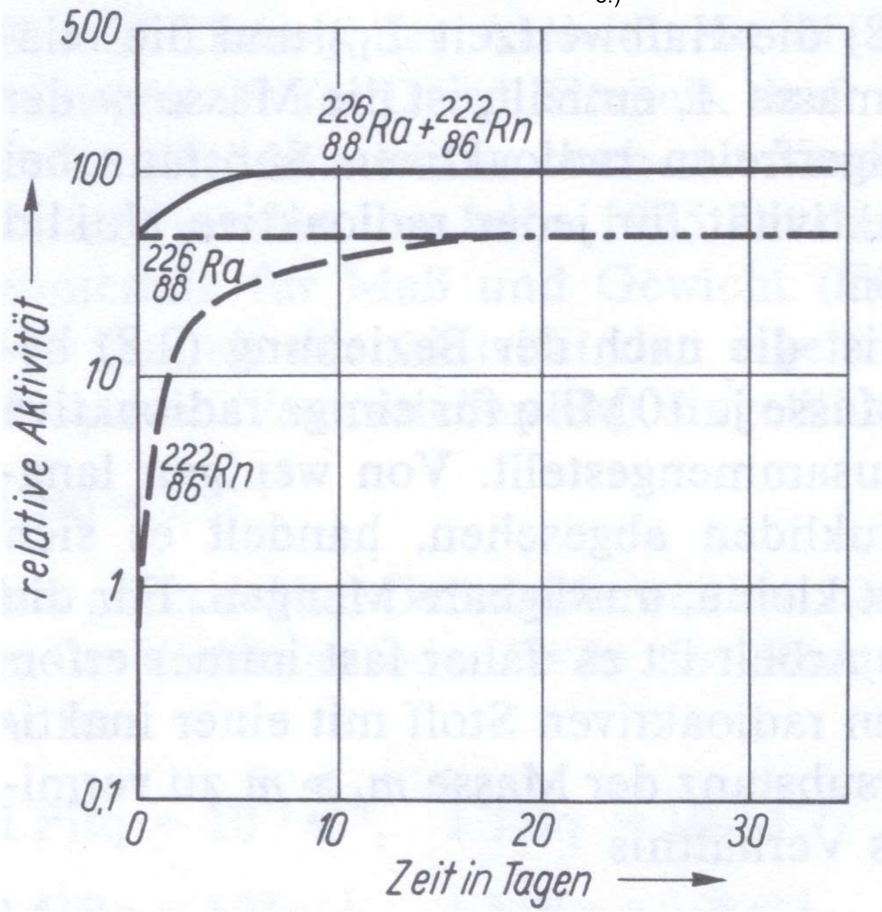


Gesamtaktivität und Einzelaktivitäten als Funktion der Zeit

8.)

Säkulares Gleichgewicht V

8.)



HWZ: 3,82 d Rn; 1600 a Ra

Beispiel:

Radioaktives Dauergleichgewicht zwischen $^{226}{}_{88}Ra$ und $^{222}{}_{86}Rn$

Bestimmung großer Halbwertzeiten von z.B. ^{238}U

1 kg Uran enthalten 0.34 mg ^{226}Ra (T_2 = 1600 a)

$$T_1(^{238}U) = \frac{N_1}{N_2} T_2 = \frac{m_1 M_2}{m_2 M_1} T_2$$

Säkulares Gleichgewicht VI

Berechnungen:

- **Bestimmung großer Halbwertzeiten (HWZ):**

  aus dem Mengenverhältnis der beiden Radionuklide und der Halbwertzeit des Tochternuklids:

  Pro kg Uran findet man im Gleichgewicht 0,34 mg ^{226}Ra ($t_{1/2}$ = 1600 a)

  HWZ ^{238}U ?

  $$t_{1/2}(1) = N_1/N_2 * t_{1/2}(2) = \frac{10^6 \cdot 226}{0{,}34 \cdot 238} \cdot 1600 = \underline{4{,}5 \cdot 10^9\ a}$$

- **Berechnung der Menge Muttersubstanz aus der Aktivität eines Folgeproduktes (bei bekannten HWZ) Urangehalt in einem Mineral**

  es wird nach chemischer Trennung in der Fraktion, die das Protactinium enthält ^{234m}Pa 1nCi (3,7*10^4 Bq), bestimmt:

  $$m_1 = \frac{M_1 \cdot A_2 \cdot t_{1/2}(1)}{N_{AV} \cdot \ln 2}$$

  $$m_1 = \frac{238 \cdot 37 \cdot 4{,}47 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}{6{,}023 \cdot 10^{23} \cdot 0{,}693} = \underline{3{,}0\ mg\ ^{238}U}$$

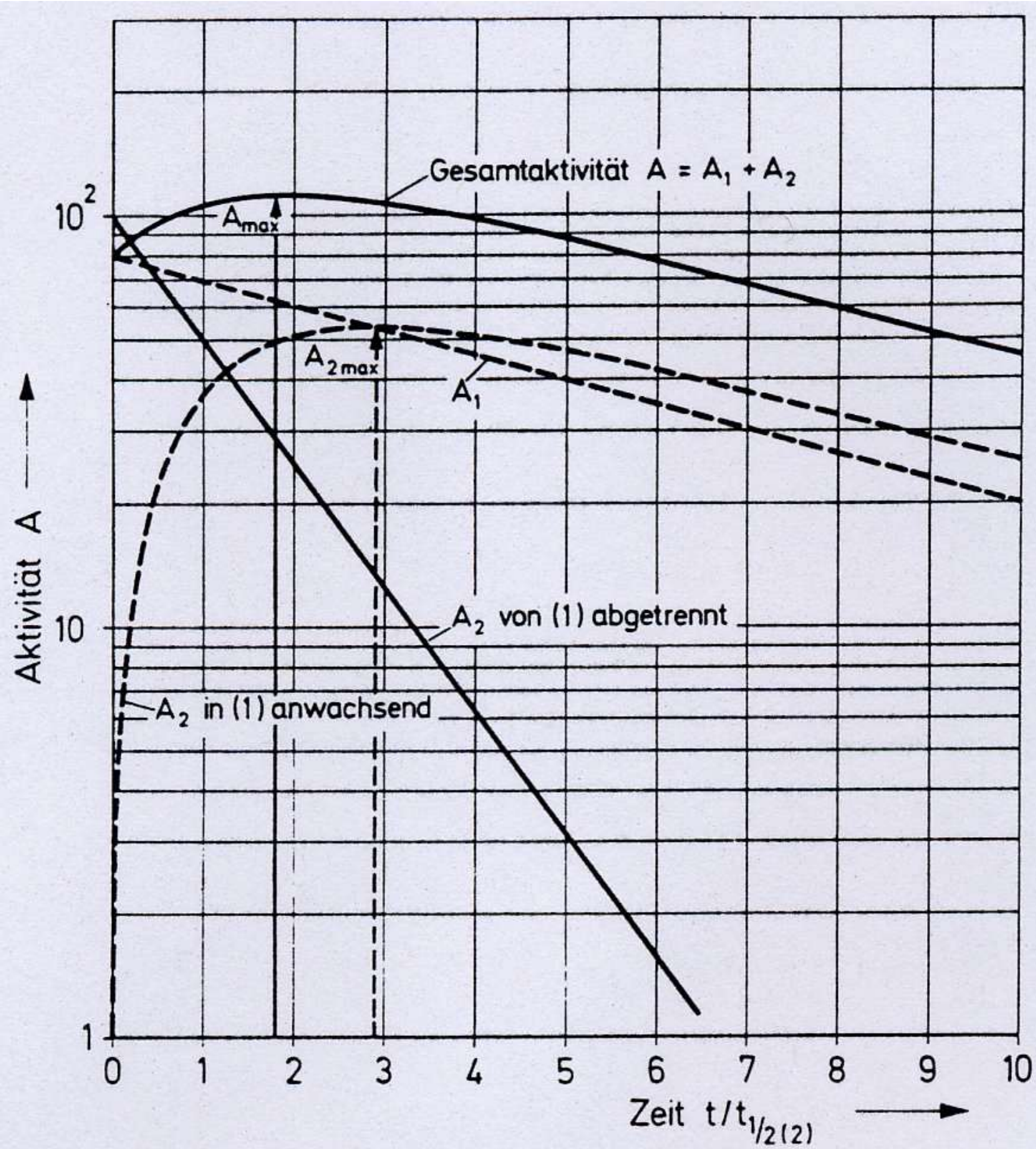
Transientes Gleichgewicht *(Laufendes Gleichgewicht)* I
Fall 2.

- Zerfall des Mutternuklids ist nicht vernachlässigbar.

- Das Gemisch der Nuklide zerfällt im radioaktiven Gleichgewicht mit der (längeren) Halbwertzeit des Mutternuklids.

- Die Aktivität des Mutternuklids ist kleiner als die Aktivität des Tochternuklids.

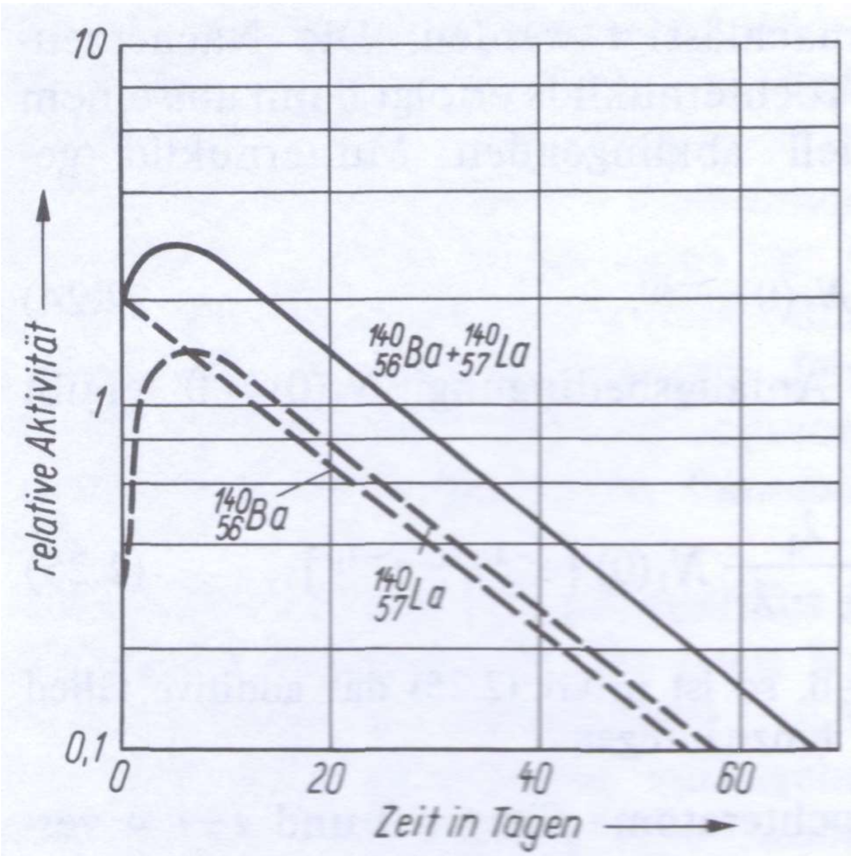
Transientes Gleichgewicht II



Gesamtaktivität und Einzelaktivitäten als Funktion der Zeit ($T_1/T_2 = 5$)

8.)

Transientes Gleichgewicht III



8.)

Radioaktives Gleichgewicht zwischen $^{140}_{56}$Ba und $^{140}_{57}$La

HWZ: 12,75 d Ba; 40,27 h La

Keine Einstellung des Radioaktiven Gleichgewichts

Kurzlebigeres Mutternuklid

Fall 3.

- **Mutternuklid A_1 ist kurzlebiger als Tochternuklid A_2**

  es gilt: $t_{1/2}(1) < t_{1/2}(2)$ bzw. $\lambda_1 > \lambda_2$

- **keine Einstellung eines radioaktiven Gleichgewichtes**
- **Mutternuklid aufgezehrt bevor Gleichgewichtseinstellung**

  unter Berücksichtigung von:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \left[1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}\right] \qquad \left[N_1 = N(0)_1\right]$$

folgt unter der Voraussetzung ($e^{(\lambda 1 - \lambda 2)t}$) <<< 1, dass nur noch Zerfall des Tochternuklids beobachtet wird,

ein Gleichgewicht wird nicht erreicht (auch nach Trennung ist N_2 proportional $N(0)_1$)

Grenzfall: ähnlich HWZ von Mutter- und Tochternuklid

1. **HWZ Mutternuklid > HWZ Tochternuklid**

   allmähliche Einstellung eines transienten Gleichgewichtes

2. **HWZ Mutternuklid < HWZ Tochternuklid**

   keine Gleichgewichtseinstellung

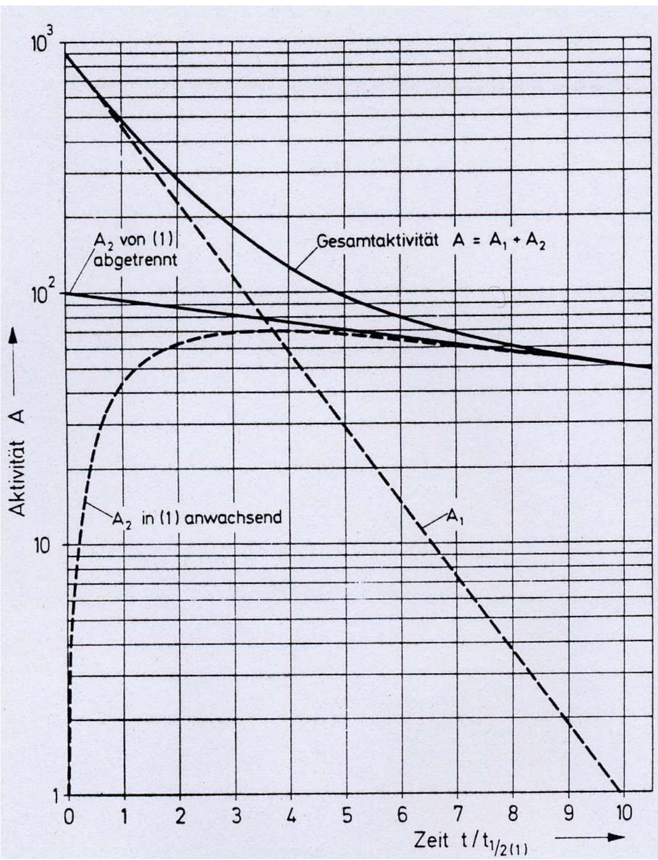
Kein radioaktives Gleichgewicht

Fall 3.

Kurzlebigeres Mutternuklid:

Das Mutternuklids ist aufgezehrt, bevor das Tochternuklid zerfallen ist.

Es stellt sich *kein radioaktives* Gleichgewicht ein.



8.)

Gesamtaktivität und Einzelaktivitäten als Funktion der Zeit (T_1/T_2 = 0,1)

Halbwertzeit von Mutter und Tochternuklid ähnlich

Fall 4.

- Prüfung, ob nach Fall 2. oder Fall 3. verfahren werden kann

Grenzfall: ähnlich HWZ von Mutter- und Tochternuklid

A. HWZ Mutternuklid > HWZ Tochternuklid

allmähliche Einstellung eines transienten Gleichgewichts

B. HWZ Mutternuklid < HWZ Tochternuklid

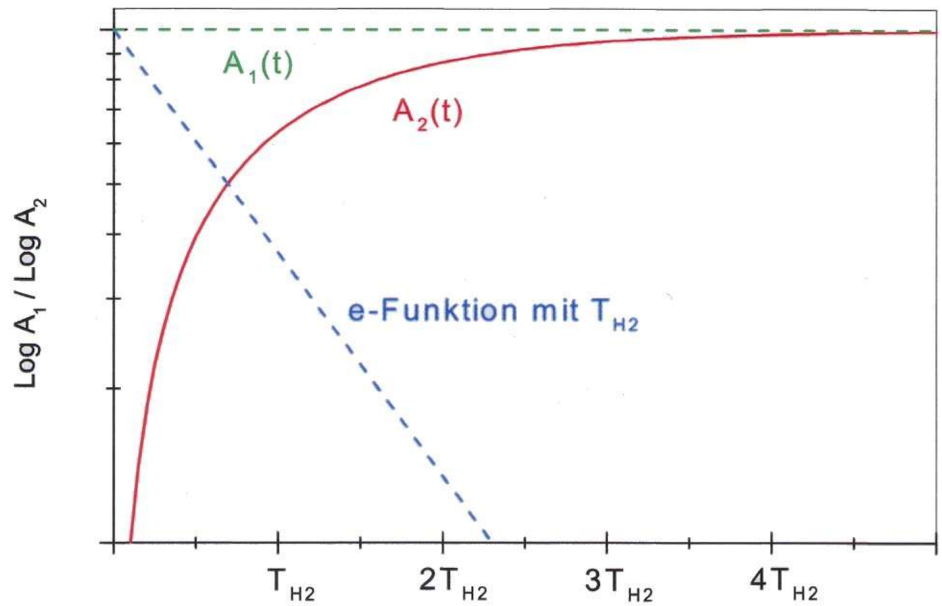
keine Gleichgewichtseinstellung

Beispielfall: sehr langlebiges Mutternuklid

1) Sehr langlebige Mutter: ist bei natürlicher Radioaktivität gegeben

$$\lambda_1 << \lambda_2 \Leftrightarrow T_{H1} >> T_{H2};\ \lambda_1 t << 1 \rightarrow A_1(t) = A_{10} = const.$$

$$\Rightarrow\ A_2(t) = A_{10}(1 - e^{-\lambda_2 t})$$



Säkulares Gleichgewicht – Dauergleichgewicht

$$\text{bei } t \approx 10 T_{H2} \text{ ist } A_2(t) \approx A_{10} = const.$$

$$\text{und } N_2(t) \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} = const.$$

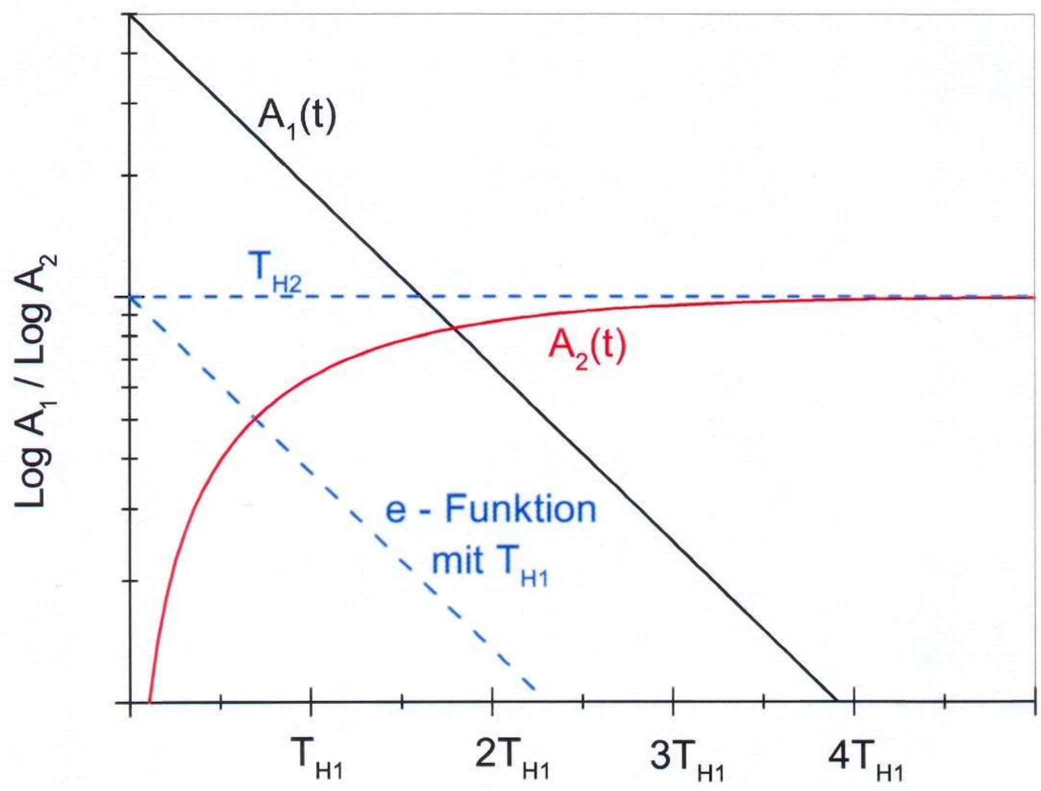
Beispielsfall: sehr langlebiges Tochternuklid

2) Sehr langlebige Tochter

$$\lambda_1 >> \lambda_2;\; T_{H1} << T_{H2};\; \lambda_2 \cdot t << 1$$

$$A_1(t) = A_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} A_{10}(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) \approx \frac{\lambda_2}{\lambda_1} A_{10}(1 - e^{-\lambda_1 t})$$



Aufeinanderfolgende Umwandlungen (genetischer Zusammenhang)

- **radioaktives Gleichgewicht nach einer Vielzahl von Umwandlungen**

  (1) .... (2) .... (3) .... (4) .... (n)

- **Verzweigung (dualer Zerfall)**

  bei Umwandlung hat Radionuklid mehrere Umwandlungsmöglichkeiten, oft eine bevorzugt