

KAPITEL 14 :

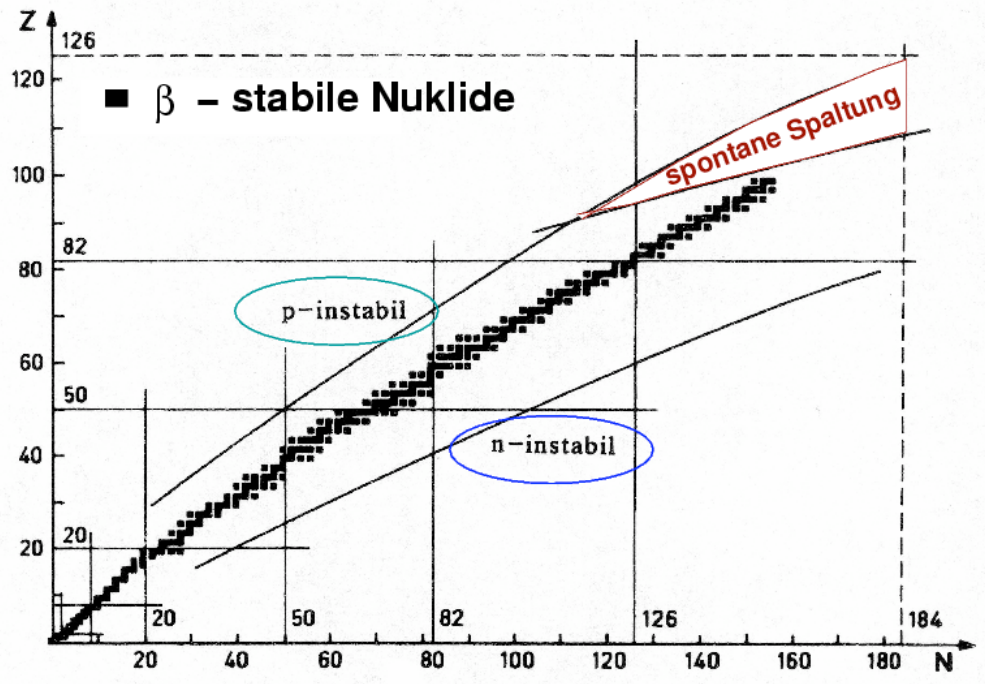
Stabilität der Kerne

- 14.1 α -Zerfall
- 14.2 Kernspaltung
- 14.3 γ -Zerfall
- 14.4 β -Zerfall
- 14.5 ^{14}C – Datierung

14. Stabilität der Kerne

Stabile Kerne: schmales Band in $Z - N$ Ebene

Radioaktive Nuklide: spontaner Zerfall



- β -Zerfall** $\Delta A = 0, |\Delta Z| = 1$
 - Überschuss an Neutronen: β^- Zerfall

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + e^- + \bar{\nu}_e \quad (n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e)$$
 - Überschuss an Protonen: β^+ Zerfall

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + e^+ + \nu_e \quad (p \rightarrow n + e^+ + \nu_e)$$
 - Elektroneinfang:

$${}_Z^A X + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + \nu_e \quad (p + e^- \rightarrow n + \nu_e)$$
- Spontane Spaltung** bei schweren Kernen ($Z \geq 110$)
wahrscheinlicher als α -Zerfall
- γ -Zerfall** angeregter Kern $\rightarrow$ Grundzustand

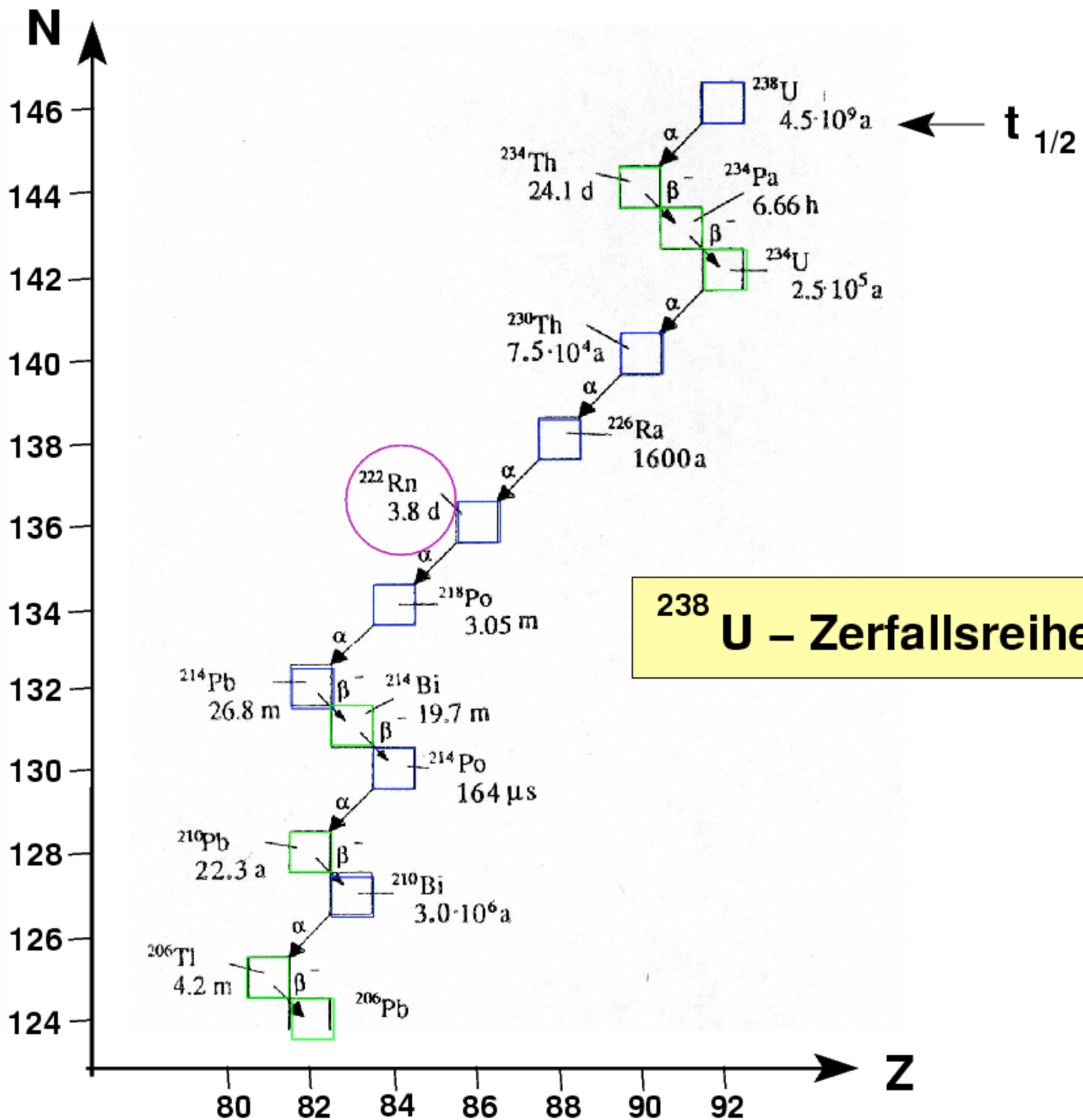
14.1 Spontaner α -Zerfall

- α -Teilchen: ionisierter ${}^4_2\text{He}$ -Kern: $J^P = 0^+$
(doppelt-magischer Kern)
 $B = 28.3 \text{ MeV}$ (stark gebunden)
meiste α -Strahler: Kerne schwerer als Blei ($Z = 82$)
- Q -Wert = $\left[\underbrace{M(A, Z)}_{\text{Parent}} - \underbrace{M(A-4, Z-2)}_{\text{Daughter}} - \underbrace{M(4, 2)}_{\alpha} \right] c^2$
 $= E_D + E_\alpha$
aus Energie- und Impulserhaltung:
$$E_\alpha \simeq Q \frac{A-4}{A}, \quad E_D \simeq \frac{4}{A} Q$$
- Lebensdauer für α -Zerfall: $10 \text{ ns} - 10^{17} \text{ Jahre}$
berechenbar: QM Tunneleffekt (Gamov et al., 1928)
 α -Teilchen durchdringen Coulombbarriere
- Energiespektrum der α -Teilchen ist diskret:
$$\log E_{\text{kin}}(\alpha) = C_1 + C_2 \log \lambda \quad C_1, C_2 > 0$$

Bemerkung:

- Zerfallsgesetz: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ $\lambda \dots$ Zerfallskonst.
- Lebensdauer: $\tau = \frac{1}{\lambda}$
- Halbwertszeit: $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \ln 2 \cdot \tau$:
Zeit, nach der die ursprüngliche Menge an radioaktiven Kernen auf Hälfte gesunken
- Aktivität: $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$

Beispiel einer Zerfallsreihe von langlebigen α -instabilen Nukliden



Uranverbindungen kommen häufig in Graniten vor

^{222}Rn (Radon): entweicht als Edelgas den Wänden
 $\rightarrow$ gelangt über Atemwege in Lunge
 $\approx 40\%$ der durchschnittlichen natürlichen Strahlenbelastung

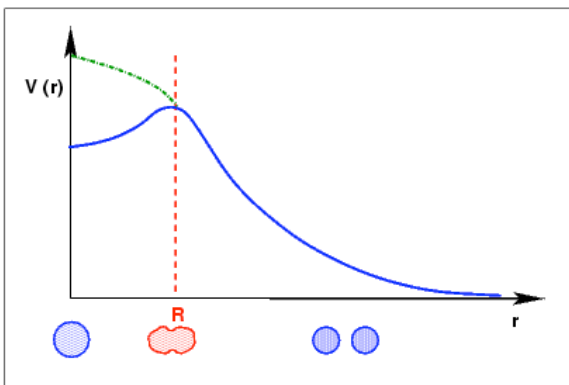
14.2 Spontane Kernspaltung

Spontane Spaltung:

$B/\text{Nukleon}$ für Kerne im Bereich um ^{56}Fe am grössten

Kerne mit $Z > 40$: Potentialbarriere zu "gross" um in 2 schwere Kerne aufzuspalten

$$V(r) = \left(\frac{Z}{2}\right)^2 \left(\frac{\alpha \hbar c}{r}\right)$$



Verformung der Kerne:
Oberflächenenergie $\uparrow$
Coulombenergie $\downarrow$
 $\Rightarrow$ Kern wird instabil für

$$Z > 114 \text{ und } A > 270$$

Induzierte Spaltung: siehe Kapitel 15

Spallation: durch genügend hohe Anregung des Atoms
 $\Rightarrow$ Nukleonen des Kerns zerplatzen und Neutronenüberschuss

14.3 γ – Zerfall

Via elektromagnetischer WW: $\tau \sim 10^{-16}\text{s}$

Kern in angeregtem Zustand $\rightarrow \gamma$ - Emission
 E_γ bis zu einigen MeV

Scharfe Line: $\Gamma \sim 1/\tau$

Kernresonanzabsorption:

Reabsorption des γ -Quants nach der Emission durch einen Kern der gleichen Art durch Verlust der Rückstossenergie E_R unterdrückt

Emissions– und Absorptionslinien um $2E_R$ verschoben

$$E_R = \frac{\hbar^2 \nu^2}{2Mc^2} \quad M \dots \text{Masse des Kerns}$$

Mössbauer–Effekt: 1958

Rückstossfreie Kernresonanzabsorption

Prinzip: Kern in kristallinem Gitter quasi einfrieren

$\rightarrow$ Masse des makroskopischen Kristalls $\overset{\wedge}{=}$
Masse des Rückstoss–Systems

Resonanzbreite so gering $\rightarrow$

Energiespektren mit Auflösung bis zu 10^{-9} eV
gemessen



R. L. Mössbauer

Nobel Prize in 1961

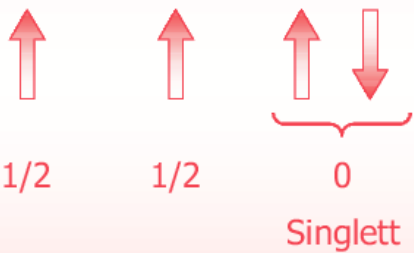
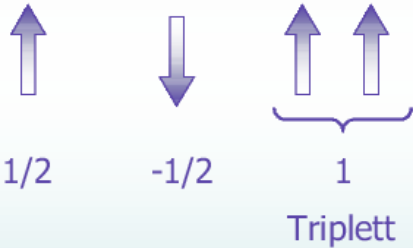
"for his researches concerning the resonance

Absorption of gamma radiation and his discovery

In this connection of the effect which bears his name"

Grosse Bedeutung in Messtechnik: Kern– und Festkörperphysik

14.4 Klassifizierung im β -Zerfall

FERMI	GAMOV - TELLER
$n \rightarrow p + e^- \bar{\nu}_e$  1/2 1/2 0 Singlett $\Delta J = 0$ $\Delta P = 0$	$n \rightarrow p + e^- \bar{\nu}_e$  1/2 -1/2 1 Triplet $\Delta J = 1$ $\Delta P = 0$

- Erlaubte Übergänge: $l = 0, P_P = P_D$

Fermi und Gamov-Teller Übergänge möglich

$0^+ \rightarrow 0^+$: übererlaubt: nur Fermi Übergang

$0^+ \rightarrow 1^+$: nur Gamov-Teller Übergang

- Verbotene Übergänge: $l > 0, P_P = P_D(-1)^l$

einfach, zweifach etc. verboten: abhängig vom Drehimpuls l , der von den beiden Leptonen fortgetragen wird.

mit zunehmendem l sinkt die Partialbreite typischerweise um $10^2 - 10^4$ (kleinere Wahrscheinlichkeit)

Übergänge mit ΔP können zusammen mit grossen Spinänderungen vorkommen

Beispiel: erlaubte Zerfälle

Bekanntes Beispiel: β^- – Zerfall des ^{14}C
aus energetischen Gründen: ^{14}C nur in Grundzustand von ^{14}N
zerfallen (Gamov–Teller Übergang)

$$t_{1/2} = 5730 \text{ Jahre} \longrightarrow \text{Altersbestimmung}$$

Prinzip der Altersbestimmung (P...Parent, D...Daughter):

$$N_P(t_0) = N_D(t_1) + N_P(t_1)$$

$$N_P(t_1) = N_P(t_0)e^{-\lambda(t_1-t_0)}$$

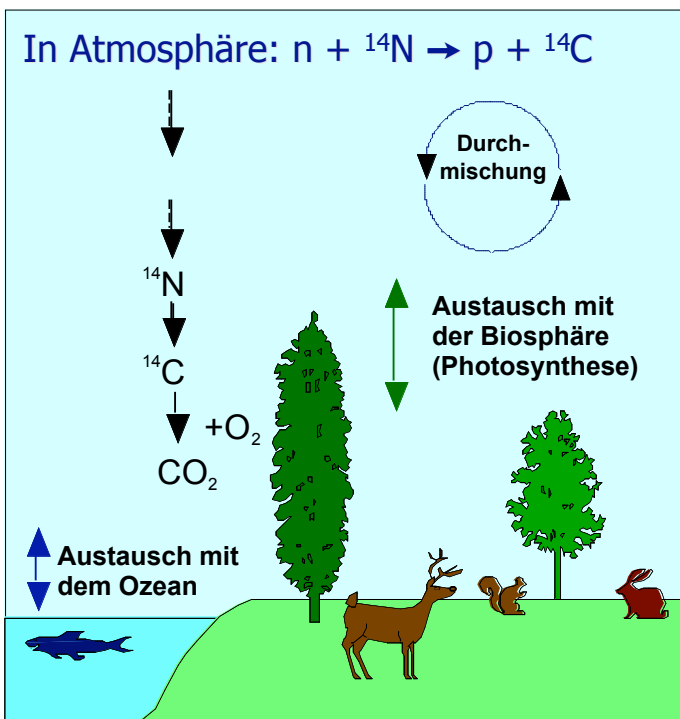
$$\Delta t = t_1 - t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_D(t_1)}{N_P(t_1)} \right)$$



W.F. Libby
Nobelpreis in Chemie
in 1960

bei bekanntem λ und gemessenen $N_D/N_P \longrightarrow$ Alter
bestimmen

Prinzip der ^{14}C (Radiokarbon) - Datierungsmethode



Atmosphäre:

Etwa konstante ^{14}C -Konzentration:
Produktion = Zerfall + Austausch

$$A_0 = {}^{14}\text{C} / {}^{12}\text{C} = 1.2 \cdot 10^{-12}$$

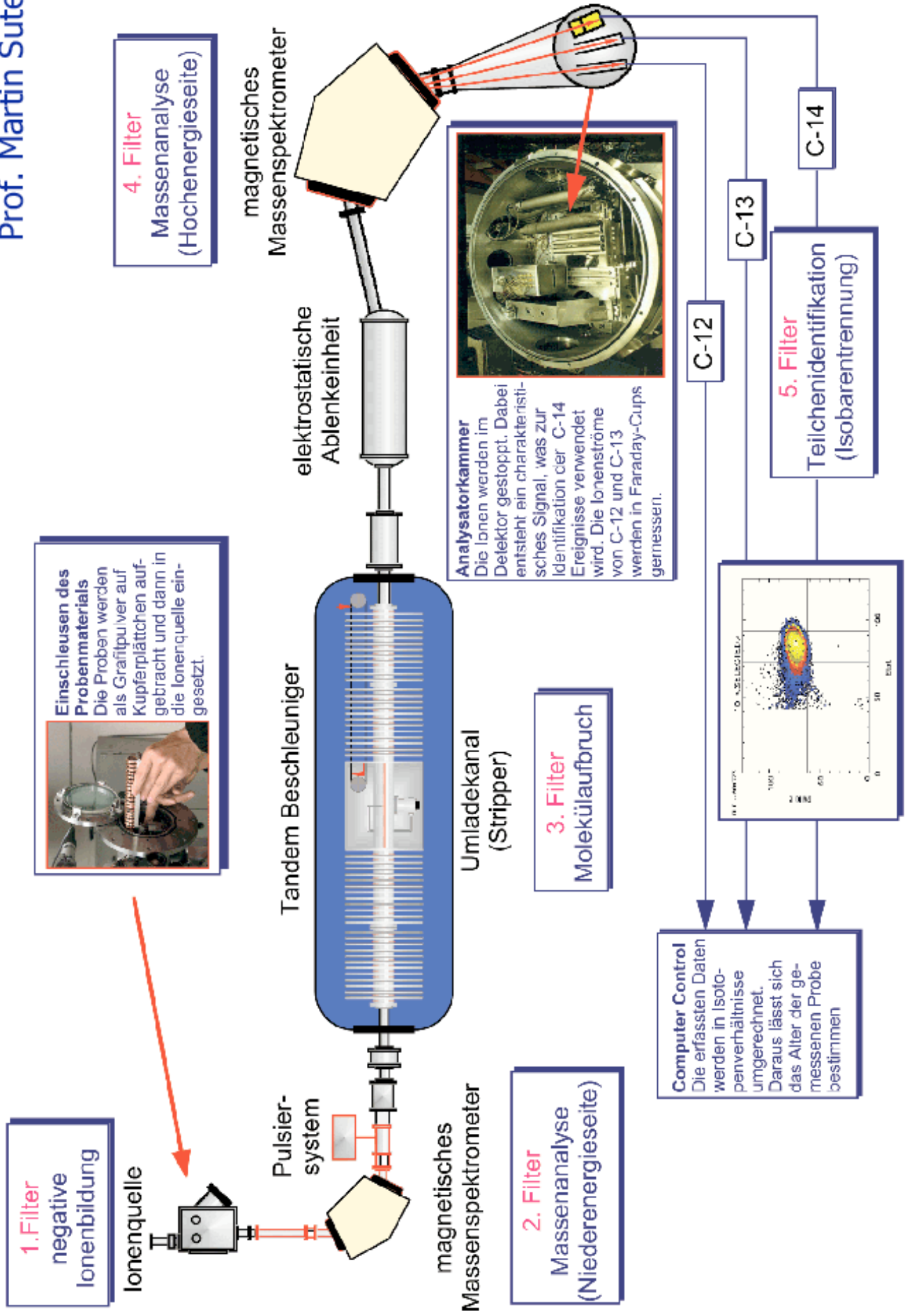
$$A_0 = 13.6 \text{ Zerfälle/Minute/g Kohlenstoff}$$

Wenn kein Austausch mit der Atmosphäre besteht, gilt:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$
$$= 1/\lambda \ln(A_0/A),$$
$$\lambda = \ln(2)/t_{1/2}, t_{1/2} = 5730 \text{ y}$$

Accelerator Mass Spectrometry (AMS) am IPP der ETH Zürich

Prof. Martin Suter

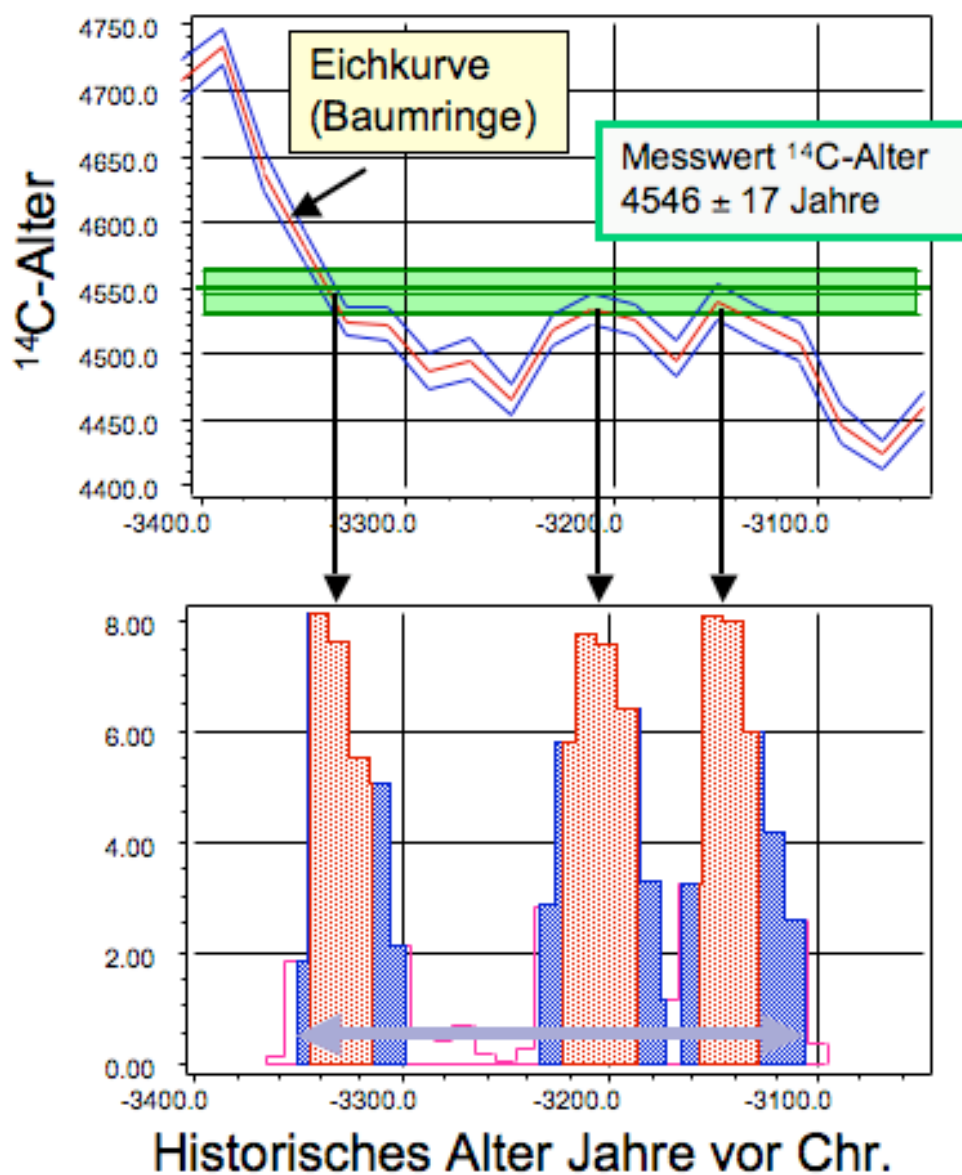




Das Alter des Ötzi

Wahrscheinlichkeitsverteilung
ergibt 3 Zeitintervalle:

3110 - 3350 vor Chr.





Datierung des
Bundesbriefes im
Rahmen einer
MTW-TV-Sendung 1991
(700 Jahr-Feier)

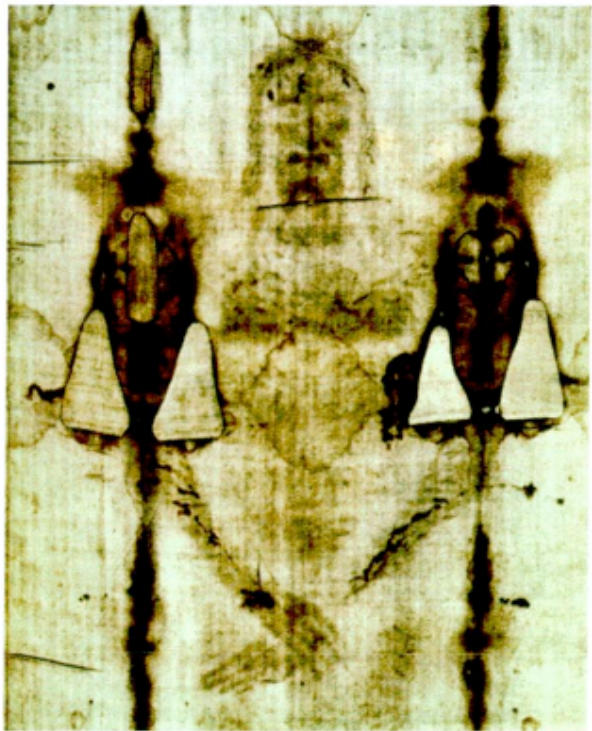
3 Proben: 1 x 10 mm
total ca. 12 mg

Mit **85 %** Wahrscheinlichkeit liegt das **wahre Alter**
zwischen 1252 und 1312.

Die Vermutung einiger Historiker, dass der Brief erst
im 15. Jahrhundert geschrieben wurde kann mit
dieser Messung weitgehend ausgeschlossen werden.

Prof. W. Wölfl und
Dr. G. Bonani (ETHZ)
bei der Probennahme





Shroud of Turin
Radiocarbon age:
 691 ± 31 years

