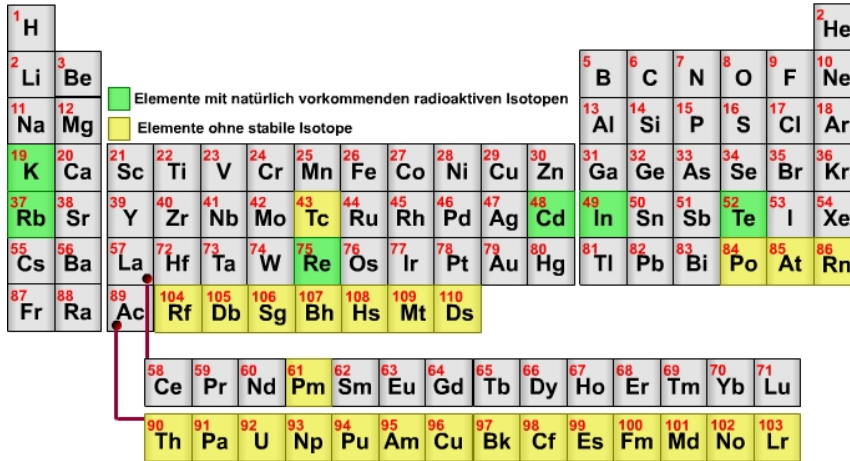


2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (2)

Periodensystem der Elemente vs. Nuklidkarte

ca. 115 unterschiedliche chemische Elemente \Rightarrow Periodensystem der Elemente

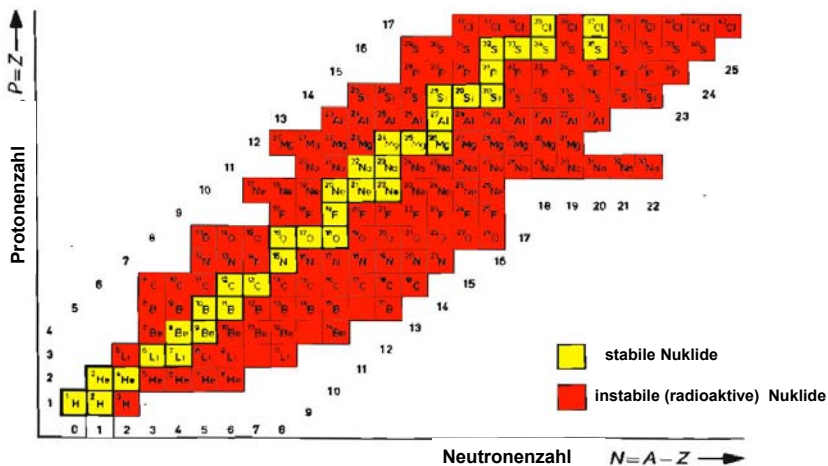


7

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (3)

Periodensystem der Elemente vs. Nuklidkarte

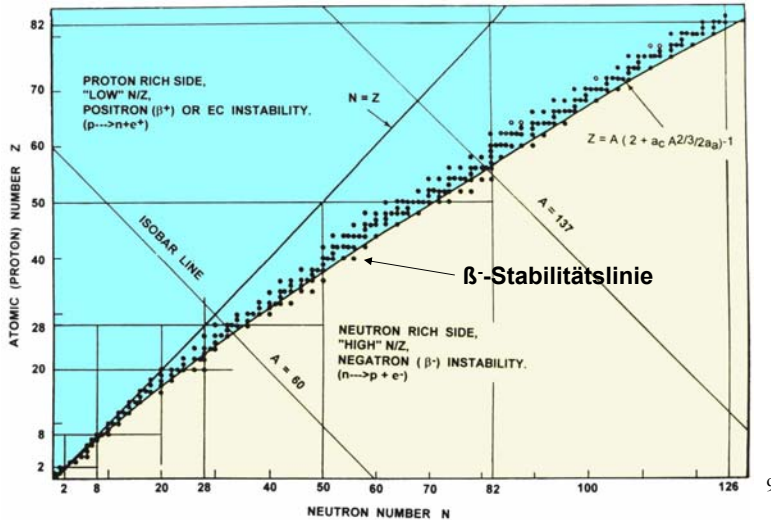
ca. 2800 unterschiedliche Nuklide \Rightarrow Nuklidkarte



8

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (4)

Abhängigkeit der Kernstabilität von der Kernzusammensetzung



2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (5)

Protonen/Neutron-Zahl

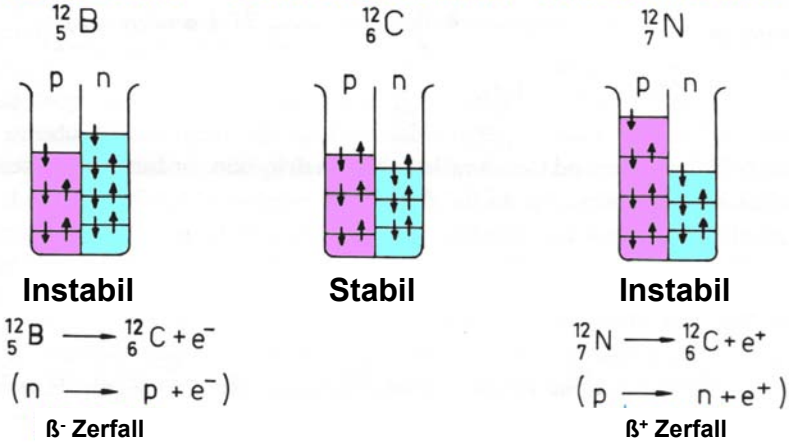
Statistisches Ergebnis bei der Betrachtung aller stabilen Nuklide

Protonenzahl	Neutronenzahl	Auftreten
gerade (g)	gerade (g)	sehr häufig, 158 Kerne
gerade (g)	ungerade (u)	häufig, 53 Kerne
ungerade (u)	gerade (g)	häufig, 50 Kerne
ungerade (u)	ungerade (u)	selten, nur 6 Kerne

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (6)

Die Theorie getrennter Protonen- und Neutronenorbitale

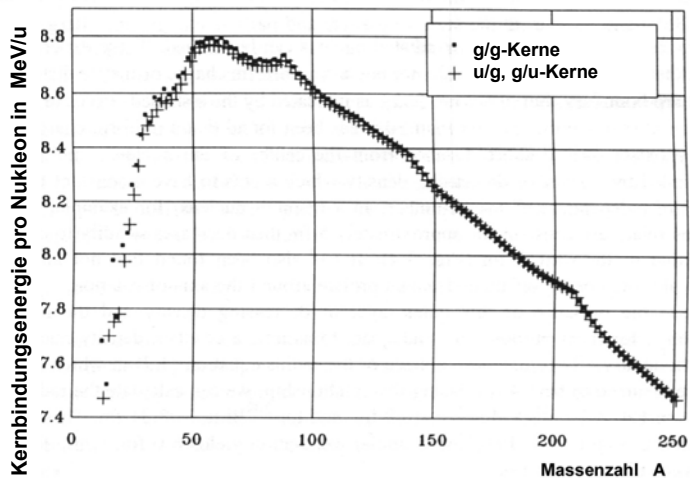
Isobare Kerne ^{12}X mit angenommenen Nukleonenorbitalen



11

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (7)

Kernbindungsenergie und Nuklidmassen



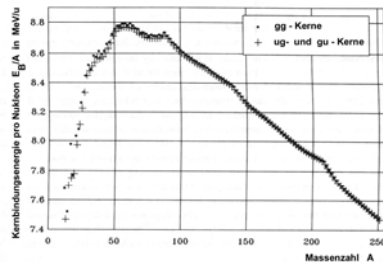
12

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (8)

Kernbindungsenergie und Nuklidmassen

Beachte!

Protonenmasse: 1.67252×10^{-27} kg
 Neutronenmasse: 1.67482×10^{-27} kg



Die Masse eines Atomkerns ist stets kleiner als die Summe der Massen seiner Bestandteile.

Masse eines Nuklids: $M = Z M_{\text{Proton}} + N M_{\text{Neutron}} - \delta_M$ wobei δ_M dem Massendefekt entspricht.

$$E = m c^2$$

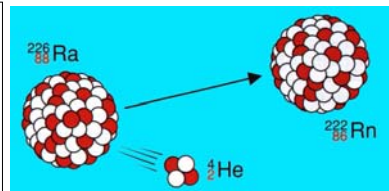
13

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (9)

α - Strahlung

Emission eines Heliumkernes

- Die Kernladung nimmt um 2 Einheiten ab
- Die Atommasse nimmt um 4 Einheiten ab
- Typisch für schwere Kerne
- Das α -Teilchen übernimmt nahezu die gesamte Energie des Zerfalls (geringe Masse im Vergleich zum Rückstoßkern)



Nach der Gleichung $\Delta E = (M_{\text{Mutter}} - M_{\text{Tochter}} - M_{\alpha}) c^2$ sollten alle Kerne mit $A > 140$ einem α -Zerfall unterliegen

- Ein He-Kern besitzt eine ausgesprochen hohe Kernbindungsenergie
- Der Zerfall ist jedoch kinetisch gehindert (hohe Energiebarriere, die vom α -Teilchen getunnelt werden muss)

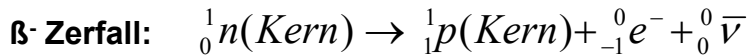
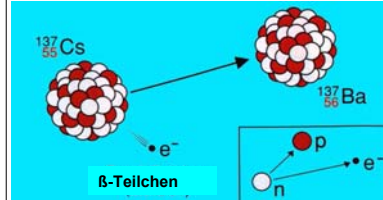
14

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (12)

β^- - Strahlung

Emission eines β^- -Teilchens („Kernelektron“)

- Ordnungszahl steigt um eine Einheit
- Massenzahl bleibt (fast) unverändert
- Typisch für Kerne mit Neutronenüberschuss
- interne Umwandlung eines Neutrons in ein Proton (+ β^- -Teilchen + Antineutrino)



- Die Bildung eines Antineutrinos ist wegen des Drehimpuls- und des Energieerhaltungssatzes dringend notwendig
- Aufteilung der Energie zwischen dem β^- -Teilchen und dem Antineutrino
- Kommt oft zusammen mit γ -Strahlung vor

17

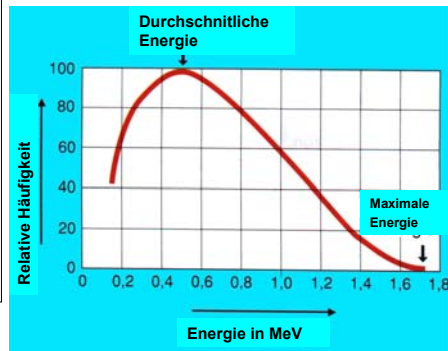
2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (13)

β^- - Strahlung

β^- -Spektren

- β^- -Teilchen eines Zerfalls besitzen keine definierte Energie
- Die Energie des Zerfalls verteilt sich zwischen dem β^- -Teilchen und dem Antineutrino
- Typische Parameter sind E_{max} und $E_{\text{Durchschnitt}}$
- $E_{\text{Durchschnitt}}$ ist ca. $1/3 E_{\text{max}}$

Typisches β^- -Spektrum



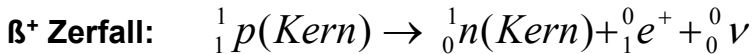
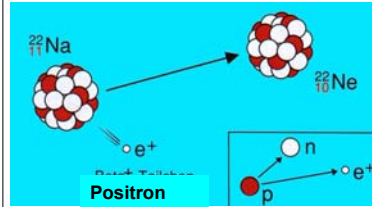
18

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (14)

β^+ - Strahlung

Emission eines Positrons (β^+ -Teilchens)

- Ordnungszahl nimmt um eine Einheit ab
- Massenzahl bleibt (fast) unverändert
- typisch für Nuklide mit Protonenüberschuss
- Interne Umwandlung eines Protons in ein Neutron (+ Positron + Neutrino)



- Die Bildung eines Neutrinos ist wegen des Drehimpuls- und des Energieerhaltungssatzes dringend notwendig
- Ähnlicher Prozess wie beim β^- -Zerfall
- Emission eines Neutrinos

19

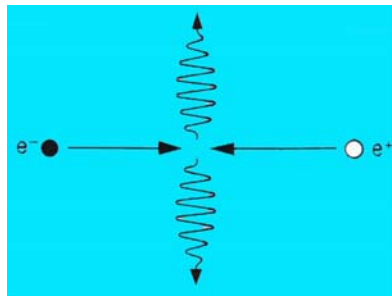
2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (15)

β^+ - Strahlung

Emission eines Positrons (β^+ -Teilchens)

- Ein Positron ist nicht stabil und reagiert sofort mit einem Elektron unter Bildung zweier γ -Quanten
- Umwandlung von **Materie in Energie**
- keine β^+ -Spektren messbar
- Es werden **zwei** γ -Quanten mit definierter Energie ($E = m c^2$) emittiert
- Die Quanten werden in einem Winkel von 180° zueinander emittiert

Annihilation eines Positrons



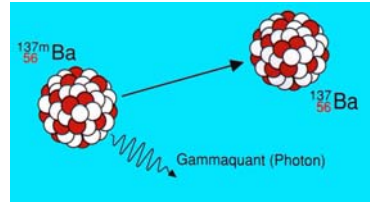
20

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (16)

γ -Strahlung

Emission von elektromagnetischer Strahlung durch einen Kernzerfall

- Keine Änderung von Ordnungszahl und Massenzahl
- Relaxation eines angeregten Zustands in den Grundzustand des Atomkerns



- γ -Strahlung kommt häufig in Verbindung mit α - oder β -Prozessen vor
- reine γ -Emitter sind selten (metastabile Kernisomere)
- Elektromagnetische Strahlung mit hohem Durchdringungsvermögen

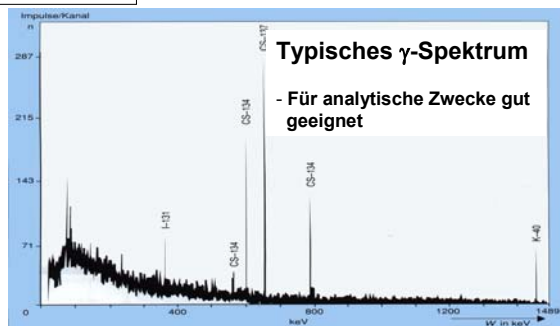
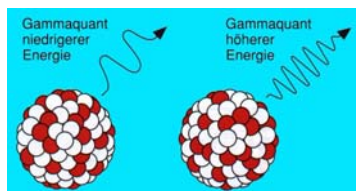
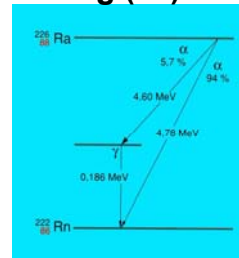
21

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (17)

γ -Strahlung

γ -Spektren

- Diskrete Linienspektren stehen für die γ -Übergänge eines Kernzerfalls
- γ -Linien sind für definierte Übergänge repräsentativ
- nuklidspezifische Spektren



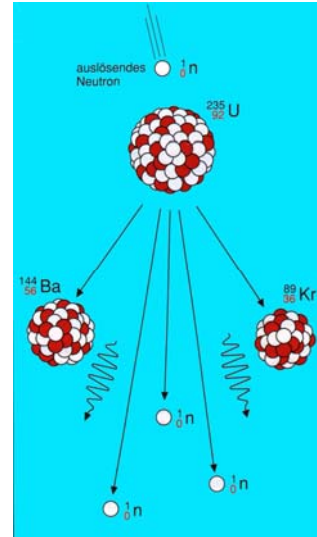
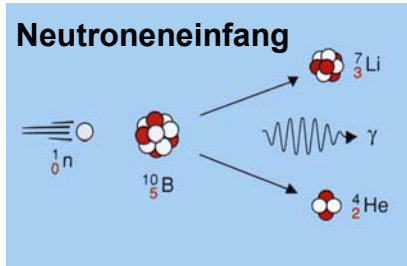
22

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (18)

Neutronenstrahlung

- Bildung z.B. bei Kernspaltung
- Neutronen besitzen keine Ladung
- Keine direkte Wechselwirkungen mit der Elektronenhülle

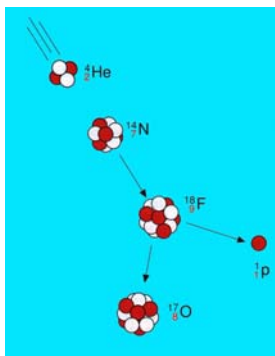
Typische Reaktion eines Neutrons



23

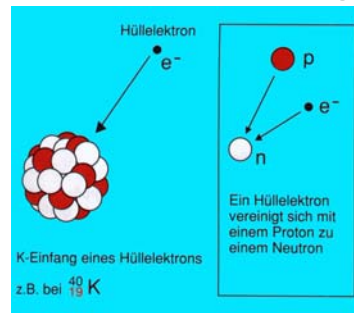
2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (19)

Protonenstrahlung



- Sehr seltener Zerfallstyp
- erst 1982 entdeckt
- findet bei protonenreichen Kernen statt
- Konkurrenz zum häufiger ablaufenden β^+ -Zerfall

Elektroneneinfang

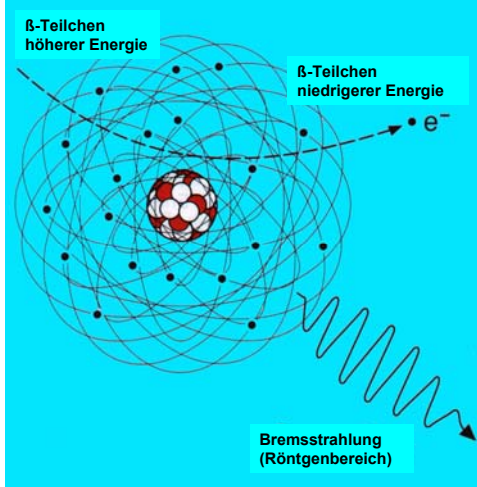


- Einfang eines K-Elektrons bei protonenreichen Kernen
- Umwandlung eines Protons in ein Neutron
- mit Positronenzerfall vergleichbar
- Ordnungszahl nimmt um eine Einheit ab

24

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (20)

Bremsstrahlung



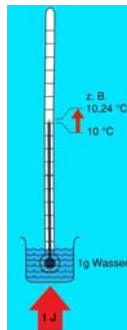
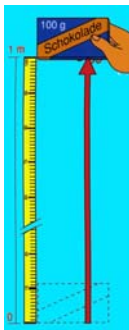
- Keine direkte Kernstrahlung
- Sekundärstrahlung, die entsteht, wenn β-Teilchen die Elektronenhüllen von Atomen durchqueren
- β-Teilchen verlieren einen Teil ihrer Energie
- Diese Energie wird vom Atom als sekundäre Röntgenstrahlung (Bremsstrahlung) abgegeben
- Bremsstrahlung nimmt mit der Kernladung des Absorbers zu

(Hat Konsequenzen für die Abschirmung von β-Strahlung)

25

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (21)

Energie radioaktiver Strahlung



Typische Energien für α-Teilchen

Isotop	Typische Energie (MeV)
²¹⁰ Po	5,30438
²²² Rn	5,48952
²²⁶ Ra	4,78438; 4,6017
²³⁸ U	4,197 ...
²³⁹ Po	5,157, 5,144 ...

Typische Energien für β-Teilchen

Isotop	Energie (MeV)
⁶⁰ Co	0,3 ; 1,5
²⁸⁵ Kr	0,7.....
¹³¹ I	0,6.....

Typische Energien für γ-Strahlung

Isotop	Energie (MeV)
^{137m} Ba	0,602
^{99m} Tc	0,140

Typischer Energiebereich: 1 eV

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 6,242 \times 10^{18} \text{ eV}$$

Beachte! Die Energie bezieht sich auf ein Teilchen, nicht auf ein Mol

26

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (22)

Reichweite radioaktiver Strahlung

Die Reichweite radioaktiver Strahlung ist vom Strahlungstyp abhängig

α -Strahlung besteht aus großen Teilchen

β -Strahlung besteht aus kleinen Teilchen

γ -Strahlung besteht aus Photonen (elektromagnetische Strahlung)

Die Reichweite radioaktiver Strahlung ist energieabhängig

Reichweite von α -Teilchen

Energie in MeV	Reichweite in		
	Luft	Muskelgewebe	Aluminium
1	0.32 cm	4 μm	2 μm
4	2.5 cm	31 μm	16 μm
6	4.6 cm	56 μm	30 μm
8	7.4 cm	91 μm	48 μm
10	10.6 cm	130 μm	67 μm

27

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (23)

Reichweite radioaktiver Strahlung

Reichweite von β -Teilchen

Energie in MeV	Reichweite in		
	Luft	Muskelgewebe	Aluminium
0.01	3 mm	2.5 μm	9 μm
0.5	1.2 m	1.87 mm	0.6 mm
1	3.06 m	4.75 mm	1.5 mm
10	39 m	60 mm	19 mm

Reichweite von γ -Strahlung

(Beachte! Halbwertsschichten, nicht Reichweite)

Energie in MeV	Halbwertsschichten in		
	Wasser	Beton	Blei
0.01	4.15 cm	1.75 cm	0.1 mm
0.5	7.2 cm	3.4 cm	0.4 cm
1	9.8 cm	4.6 cm	0.9 cm
10	31 cm	12.9 cm	1.2 cm

28

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (24)

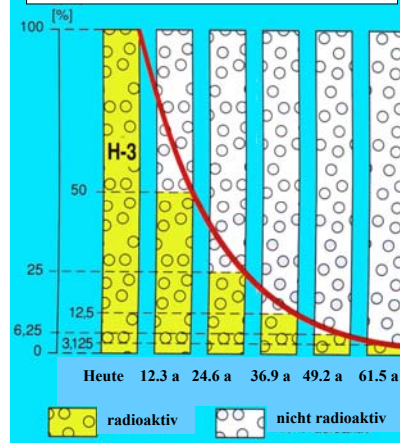
Halbwertszeit radioaktiver Nuklide

- Der Zerfall radioaktiver Kerne ist ein statistischer Prozess
- Zeitgesetz erster Ordnung:
 $A \rightarrow B + X + \Delta E$
- Halbwertszeiten sind charakteristisch für die individuellen Nuklide

Isotop	Symbol	Halbwertszeit	Zerfall
Uranium-238	${}^{238}_{92}\text{U}$	$4,468 \times 10^9 \text{ a}$	α
Kalium-40	${}^{40}_{19}\text{K}$	$1,28 \times 10^9 \text{ a}$	β^- , K
Plutonium-239	${}^{239}_{94}\text{Pu}$	$2,411 \times 10^4 \text{ a}$	α
Cäsium-137	${}^{137}_{55}\text{Cs}$	30,17 a	β^-
Iod-131	${}^{131}_{53}\text{I}$	8,02 d	β^-
Thorium-231	${}^{231}_{90}\text{Th}$	25,5 h	β^-
Radon-220	${}^{220}_{86}\text{Rn}$	55,6 s	α
Polonium-214	${}^{214}_{84}\text{Po}$	$1,64 \times 10^{-4} \text{ s}$	α

Beispiel: Zerfall von Tritium

$$T_{1/2} = 12.3 \text{ a}$$

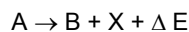


29

2) Kernstabilität und radioaktive Strahlung (25)

Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls

- Der radioaktive Zerfall ist ein statistischer Prozess
- Zeitgesetz erster Ordnung:



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

$N_0 =$ Zahl der radioaktiven Kerne bei $t = 0$
 $N =$ Zahl der radioaktiven Kerne bei $t = t$
 $\lambda =$ Zerfallskonstante (s^{-1})

- Zusammenhang mit der Halbwertszeit:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}, \quad \ln 2 = \lambda T_{1/2} \quad \text{oder} \quad 0,5 = e^{-\lambda t}$$

30