

-
- 1a.** Beschreiben Sie den Atomaufbau (d. h. Größe, Größenabhängigkeit, Masse, Massenverteilung, Bestandteile, Aufbau, Schalenstruktur....).
- b.** Was bezeichnet man als α -, β^- , β^+ und γ -Strahlung? Welche Reaktionsgleichungen beschreiben die Kernumwandlungen, die α -, β^- und β^+ -Strahlung freisetzen?
- c.** Was ist eine Elektroneneinfangsreaktion (EC)? Welche Strahlungsarten werden beim EC frei?
- d.** Was versteht man unter Spontanspaltung?
- e.** Nennen Sie für die ihnen bekannten radioaktiven Umwandlungsarten ein Beispiel aus der Nuklidkarte.
- f.** Nennen Sie jeweils drei Beispielnuklide aus (1) der Isobarenreihe, (2) der Isotopenreihe und (3) der Isotonenreihe, der ^{16}O angehört (siehe Abb. 1.)?
- g.** Welche Nuklide können als Spaltstoffe in Kernreaktoren verwendet werden?
- h.** Bestimmen Sie die Energie von gelbem Licht ($\lambda = 580 \text{ nm}$) in der Einheit eV. Welche Wellenlänge hat Röntgenstrahlung mit einer Energie von 50 keV?
- i.** Wie viel Prozent der Masse werden bei der Spontanspaltung des ^{238}U in Energie umgewandelt? (einfache Abschätzung reicht!)
- 2.** In einem Fusionsreaktor soll die Reaktion ^2H mit ^3H mit dem Endprodukt ^4He eine wichtige Rolle bei der Energieerzeugung spielen.
- a.** Wie lautet die Reaktionsgleichung?
- b.** ^3H existiert nicht in ausreichender Menge natürlich, sondern soll in der Reaktorwand (Blanket) vorzugsweise durch eine Neutronenreaktion mit ^6Li , bei der neben ^3H auch ^4He entsteht, erzeugt werden. Wie lautet die Reaktionsgleichung?
- c.** Welche Gesamtenergie wird unter Berücksichtigung der unter **a.** und **b.** genannten Reaktionen frei im Fusionsreaktor frei?
- d.** Nehmen Sie (für eine grobe Abschätzung) an, dass die gesamte Stromproduktion Deutschlands eines Jahres ($\sim 600 \cdot 10^9 \text{ kWh}$) durch Fusionsreaktoren gedeckt werden soll, wobei für das Fusionskraftwerk ein Wirkungsgrad von $\sim 10\%$ angenommen werden soll. Welche Gesamtmasse an ^2H und ^6Li wird pro Jahr benötigt?
- 3.** Im Dünger Sortiment eines Gartenbauzentrums wird "60er Kali" (Anteil der Verbindung K_2O 60%) in Gebinden von 25 kg angeboten.
- a.** Berechnen Sie die spezifische und die Gesamtaktivität eines Düngersacks.
- b.** Der Dünger soll mit einem LKW (Zuladung 30 t) transportiert werden. Welche Gesamtaktivität hat er geladen?
- c.** Ein Hektar landwirtschaftlichen Bodens enthält in Deutschland durchschnittlich 35 kg K_2O . Welcher Kontamination (in der Einheit Bq/m^2) entspricht dies?
- 4.** Im Labor soll mit einer ^{57}Co Strahlenquelle experimentiert werden.
- a.** Beschreiben Sie anhand des Zerfallsschemas die Zerfallseigenschaften des ^{57}Co . Welche sind die wichtigsten Strahlungen, die eine gekapselte ^{57}Co -Quelle aussendet? (siehe Anlage)
- b.** Eine Quelle, die im Januar 2008 gekauft und vom Hersteller mit 1,85 GBq zum Referenzzeitpunkt am 01.01.2008 um 00:00:00 h spezifiziert wurde, soll am 15.05.2008 um 10:00 h für Messungen verwendet werden. Welche Aktivität hat die Quelle?
- c.** Zur Abschirmung der Quelle sollen Eisenquader mit Dichte $\rho = 7,874 \text{ g cm}^{-3}$ verwendet werden. Im Labor sind Quadersteine mit 5 cm und 2,5 cm verfügbar. Wie stark wird die γ -Strahlung mit höchster Intensität, wie stark wird die γ -Strahlung mit höchster Energie geschwächt?
- d.** Wie groß ist die Halbwertsdicke des Fe für die ^{57}Co γ -Strahlung höchster Intensität, wie groß ist der entsprechende Gesamtwirkungsquerschnitt?

Karlsruher Nuklidkarte 2006

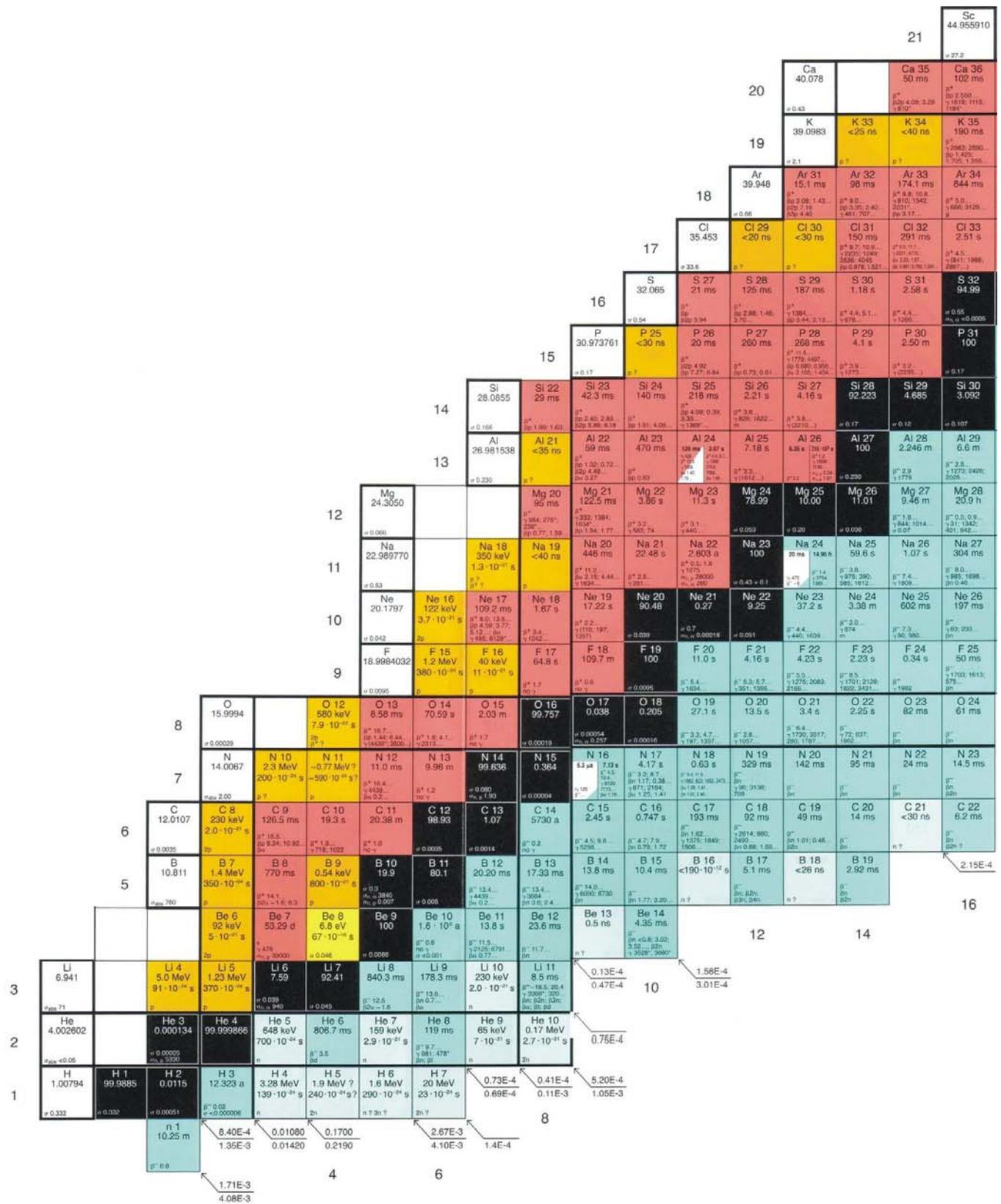


Abb. 1. Ausschnitt aus der Nuklidkarte Z = 1 - 20

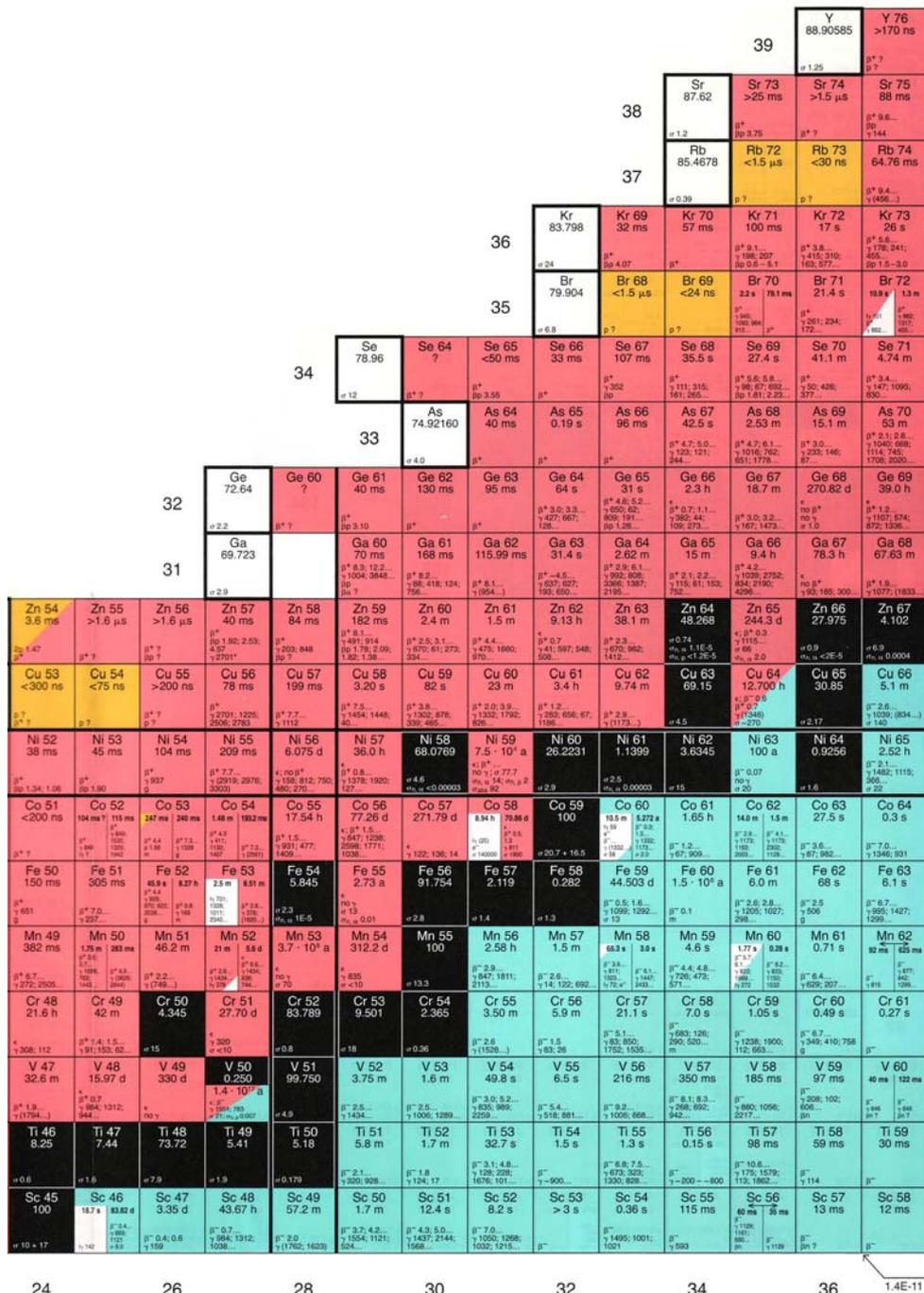


Abb. 2. Ausschnitt aus der Nuklidkarte Z = 21 - 39

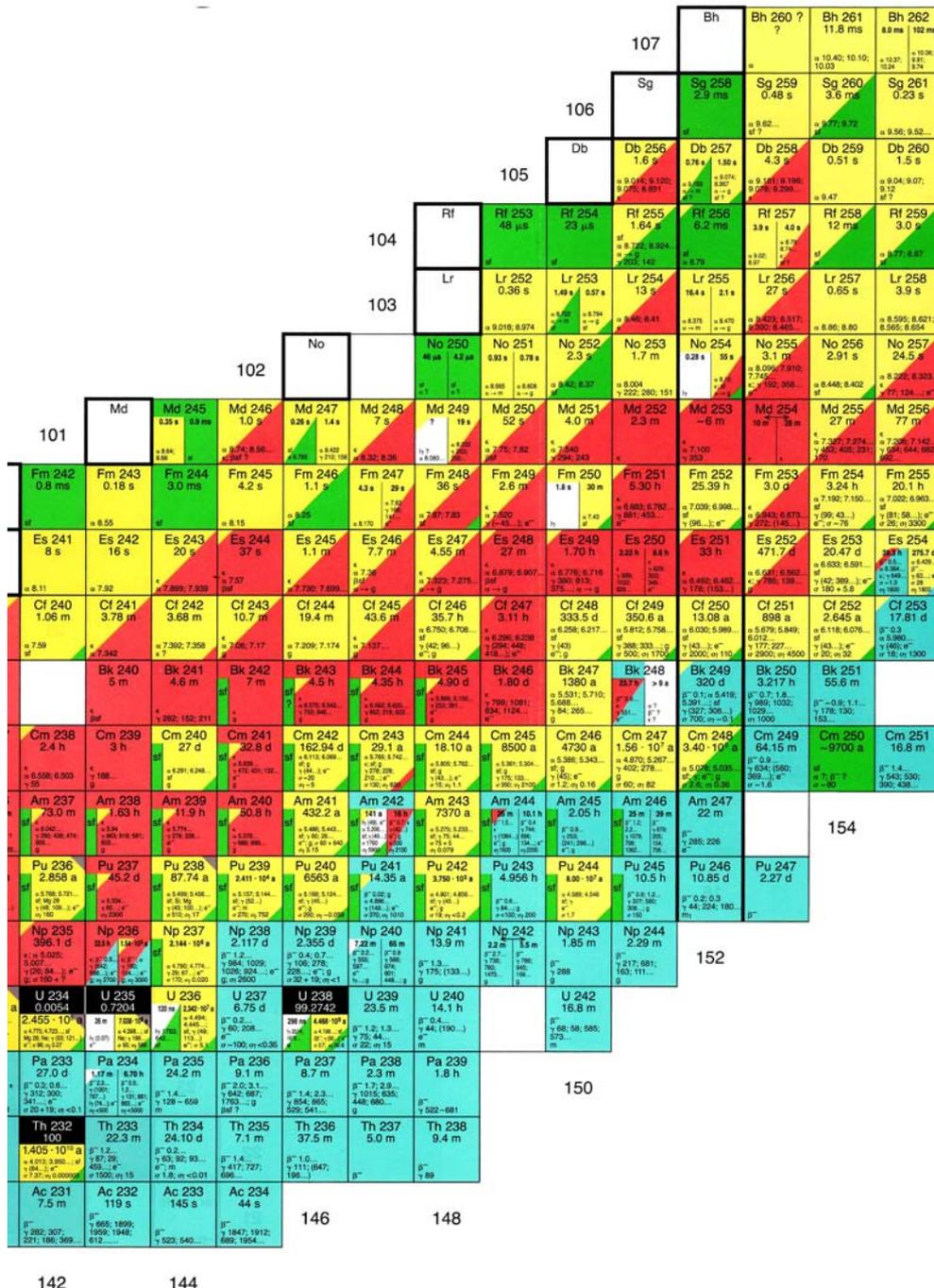
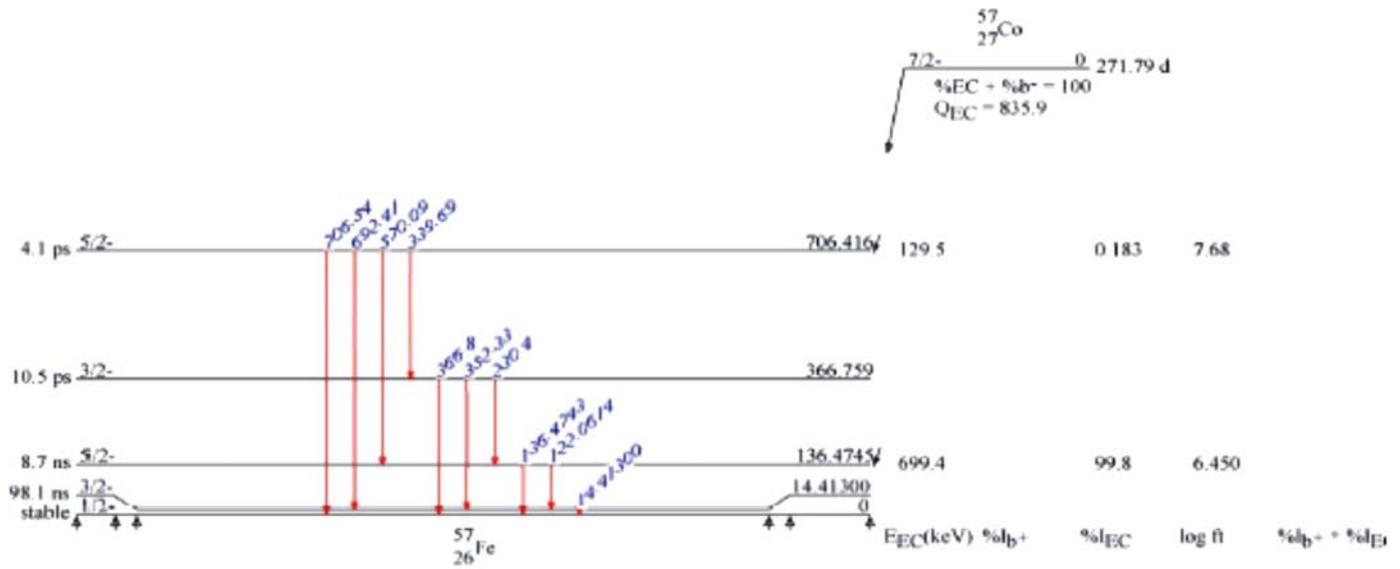


Abb. 3. Ausschnitt aus der Nuklidkarte Z = 89 - 107

Tabelle 2 Massenschwächungskoeffizient für Eisen (Fe). Dichte: $\rho = 7,874 \text{ g cm}^{-3}$

Iron Z = 26 ASCII format		
Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1,00000E-03	9,085E+03	9,052E+03
1,50000E-03	3,399E+03	3,388E+03
2,00000E-03	1,626E+03	1,620E+03
3,00000E-03	5,576E+02	5,535E+02
4,00000E-03	2,567E+02	2,536E+02
5,00000E-03	1,398E+02	1,372E+02
6,00000E-03	8,484E+01	8,265E+01
7,11200E-03	5,319E+01	5,133E+01
K 7,11200E-03	4,076E+02	2,978E+02
8,00000E-03	3,056E+02	2,316E+02
1,00000E-02	1,706E+02	1,369E+02
1,50000E-02	5,708E+01	4,896E+01
2,00000E-02	2,568E+01	2,260E+01
3,00000E-02	8,176E+00	7,251E+00
4,00000E-02	3,629E+00	3,155E+00
5,00000E-02	1,958E+00	1,638E+00
6,00000E-02	1,205E+00	9,555E-01
8,00000E-02	5,952E-01	4,104E-01
1,00000E-01	3,717E-01	2,177E-01
1,50000E-01	1,964E-01	7,961E-02
2,00000E-01	1,460E-01	4,825E-02
3,00000E-01	1,099E-01	3,361E-02
4,00000E-01	9,400E-02	3,039E-02
5,00000E-01	8,414E-02	2,914E-02
6,00000E-01	7,704E-02	2,836E-02
8,00000E-01	6,699E-02	2,714E-02
1,00000E+00	5,995E-02	2,603E-02
1,25000E+00	5,350E-02	2,472E-02
1,50000E+00	4,883E-02	2,360E-02
2,00000E+00	4,265E-02	2,199E-02
3,00000E+00	3,621E-02	2,042E-02
4,00000E+00	3,312E-02	1,990E-02
5,00000E+00	3,146E-02	1,983E-02
6,00000E+00	3,057E-02	1,997E-02
8,00000E+00	2,991E-02	2,050E-02
1,00000E+01	2,994E-02	2,108E-02
1,50000E+01	3,092E-02	2,221E-02
2,00000E+01	3,224E-02	2,292E-02

Abb. 5 Zerfallsschema des ^{57}Co



$^{57}\text{Fe}:^{57}\text{Co}$ ϵ decay

E_γ	E_{level}	$J\pi_i$	$J\pi_f$	Mult	δ	I_γ^\dagger	$T_{1/2}$	α
14.41300 15	14.41300 15	3/2-	1/2-	M1+E2	0.00219 17	9.16 15	98.1 ns 3	8.18 11
122.0614 3	136.4745 12	5/2-	3/2-	M1+E2	+0.120 1	85.60 17	8.7 ns 3	0.0240 14
136.4743 5	136.4745 12	5/2-	1/2-	E2		10.68 8	8.7 ns 3	0.137 15
230.4 4	366.759 7	3/2-	5/2-	M1+E2	+0.02 8	0.0004 4	10.5 ps 14	
352.33 2	366.759 7	3/2-	3/2-	M1+E2	+0.025 9	0.0132 3	10.5 ps 14	
366.8 3	366.759 7	3/2-	1/2-	M1+E2	-0.45 5	0.0013 3	10.5 ps 14	
339.69 21	706.416 16	5/2-	3/2-	M1+E2	+0.083 5	0.0139 3	4.1 ps 11	
570.09 20	706.416 16	5/2-	5/2-	M1+E2	+0.097 8	0.017 1	4.1 ps 11	
692.41 7	706.416 16	5/2-	3/2-	M1+E2	-0.465 8	0.157 9	4.1 ps 11	
706.54 22	706.416 16	5/2-	1/2-	E2		0.0253 5	4.1 ps 11	

†: For absolute intensity per 100 decays, multiply by 1 .

Konstanten
Constants

Const:
Const:

Ref.: E. R. Cohen, B. N. Taylor, Journal of Physical and Chemical Reference Data 17, 1795 (1988)

c	299792458 m s ⁻¹	Lichtgeschwindigkeit Speed of light	Vitesse de la lumière Velocidad de la luz
h $\hbar = h/2\pi$	6,6260755 (40) · 10 ⁻³⁴ J s 1,05457266 (63) · 10 ⁻³⁴ J s	Planck-Konstante Planck constant	Constante de Planck Constante de Planck
$u = 1/N_A$	1,6605402 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3149432 (28) · 10 ⁻² MeV	Atomare Masseneinheit Atomic mass unit	Unité de masse atomique Unidad de masa atómica
$M_n = N_A \cdot m_n$ m_n m_n	1,008664904 (14) u 1,6749286 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3956563 (28) · 10 ² MeV	Ruhemasse des Neutrons Neutron rest mass	Masse au repos du neutron Masa en reposo del neutrón
$M_p = N_A \cdot m_p$ m_p m_p	1,007276470 (12) u 1,6726231 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3827231 (28) · 10 ² MeV	Ruhemasse des Protons Proton rest mass	Masse au repos du proton Masa en reposo del protón
$M_e = N_A \cdot m_e$ m_e m_e	5,48579903 (13) · 10 ⁻⁴ u 9,1093897 (54) · 10 ⁻³¹ kg 0,51099906 (15) MeV	Ruhemasse des Elektrons Electron rest mass	Masse au repos de l'électron Masa en reposo del electrón
e	1,60217733 (49) · 10 ⁻¹⁹ C 4,8032068 (15) · 10 ⁻¹⁰ esu	Elementarladung Elementary charge	Charge élémentaire Carga elemental
e/m_e	1,75881962 (53) · 10 ¹¹ C kg ⁻¹ 5,2728086 (16) · 10 ¹⁷ esu g ⁻¹	Spezifische Elektronenladung Specific electron charge	Charge massique de l'électron Carga específica del electrón
$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$	2,81794092 (38) · 10 ⁻¹⁵ m	Elektronenradius Electron radius	Rayon de l'électron Radio del electrón
a_0	5,29177249 (24) · 10 ⁻¹¹ m	Bohr-Radius Bohr radius	Rayon de Bohr Radio de Bohr
α	7,29735308 (33) · 10 ⁻³	Feinstruktur-Konstante Fine structure constant	Constante de la structure fine Constante de estructura fina
R_∞	1,0973731534 (13) · 10 ⁷ m ⁻¹	Rydberg-Konstante Rydberg constant	Constante de Rydberg Constante de Rydberg
N_A	6,0221367 (36) · 10 ²³ mol ⁻¹	Avogadro-Konstante Avogadro constant	Constante d'Avogadro Constante de Avogadro
V_m	2,241410 (19) · 10 ⁻² m ³ mol ⁻¹	Molvolumen eines idealen Gases unter Normalbedingungen Molar volume of an ideal gas at s. t. p.	Volumen molaire d'un gaz parfait aux conditions normales Volumen molar de un gas ideal en condiciones normales
R	8,314510 (70) J mol ⁻¹ K ⁻¹ 8,314510 (70) · 10 ⁷ erg mol ⁻¹ K ⁻¹	Universelle Gaskonstante Molar gas constant	Constante molaire des gaz Constante universal de los gases
$k = R/N_A$	1,380658 (12) · 10 ⁻²³ J K ⁻¹ 8,617385 (73) · 10 ⁻⁵ eV K ⁻¹	Boltzmann-Konstante Boltzmann constant	Constante de Boltzmann Constante de Boltzmann
$F = N_A \cdot e$	9,6485309 (29) · 10 ⁴ C mol ⁻¹ 2,89255680 (87) · 10 ¹⁴ esu mol ⁻¹	Faraday-Konstante Faraday constant	Constante de Faraday Constante de Faraday
1 Ci = 3,7 · 10 ¹⁰ Bq	Zerfälle s ⁻¹ Disintegrations s ⁻¹ Désintégrations s ⁻¹ Desintegraciones s ⁻¹	(see also inside back cover)	1 μA = 6,2415064 · 10 ¹² e s ⁻¹ 1 eV/Atom ≅ 23 kcal mol ⁻¹ 1 MeV/Ci ≅ 5,93 · 10 ⁻³ W 1 W ≅ 169 MeV/Ci
1 W ≅ 3,1 · 10 ¹⁰	Spaltungen s ⁻¹ Fissions s ⁻¹ Fissions s ⁻¹ Fisiones s ⁻¹		π = 3,141593 e = 2,718282 lg e = 0,434294 ln 10 = 2,302585 ln 2 = 0,693147
1 MWd ≅ 2,7 · 10 ²¹	Spaltungen Fissions ≅ 1 g Fissions Fisiones	spaltbares Material fissionable material smatière fissible material fisil	

Lösungen:

1a. Atome: Atome bestehen aus Kern und Hülle, Atomgröße ist nahezu unabhängig von der Ordnungszahl Z , Atomradius beträgt $\sim 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$, Atommasse ist ungefähr A mal atomare Masseneinheit ($A = Z + N$), atomare Masseneinheit = $(1/12)$ der Masse des Isotops ^{12}C \sim Masse eines Wasserstoffatoms, Masse (H-Atom) = $(1 \text{ g mol}^{-1}) / N_A = (1 \text{ g mol}^{-1}) / (6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, Kern besteht aus Nukleonen = Protonen und Neutronen, Hülle wird durch Elektronen gebildet, Masse des Kerns / Masse der Hülle > 2000 , Hülle hat Schalenstruktur, d.h. die Elektronen bilden Gruppen mit etwa gleicher Bindungsenergie, Bezeichnungen: 1, 2, 3, ..., n oder K-, L-, M-, N-, ..., Schale, Besetzungszahlen: K-Schale maximal 2, L-Schale maximal 8, M-Schale maximal 18, ..., die n -te Schale kann maximal $2n^2$ -Elektronen aufnehmen.

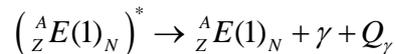
1b. α -, β -, γ - und Röntgenstrahlung Strahlung:

α -Teilchen: ${}^4_2\text{He}_2$ Kern bzw. ${}^4_2\text{He}_2^{++}$ - Ion wird aus dem Atomkern ausgesandt.

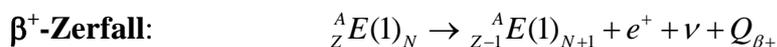
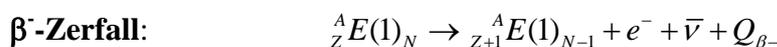
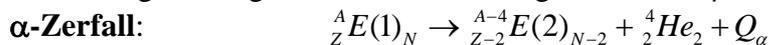
β^- - oder β^+ -Teilchen: Elektron oder Positron (negatives oder positives Elektron), das Positron ist das Antiteilchen zum Elektron

γ -Strahlung und Röntgenstrahlung: Elektromagnetische Wellenstrahlung, großer Frequenz (γ -Strahlung meist sehr große Frequenz, Röntgenstrahlung meist weniger große Frequenz; γ -Strahlung und Röntgenstrahlung besitzt sehr ausgeprägte Teilcheneigenschaft (Photon); γ -Strahlung und Röntgenstrahlung wird hinsichtlich der Entstehung unterschieden, γ -Strahlung entsteht durch Energieabgabe von Anregungszuständen im Atomkern, Röntgenstrahlung durch Elektronenübergänge in der Atomhülle.

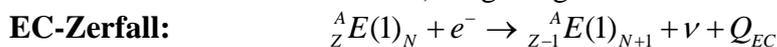
Für γ -Strahlung kann man formal die folgende Umwandlungsreaktion aufstellen:



Reaktionsgleichungen, die die Entstehung von α - und β -Strahlung beschreiben:



1c. EC-Elektroneneinfang: EC ist die Alternative zum β^+ -Zerfall. Da für die Bildung eines Positrons (Antimaterie) eine Energie vom zweifachen der Elektronenruhemasse $2 \cdot m_e = 2 \cdot 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$ erforderlich ist, ist ein β^+ -Zerfall nur dann möglich, wenn die Energiedifferenz zwischen Ausgangs- und Endzustand größer als 1022 keV ist. Alternativ kann (ohne Schwellenenergie von 1022 keV) eines der Hüllenelektronen (am häufigsten das K-Elektron der innersten Schale) eingefangen werden.



1d. Spontanspaltung bezeichnet (im Gegensatz zur induzierten Spaltung) eine spontane Zerlegung eines sehr schweren Atomkerns in leichtere Bruchstücke. Die Spontanspaltung tritt (ähnlich wie der α -Zerfall) ohne äußere Einwirkung auf und wird (ähnlich wie der α -Zerfall) durch den Tunneleffekt erklärt. Im Fall der Spontanspaltung besteht der Tunneleffekt darin, dass sich ein näherungsweise sphärischer Ausgangskern spontan zunächst in eine elliptische, dann in eine hantelförmige Konfiguration umwandelt, obwohl für diesen Vorgang eigentlich erhebliche Energie zur Vergrößerung der Oberflächenenergie führt (Spaltschwelle).

1e. Beispiele:

α -Zerfall:	${}^{222}\text{Rn}$
β^- -Zerfall:	${}^3\text{H}$
β^+ -Zerfall:	${}^{13}\text{N}$
EC-Zerfall:	${}^{41}\text{Ca}$
Spontanspaltung:	${}^{250}\text{Cm}$

1f. Isobarenreihe: ${}^{16}\text{O}$, ${}^{16}\text{N}$, ${}^{16}\text{C}$ **Isotopenreihe:** ${}^{15}\text{O}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$ **Isotonenreihe:** ${}^{17}\text{F}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{15}\text{N}$

1g. Spaltstoffe müssen ug-Kerne (g-gerade Protonenzahl, u-ungerade Neutronenzahl) besitzen, um beim Einfang eines Neutrons einen gg-Kern als Zwischenkern bilden zu können. Dadurch wird Energie frei, die zur Überwindung der Spaltschwelle benötigt wird.

1h. Berechnung der Energie von gelbem Licht:Es gilt: $E = h\nu$ und: $c = \nu\lambda$ Es folgt:
$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,99 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{580 \cdot 10^{-9} \text{ m}}$$

$$E = 3,416 \cdot 10^{19} \text{ J} = 2,13 \text{ eV}$$

Berechnung der Wellenlänge von Röntgenstrahlung der Energie 50 keV:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,99 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{50 \cdot 10^3 \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}$$

$$\lambda = 2,473 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0,02473 \text{ nm} = 24,73 \text{ pm}$$

1i. Einfache Abschätzung des relativen Massenverlustes bei der Spontanspaltung von ${}^{238}\text{U}$:
Bei einer Spaltung werden ungefähr 200 MeV Energie frei. Die Ausgangsmasse kann (ohne Berücksichtigung der genauen Bindungsenergie) mit 238 mal der atomaren Masseneinheit m_u abgeschätzt werden.

$$\frac{\Delta E}{E} \cong \frac{200 \text{ MeV}}{238 \cdot 931,49 \text{ MeV}} = 9,0 \cdot 10^{-4} = 0,090\%$$

2a. Fusionsreaktion ${}^2\text{H}$ mit ${}^3\text{H}$:Reaktionsgleichung: ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2 \rightarrow {}^4_2\text{H}_2 + {}^1_0\text{n}_1 + Q_1$ **2b. Erzeugung von ${}^3\text{H}$ aus ${}^6\text{Li}$:**Reaktionsgleichung: ${}^6_3\text{Li}_3 + {}^1_0\text{n}_1 \rightarrow {}^4_2\text{H}_2 + {}^3_1\text{H}_2 + Q_2$ **2c. Bestimmung von Q_1 :** $Q_1 = \{m({}^2_1\text{H}_1) + m({}^3_1\text{H}_2) - m({}^4_2\text{H}_2) - ({}^1_0\text{n}_1)\} c^2$

$$Q_1 = (13135,72 + 14949,79 - 2424,91 - 8071,32) \text{ keV}$$

$$Q_1 = 17589,28 \text{ keV}$$

Bestimmung von Q_2 : $Q_2 = \{m({}^6_3\text{Li}_3) + m({}^1_0\text{n}_1) - m({}^4_2\text{H}_2) + m({}^3_1\text{H}_2)\} c^2$

$$Q_2 = (14086,34 + 8071,32 - 2424,91 - 14949,79) \text{ keV}$$

$$Q_2 = 4782,96 \text{ keV}$$

Gesamtenergie: $Q_{ges} = 17589,28 \text{ keV} + 4782,96 \text{ keV} = 22372,24 \text{ keV}$

2d. Um eine elektrische Energie von $600 \cdot 10^9$ kWh mit einem Wirkungsgrad von 10% zu erzeugen, müssten primär $E_{ges} = 600 \cdot 10^{10}$ kWh aus der Fusion gewonnen werden. Die Zahl der be-

nötigten Reaktionen ist:
$$N = \frac{E_{ges}}{Q_{ges}} = \frac{600 \cdot 10^{10} \cdot 10^3 \text{ J s}^{-1} \cdot 3600 \text{ s}}{22372,24 \text{ keV}}$$

$$N_{ges} = \frac{6 \cdot 3,6 \cdot 10^{18} \text{ J}}{22372,24 \cdot 10^3 \text{ eV}} = \frac{2,16 \cdot 10^{19} \text{ J}}{2,23 \cdot 10^7 \text{ eV}} = 9,65 \cdot 10^{11} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$$

Es gilt: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$$N_{ges} = 9,65 \cdot 10^{11} \frac{\text{J}}{\text{eV}} = \frac{9,65 \cdot 10^{11} \text{ J}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 6 \cdot 10^{30}$$

Masse Deuterium:
$$m(^2\text{H}) = \frac{N_{ges}}{N_A} \cdot A_r(^2\text{H}) \cong \frac{6 \cdot 10^{30}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} 2 \text{ g mol}^{-1}$$

$$m(^2\text{H}) \cong \frac{6 \cdot 10^{30}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} 2 \text{ g mol}^{-1} = 1,99 \cdot 10^7 \text{ g}$$

$$m(^2\text{H}) \sim 20 \text{ t}$$

Masse des ^6Li :

$$m(^6\text{Li}) \sim 60 \text{ t}$$

3a. Gesamtaktivität eines 25 kg Düngersacks „60erKali“:

In 25 kg Dünger sind $0,6 \cdot 25 \text{ kg} = 15 \text{ kg}$ der Verbindung K_2O

Massenverhältnisse in der Verbindung K_2O

für Kalium:
$$\frac{A_r(\text{K})}{M_r(\text{K}_2\text{O})} = \frac{2 \cdot 39,0983 \text{ g mol}^{-1}}{(2 \cdot 39,0983 + 15,994) \text{ g mol}^{-1}} = 0,8302$$

Masse des Elements Kalium im Gebinde:

$$15 \text{ kg} \cdot 0,8302 = 12,45 \text{ kg}$$

Zahl der Atome:
$$N(^{\text{nat}}\text{K}) = \frac{m(\text{K})}{A_r(^{\text{nat}}\text{K})} \cdot N_A$$

$$N(^{\text{nat}}\text{K}) = \frac{12,45 \text{ kg}}{39,0983 \text{ g mol}^{-1}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$N(^{\text{nat}}\text{K}) = 1,92 \cdot 10^{26}$$

Relativer Anteil des Isotops ^{40}K (Atom%): 0,0117%

Zahl der ^{40}K -Atome:
$$N(^{40}\text{K}) = 1,92 \cdot 10^{26} \cdot 0,000117 = 2,2410^{22}$$

Aktivität:
$$A = -\lambda \cdot N(^{40}\text{K}) = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N(^{40}\text{K})$$

mit $T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9 \text{ a}$

$$A = -\frac{\ln 2}{1,28 \cdot 10^9 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s}} \cdot 2,24 \cdot 10^{22}$$

Gesamtaktivität:
$$A = -3,84 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1} = 384 \text{ kBq}$$

Spezifische Aktivität:
$$\frac{A}{m} = \frac{384 \text{ kBq}}{25 \text{ kg}} = 15,4 \text{ Bq g}^{-1}$$

3b. Aktivität einer Masse von 30 t Dünger:

Zahl der 25 kg-Säcke:
$$N_s = \frac{30000 \text{ kg}}{25 \text{ kg}} = 1200$$

Gesamtaktivität LKW:
$$A_{ges} = 384 \text{ kBq} \cdot 1200 = 460 \text{ MBq}$$

3c. Kontamination landwirtschaftlicher Flächen:

Eine Masse von 15 kg K₂O enthält 394 kBq.

Aktivität von 35 kg pro 1 ha = 10⁴ m²:

$$\frac{A}{F} = 35 \text{ kg} \cdot \frac{384 \text{ kBq}}{15 \text{ kg}} \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2} = 90 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$$

4a. Zerfalleigenschaften des ⁵⁷Co:

⁵⁷Co zerfällt durch reinen Elektroneneinfang. Da der Q_{EC}-Wert 835,9 keV < 1022 keV beträgt, ist ein β⁺-Zerfall nicht möglich. Der mit 99,8% stärkste Zerfallszweig führt zum zweiten Anregungszustand des ⁵⁷Fe bei der Energie von 136,474 keV. Ein weiterer, sehr schwacher EC-Zerfall führt mit einer rel. Intensität von 0,183% zum vierten Anregungszustand bei 706,4 keV.

Vom 706,4 keV Anregungszustand können vier γ-Strahlungen mit den Energien 706,54 keV, 692,41 keV, 570,09 keV und 339,69 keV ausgesandt werden, die zum Grundzustand des ⁵⁷Fe und in die ersten drei Anregungszustände des ⁵⁷Fe führen. Die Energie des zweiten Anregungszustand (136,47 keV) wird durch γ-Strahlungen der Energie 136,47 keV und 122,06 keV abgegeben, die in den Grundzustand und ersten Anregungszustand führen.

Eine gekapselte Quelle des ⁵⁷Co sendet als stärkste γ-Strahlung eine Energie von 122,06 keV mit 85,6% und als zweitstärkste Strahlung mit 10,68% eine Energie von 136,47 keV aus. Die γ-Strahlung mit einer Energie von 14,41 keV (Differenz von 135,47 und 122,06 keV) besitzt eine Intensität von 9,16%.

4b. Referenzintensität der Quelle: 1,85 GBq

Referenzdatum: 01.01.2008 um 00:00:00

Verwendungsdatum: 15.05.2008 um 10:00:00

Zeitdifferenz: Δt = 135,42 d = 1,17 · 10⁷ s

Aktivität zum Verwendungszeitpunkt:

$$A(\Delta t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \Delta t} = 1,85 \text{ GBq} \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 135,42 \text{ d}}{271,79 \text{ d}}}$$

$$A(\Delta t) = 1,85 \text{ GBq} \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 135,42 \text{ d}}{271,79 \text{ d}}} = 1,85 \text{ GBq} \cdot e^{-0,34536}$$

$$A(\Delta t) = 1,85 \cdot 0,70796 \text{ GBq} = 1,31 \text{ GBq}$$

4c. γ-Strahlung mit höchster Intensität: 122,06 keV, Intensität: 85,60 %

γ-Strahlung mit höchster Energie: 706,54 keV, Intensität: 0,0253 %

Bestimmung von $\frac{\mu}{\rho}$ für die Energien 122,06 keV und 706,5 keV

(logarithmische Interpolation)

E	mü/rho	ln(E)	ln(mü/rho)
keV	cm**2 g-1		
100	3,717E-01	4,605E+00	-9,897E-01
150	1,964E-01	5,011E+00	-1,628E+00
122	2,716E-01	4,805E+00	-1,303E+00

E	mü/rho	ln(E)	ln(mü/rho)
keV	cm**2 g-1		
600	7,704E-02	6,397E+00	-2,563E+00
800	6,699E-02	6,685E+00	-2,703E+00
707	7,116E-02	6,560E+00	-2,643E+00

Schwächung der 122 keV Strahlung in 2,5 cm Eisen:

$$\frac{I(x = 2,5 \text{ cm})}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x} = e^{-2,716 \cdot 10^{-1} \cdot 7,874 \cdot 2,5} = 0,004765 \cong 4,8 \cdot 10^{-3}$$

Schwächung der 122 keV Strahlung in 5 cm Eisen:

$$\frac{I(x = 5 \text{ cm})}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x} = e^{-2,716 \cdot 10^{-1} \cdot 7,874 \cdot 5} = 0,0000227 \cong 2,3 \cdot 10^{-5}$$

Schwächung der 707 keV Strahlung in 2,5 cm Eisen:

$$\frac{I(x = 2,5 \text{ cm})}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x} = e^{-7,116 \cdot 10^{-2} \cdot 7,874 \cdot 2,5} = 0,2464 \cong 2,5 \cdot 10^{-1}$$

Schwächung der 707 keV Strahlung in 5 cm Eisen:

$$\frac{I(x = 5 \text{ cm})}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x} = e^{-7,116 \cdot 10^{-2} \cdot 7,874 \cdot 5} = 0,0607 \cong 6,1 \cdot 10^{-2}$$

4d. Halbwertsdicke von Eisen für γ -Strahlung der Energie 122 keV:

$$D_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{(\mu/\rho) \cdot \rho} = \frac{\ln 2}{2,716 \cdot 10^{-1} \cdot 7,874} \text{ cm} = 0,324 \text{ cm}$$

Wirkungsquerschnitt:

Es gilt:
$$\frac{I(z)}{I_0} = e^{-\mu \cdot z} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot z} = e^{-n_T \cdot \sigma \cdot z}$$

es folgt:
$$\sigma = \frac{\mu}{n_T}$$

mit n_T = Zahl der Atome pro Volumeneinheit.

Es gilt:
$$n_T = \frac{\rho}{A_r} \cdot N_A = \frac{7,874 \text{ g cm}^{-3}}{55,845 \text{ g mol}^{-1}} \cdot 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$n_T = 8,49106 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma = \frac{\mu}{n_T} = \frac{(\mu/\rho) \cdot \rho}{n_T} = \frac{2,716 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \cdot 7,874 \text{ g cm}^{-3}}{8,49106 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}}$$

$$\sigma = \frac{2,716 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \cdot 7,874 \text{ g cm}^{-3}}{8,49106 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}} = 2,52 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 = 25,2 \text{ b}$$