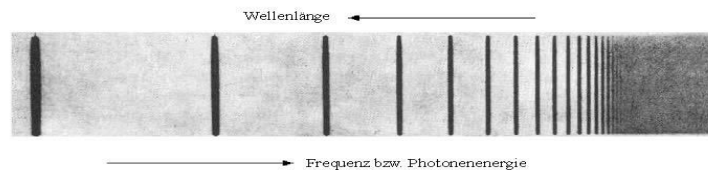
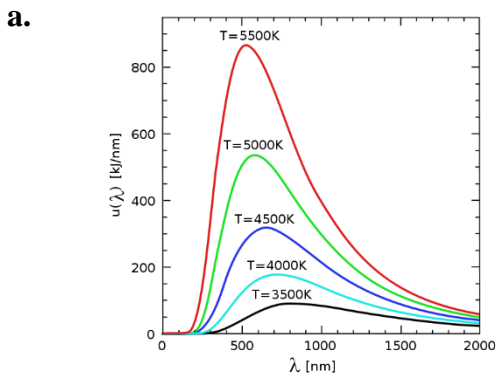


Name:.....Vorname:.....Mtrl. Nr:.....

1. Das Bohrsche Atommodell beschreibt in vereinfachter Form den Aufbau der Atome.
 - a. Nennen Sie die wesentlichen Annahmen des Modells.
 - b. Welches Kraftgesetz beschreibt die Wechselwirkung zwischen Atomkern und den Elektronen in der Hülle?
 - c. Was gilt für den Bahndrehimpuls $L = m \cdot r \cdot v$ der Hüllenelektronen?
 - d. Wie bezeichnet man die verschiedenen Elektronenschalen und die Unterschalen?
 - e. Wie viele Elektronen können die verschiedenen Elektronenschalen aufnehmen?

- 2a. Skizzieren Sie die spektrale Intensität $dI/d\lambda$ eines „schwarzen Körpers“ als Funktion der Wellenlänge λ für verschiedene Temperaturen.
- b. Wodurch unterscheiden sich die Strahlungsspektren „schwarzer Körper“ von den Spektren einer Gasentladungsröhre?



- b. Spektren "schwarzer Körper" sind kontinuierlich, Spektren von Gasentladungsröhren sind diskret.
-
3. Skizzieren Sie das Energieniveauschema des Wasserstoffatoms?

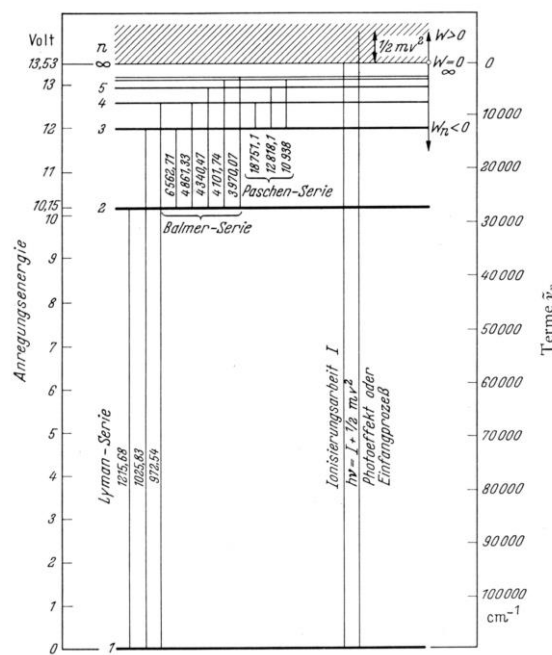


Abb. 15. Termschema des H-Atoms. Wellenlängen der Übergänge in Å



4. Die blaue H_{β} -Linie in der Balmer Serie des Wasserstoffspektrums wird beim Übergang eines Elektrons aus dem vierten Anregungszustand ($n = 4$) zum zweiten Anregungszustand ($n = 2$) ausgesandt.
Der Elektronenzustand mit der kleinsten Energie ($n = 1$) besitzt eine Bindungsenergie von $E_1 = -13,606 \text{ eV}$. Berechnen Sie aus diesen Angaben die Wellenlänge der H_{β} -Linie.

Energie des Grundzustands mit $n = 1$: $E_1 = -13,606 \text{ eV}$

Energie des Anregungszustands mit $n = 2$: $E_2 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{-13,606 \text{ eV}}{4} = -3,4015 \text{ eV}$

Energie des Anregungszustands mit $n = 4$: $E_4 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{-13,606 \text{ eV}}{16} = -0,8504 \text{ eV}$

Energie der H_{β} -Linie beträgt: $E_{H_{\beta}} = E_3 - E_2$
 $E_{H_{\beta}} = (-0,8504 \text{ eV}) - (-3,4015 \text{ eV})$
 $E_{H_{\beta}} = 2,5511 \text{ eV}$

Für den Zusammenhang von Energie E , Frequenz ν und Wellenlänge λ gilt:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Wellenlänge:

$$\lambda_{H_{\beta}} = \frac{h \cdot c}{E_{H_{\beta}}}$$

$$\lambda_{H_{\beta}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,997 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2,5511 \text{ eV}} =$$

$$\lambda_{H_{\beta}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,997 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2,5511 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ W s}}$$

$$\lambda_{H_{\beta}} = 4,8590 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 486 \text{ nm}$$

5. Vergleichen Sie die Energien verschiedener elektromagnetischer Strahlungsarten. Welche der genannten Strahlungsarten hat jeweils die größere Energie?
- IR und UKW
 - GA und XR
 - RA und SL
 - UV und GA
 - IR und SL

(Kurzbezeichnungen:

*IR-Strahlung (IR), UV-Strahlung (UV), Radarstrahlung (RA), sichtbares Licht (SL),
 γ -Strahlung aus radioaktivem Zerfall (GA), Radiostrahlung (UKW), Röntgenstrahlung (XR)).*

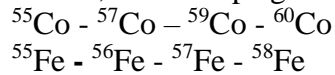
Lösung:

- IR
- Ga
- SL
- GA
- SL

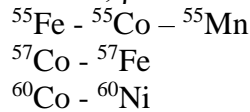
6. Nennen Sie die Teilmengen aus den genannten Nukliden, die Isotope, Isobare, Isotone sind?
 ^{60}Co , ^{57}Co , ^{60}Ni , ^{56}Fe , ^{55}Mn , ^{54}Cr , ^{57}Fe , ^{55}Fe , ^{55}Co , ^{58}Fe , ^{59}Co .



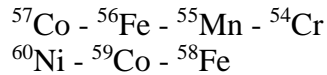
Isotope – $Z = \text{konstant}$; alle Isotope gehören zum gleichen Element.



Isobare – $A = \text{konstant}$; β -Umwandlungen erfolgen entlang von Isobarenreihen.



Isotone – $N = \text{konstant}$.



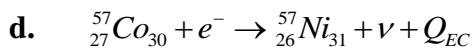
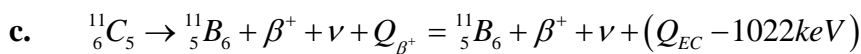
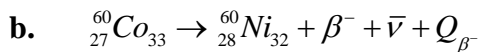
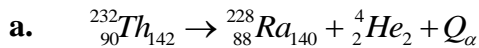
7. Beschreiben Sie die folgenden Umwandlungsreaktionen in Form einer Reaktionsgleichung:

a. den α -Zerfall des ${}^{232}\text{Th}$

b. den β^- -Zerfall des ${}^{60}\text{Co}$

c. den β^+ -Zerfall des ${}^{11}\text{C}$

d. den EC -Zerfall des ${}^{57}\text{Co}$



8a. Was versteht man unter einer "Spontanspaltung" des ${}^{238}\text{U}$?

b. Beschreiben Sie den Mechanismus der "neutroneninduzierten Spaltung" des ${}^{235}\text{U}$.

c. Welche Stoffe werden in der Kerntechnik als "Spaltstoffe" bezeichnet?

d. Was versteht man unter dem Begriff der "Spaltbarriere"?

a. Bei einer Spontanspaltung zerfällt ein schwerer Atomkern spontan, d. h. ohne äußere Einwirkung, in zwei leichte Bruchstücke. Zusammen mit den Spaltprodukten werden 2 – 3 Neutronen freigesetzt. Eine Spontanspaltung kann nur unter Annahme des quantenmechanische „Tunneleffekts“ erklärt werden, d. h. beim Spaltungsvorgang wird eine nach klassischer Physik nicht überwindbare Energiebarriere „durchtunnelt“.

b. Bei der neutroneninduzierten Spaltung spaltet ein schwerer Atomkern, nachdem zuvor ein Neutron eingefangen wurde. Wenn der Ausgangskern eine ungerade Massenzahl und eine gerade Ordnungszahl besitzt, muss die Neutronenzahl ungerade sein. In diesem Fall führt der Neutroneneinfang zu einer recht großen „Paarungsenergie“, die ermöglicht, die Energiebarriere (Spaltbarriere) zu überwinden (kein Tunneleffekt erforderlich).

c. „Spaltstoffe“ sind Nuklide mit ungerader Massen- und gerader Massenzahl. Sie können deshalb nach dem Einfang von Neutronen mit einer Energie von $E \sim 0$ spalten.

d. Die Energiebarriere, die beim Spaltungsvorgang überwunden werden muss, heißt „Spaltbarriere“. Sie entsteht dadurch, dass beim Spaltungsvorgang aus einem näherungsweise runden Ausgangskern über eine stark elliptische Zwischenform die Spaltprodukte erzeugt werden müssen. Ursache der Spaltbarriere ist somit, dass für die Bildung des Zwischenzustands eine erhebliche Oberflächenenergie aufgebracht werden muss.

9. Berechnen Sie die exakte Masse $m(Z,A)$ eines neutralen ${}^{36}\text{Ar}$ -Atoms und geben Sie das Ergebnis sowohl in der Einheit MeV/c^2 als auch in der Einheit kg an.



Vollständige Schreibweise des ^{36}Ar : $^{36}_{18}\text{Ar}_{18}$

Bestimmung der Masse: $m(Z, A) \cdot c^2 = m_{\text{exc}}(Z, A) \cdot c^2 + A \cdot (u \cdot c^2)$

Nukleonenzahlen: $Z = 18, A = 36, N = A - Z = 18$

$$m_{\text{exc}}(Z = 18, A = 36) \cdot c^2 = 2m_{\text{exc}}(Z = 18, N = 18) \cdot c^2$$

Siehe Tabelle Anlage 4

$$m_{\text{exc}}(Z = 18, N = 18) \cdot c^2 = -30.231,54 \text{ keV} = -30,23154 \text{ MeV}$$

$$m(18, 36) \cdot c^2 = -30,23154 \text{ MeV} + 36 \cdot 931,494043 \text{ MeV}$$

$$m(18, 36) \cdot c^2 = 33.503,554 \text{ MeV}$$

In MeV/c^2 :

$$m(18, 36) = 33.503,554 \text{ MeV} / c^2$$

Umrechnung:

$$1u = 1,66053886 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

entspricht:

$$1u = 931,494043 \text{ MeV} / c^2$$

$$m(18, 36) = 33.503,554 \text{ MeV} / c^2 \cdot \frac{1,66053886 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{931,494043 \text{ MeV} / c^2}$$

In kg:

$$m(18, 36) = 5,98999 \cdot 10^{-26} \text{ kg} = 5,990 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

10. Berechnen Sie mit Hilfe des Massenexzess-Tabelle (mass excess) $m_{\text{exc}}(Z, A) \cdot c^2$ (siehe Anhang) die Bindungsenergie pro Nukleon $\frac{B(Z, A)}{A}$ für ^{36}Ar und ^{36}S und entscheiden Sie anhand der Ergebnisse, welches der beiden Isotop ^{36}Ar bzw. ^{36}S fester gebunden ist?

Vollständige Schreibweise: $^{36}_{18}\text{Ar}_{18}$

Vollständige Schreibweise: $^{36}_{16}\text{S}_{20}$

Bindungsenergie: $B(Z, A) = (Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m(Z, A)) \cdot c^2$

Da $A = \text{konstant}$ $B(Z, A) = (Z \cdot m_{\text{exc}, H} + (A - Z) \cdot m_{\text{exc}, n} - m_{\text{exc}}(Z, A)) \cdot c^2$

Bindungsenergie von ^{36}Ar : $B(18, 36) = (18 \cdot m_{\text{exc}, H} + (36 - 18) \cdot m_{\text{exc}, n} - m_{\text{exc}}(18, 36)) \cdot c^2$

$$B(18, 36) = (18 \cdot 7.288,97 + 18 \cdot 8.071,32 - (-30.231,54)) \cdot \text{keV}$$

$$B(18, 36) = 306.716,76 \text{ keV}$$

Bindungsenergie pro Nukleon $\frac{B}{A}(18, 36) = \frac{B(18, 36)}{36} = 8519,91 \text{ keV} = 8,520 \text{ MeV}$

Bindungsenergie von ^{36}S : $B(16, 36) = (16 \cdot m_{\text{exc}, H} + (36 - 16) \cdot m_{\text{exc}, n} - m_{\text{exc}}(16, 20)) \cdot c^2$

$$B(16, 36) = (16 \cdot 7.288,97 + 20 \cdot 8.071,32 - (-30.664,08)) \cdot \text{keV}$$

$$B(16, 36) = 308.714,00 \text{ keV}$$

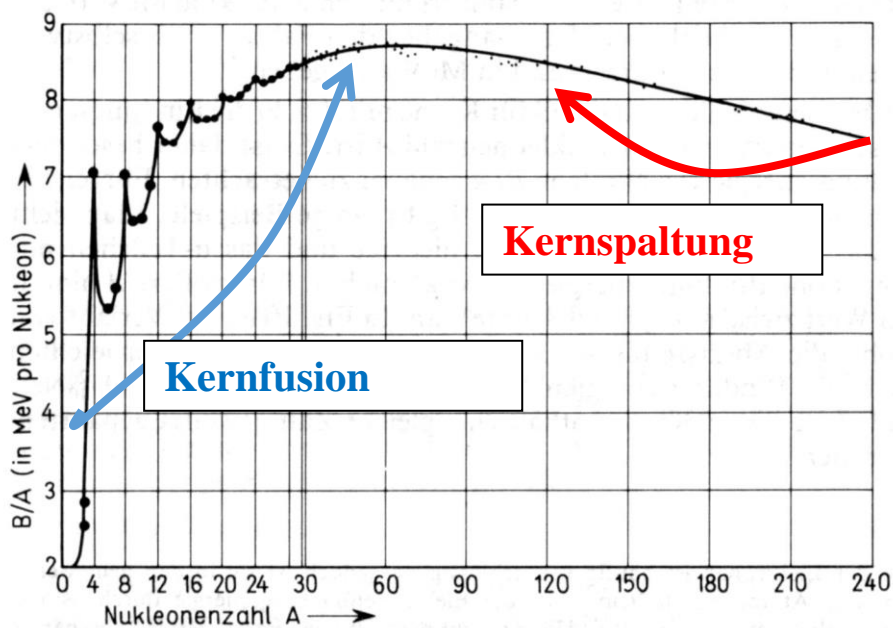
Bindungsenergie pro Nukleon: $\frac{B}{A}(16, 36) = \frac{B(16, 36)}{36} = 8.575,39 \text{ keV} = 8,575 \text{ MeV}$

Da ^{36}S mit $\frac{B}{A}(16, 36) = 8,575 \text{ MeV}$ im Vergleich mit ^{36}Ar mit $\frac{B}{A}(18, 36) = 8,520 \text{ MeV}$ die größere Bindungsenergie pro Nukleon besitzt, ist ^{36}S fester gebunden als ^{36}Ar .

11. Skizzieren Sie den Verlauf von $\frac{B(Z, A)}{A}$ als Funktion von A und erläutern Sie anhand des

Funktionsverlaufs die Begriffe „Kernfusion“ und „Kernspaltung“.





(10)

12. Für Kalibrierungen von Detektoren für den γ -Strahlungsnachweis sowie bei Untersuchungen zum Mößbauer-Effekt verwendet man häufig das radioaktive Isotop ^{57}Co . Beschreiben Sie die Zerfalleigenschaften des ^{57}Co (siehe dazu die Anlage A1)

^{57}Co zerfällt mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 271,79 d$ durch EC-Zerfall

(Elektroneneinfang) zum ^{57}Fe . Die Zerfallsenergie beträgt $Q_{EC} = 836 \text{ keV}$, somit ist β^+ Zerfall energetisch unmöglich. 99,8% der Zerfälle führen zum zweiten Anregungszustand der Energie $E_2 = 136,4745 \text{ keV}$. Der vierte Anregungszustand mit der Energie $E_4 = 706,416 \text{ keV}$ wird mit 0,183% eingespeist. Der Übergang vom zweiten Anregungszustand mit $E_2 = 136,4745 \text{ keV}$ zum ersten Anregungszustand $E_1 = 14,41300 \text{ keV}$ hat die Energie $E_\gamma = 122,0614 \text{ keV}$ und eine relative Intensität von 85,6%. Die relative Intensität des Übergangs vom ersten Anregungszustand zum Grundzustand beträgt 9,16%, die Energie der γ -Strahlung $E_\gamma = 14,4130 \text{ keV}$. Der Cross Over Übergang vom zweiten Anregungszustand zum Grundzustand mit der Energie $E_\gamma = 136,4743 \text{ keV}$ besitzt eine relative Intensität von 10,68%. Es gibt noch sieben weitere γ -Strahlungen, die nach Zerfall zum vierten Anregungszustand entstehen. Ihre Intensität ist aber sehr gering (größte Intensität 0,157%) und deshalb kann man sie im Strahlenschutz normalerweise vernachlässigen.

13. Eine der ^{57}Co -Quellen des Labors für Radioökologie und Strahlenschutz hatte am Bezugsdatum 17.09.2013 eine Aktivität von 4,20 Gbq (Hinweis: 1 GBq = $1 \cdot 10^9$ Bq, Aktivität hat negatives Vorzeichen).
- Wie viel Atome des ^{57}Co enthielt die ^{57}Co -Quelle zum Bezugsdatum?
 - Wie groß ist die Aktivität der ^{57}Co Quelle heute am 24.11.2017?

- a. Differentielles Zerfallsgesetz: $A = -\lambda \cdot N$

Masse des ^{57}Co

$$m = \frac{M_{mol}}{N_A} \cdot N = \frac{M_{mol}}{N_A} \cdot \frac{A}{(-\lambda)}$$



Aktivität: $A(\text{Bezugsdatum } 17.09.2013) = -4,2 \text{ GBq} = -4.200.000.000 \text{ Bq}$

Zerfallskonstante: $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} = \frac{\ln(2)}{271,79 \text{ d}} = \frac{\ln(2)}{23.482.656 \text{ s}} = 2,95174 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$

Molare Masse: $M_{\text{mol}} = 57 \text{ g mol}^{-1}$

Ergebnis: $m = \frac{57 \text{ g}}{6,0221 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{-4,2 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}}{-2,9517 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}}$
 $m = 9,46513 \cdot 10^{-23} \text{ g} \cdot 1,4229 \cdot 10^{17} = 1,3468 \cdot 10^{-5} \text{ g}$
 $m = 13,468 \mu\text{g}$

b. Integrales Zerfallsgesetz: $A(\Delta t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2) \cdot \Delta t}{T_{1/2}}}$

Zeit zwischen dem 24.11.2017 und dem 17.09.2013:
 $\Delta t = 1.529 \text{ d} = 132.105.600 \text{ s}$

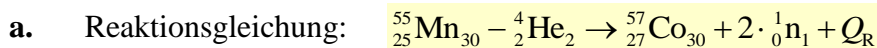
Halbwertszeit: $T_{1/2} = 271,79 \text{ d} = 23.482.656 \text{ s}$

Anfangsaktivität: $A_0 = -4,20 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$

Ergebnis: $A(\Delta t) = -4,2 \cdot 10^9 \text{ Bq} \cdot e^{-\frac{\ln(2) \cdot 1529 \text{ d}}{271,79 \text{ d}}} = -85,07 \text{ MBq}$

14. Das radioaktive Isotop ^{57}Co kann mit Hilfe von Ionenbeschleunigern hergestellt werden. Man beschießt dazu Mangan (Mn) mit α -Teilchen und erhält ^{57}Co sowie weitere Reaktionsprodukte (welche?).

- a. Wie lautet die Reaktionsgleichung dieser Reaktion?
b. Berechnen Sie die Reaktionsenergie Q_R . Ist die Reaktion endotherm oder exotherm?



b. Reaktionsenergie:

$$Q_R = m_{\text{exc}}(Z = 25, A = 55) + m_{\text{exc}}(Z = 2, A = 4) - m_{\text{exc}}(Z = 27, A = 57) + 2 \cdot m_{\text{exc}}(Z = 0, A = 1)$$

$$Q_R = m_{\text{exc}}(Z = 25, N = 30) + m_{\text{exc}}(Z = 2, N = 2) - m_{\text{exc}}(Z = 27, N = 30) + 2 \cdot m_{\text{exc}}(Z = 0, N = 1)$$

$$Q_R = (-57.710,58 + 2.424,91565 - (-59.344,204) + 2 \cdot 8.071,3171) \text{ keV} = -12.084,0946 \text{ keV}$$

Ergebnis $Q_R = -12,08 \text{ MeV}$, die Reaktion ist endotherm.

15. In einer Messeinrichtung soll eine ^{57}Co -Quelle mit Blei abgeschirmt werden. Wie dick muss die Bleischicht sein, um die γ -Strahlung des ^{57}Co mit höchster Intensität (siehe Zerfallsschema in Anlage 1) auf das 10^{-6} fache zu schwächen? (Dichte des Bleis: $\rho_{\text{Pb}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$).

Aus dem Zerfallsschema in Anlage A1 kann man ablesen, dass die γ -Strahlung größter

Intensität die Energie $E_\gamma = 122,0614 \text{ keV}$ besitzt. Berechnung von $\frac{\mu}{\rho}$:

Interpolation von Tabellenwerten aus den Daten im Anhang A3.

E / keV	$(\mu/\rho) / (\text{cm}^2/\text{g})$	$\ln(E)$	$\ln(\mu/\rho)$
100,000	5,549E+00	4,60517019	1,71361773
150,000	2,014E+00	5,01063529	0,70012279
122,061	3,371E+00	4,8045242	1,21531522



Für die γ -Strahlungsenergie von $E_\gamma = 122,0614 \text{ keV}$ ergibt sich:

Massenschwächungskoeffizient: $\frac{\mu}{\rho} = 3,371 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$

Schwächungskoeffizient: $\mu = \frac{\mu}{\rho} \cdot \rho = 3,371 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot 11,3 \text{ g cm}^{-3} = 38,0963 \text{ cm}^{-1}$

Dicke der Abschirmung: $z_{PB} = -\frac{\ln \frac{I(z)}{I_0}}{\mu} = -\frac{\ln(10^{-6})}{38,0963 \text{ cm}^{-1}} = 0,3626 \text{ cm} = 3,6 \text{ mm}$

16. Im Vorlesungsversuch wurde die Schwächung von γ -Strahlung der Energie $E_\gamma = 662 \text{ keV}$ (^{137}Cs) in Blei untersucht.

Absorberdicke	$E_\gamma = 661,6 \text{ keV}$
z / cm	$N / 12 \text{ s}$
0,4	6251
5,2	31

Die Untergrundzählrate betrug 15,6 Ereignisse in einer Messzeit von 12 s. Ohne Absorber wurde ein Mittelwert von 9635 Ereignissen in 12 s gemessen.

Bestimmen Sie den Schwächungskoeffizienten μ , den Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ und den Wirkungsquerschnitt σ .

(Dichte Blei $\rho_{Pb} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$, molare Masse: $M_{mol} = 207,2 \text{ g mol}^{-1}$, Avogadro Zahl: $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

Bestimmung von μ :
$$\mu = \frac{\ln \left(\frac{N(z_2) - N_u}{N_0 - N_u} \right) - \ln \left(\frac{N(z_1) - N_u}{N_0 - N_u} \right)}{z_2 - z_1}$$

Steigung:
$$m = \frac{\ln \left(\frac{31 - 15,6}{9635 - 15,6} \right) - \ln \left(\frac{6251 - 15,6}{9635 - 15,6} \right)}{(5,2 - 0,4) \text{ cm}^{-1}} = -1,251 \text{ cm}^{-1}$$

Schwächungskoeffizient: $\mu = |m| = 1,251 \text{ cm}^{-1}$

Massenschwächungskoeffizient: $\frac{\mu}{\rho} = \frac{1,251 \text{ cm}^{-1}}{11,3 \text{ g cm}^{-3}} = 0,1106 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Wirkungsquerschnitt: $\sigma = \frac{M_{mol}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{207,2 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,1106 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

$$\sigma = \frac{M_{mol}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho} \right) = 3,8083 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 = 38,1 \text{ b}$$

17. Vergleichen Sie die Ergebnisse der Aufgabe 16 mit Literaturdaten und berechnen Sie dazu die relative Abweichung zum Tabellenwert A3.



Interpolation:

E / keV	$(\mu/\rho) / (\text{cm}^2/\text{g})$	$\ln(E)$	$\ln(\mu/\rho)$
600,000	1,248E-01	6,396929655	-2,081042823
800,000	8,870E-02	6,684611728	-2,42249539
662,000	1,111E-01	6,495265556	-2,197758632

Massenschwächungskoeffizient Literatur:

$$\frac{\mu}{\rho} = 0,1111 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Massenschwächungskoeffizient Messung:

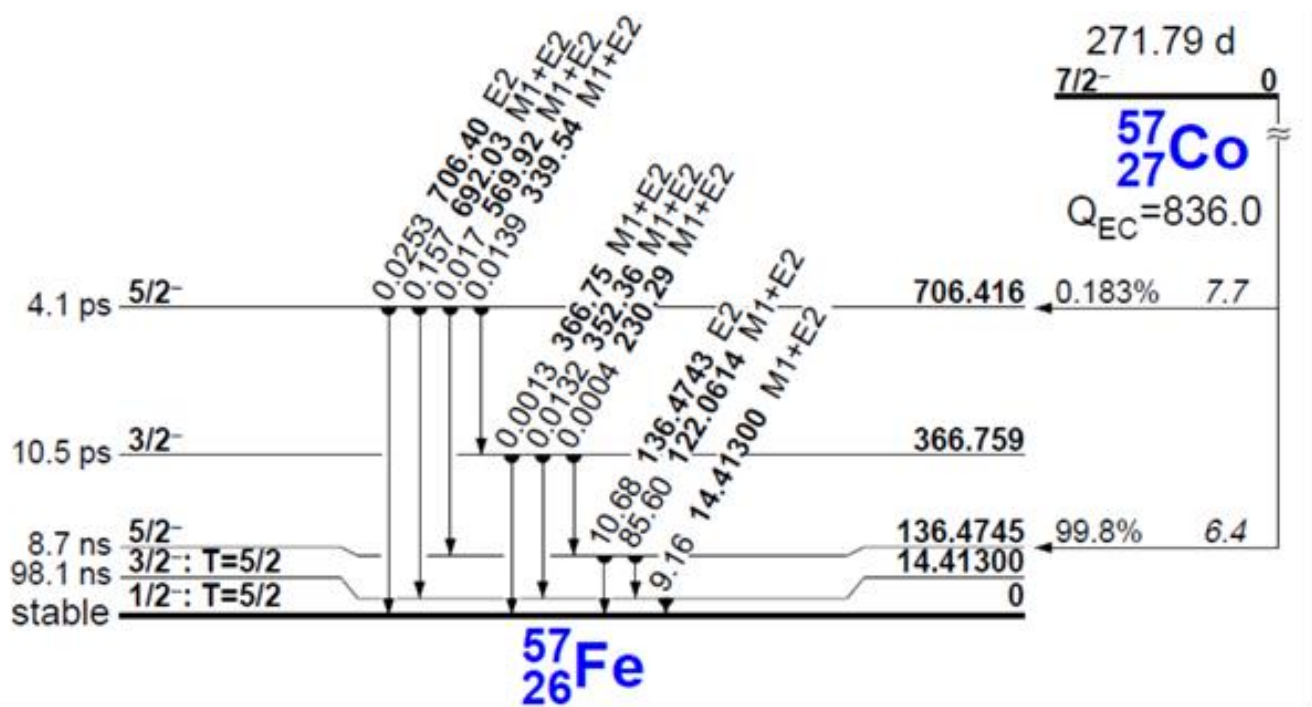
$$\frac{\mu}{\rho} = 0,1106 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Relative Abweichung:

$$\frac{0,1111 - 0,1106}{0,1111} = 0,5\%$$



Anlage A1: Zerfallsschema des ^{57}Co



Anlage A2: Einige Naturkonstanten:

- Lichtgeschwindigkeit: $c = 299792458 \text{ m s}^{-1}$
 Elektronenladung: $e = 1,6021766208 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 Planck-Konstante: $h = 6,626070040 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$



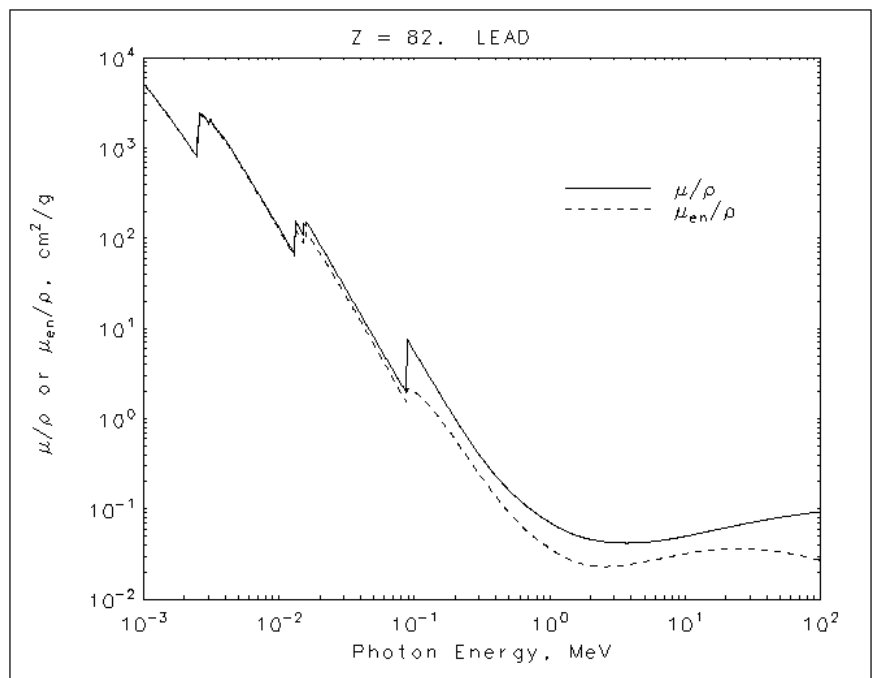
Avogadro-Zahl:

$$N_A = 6,022140857 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$



Anlage A3: Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient

E / MeV	(μ/ρ) cm^2g^{-1}
	Blei
3,0E-02	3,032E+01
4,0E-02	1,436E+01
5,0E-02	8,041E+00
6,0E-02	5,021E+00
8,0E-02	2,419E+00
8,8E-02	1,910E+00
8,8E-02	7,683E+00
1,0E-01	5,549E+00
1,5E-01	2,014E+00
2,0E-01	9,985E-01
3,0E-01	4,031E-01
4,0E-01	2,323E-01
5,0E-01	1,614E-01
6,0E-01	1,248E-01
8,0E-01	8,870E-02
1,0E+00	7,102E-02
1,3E+00	5,876E-02
1,5E+00	5,222E-02
2,0E+00	4,606E-02
3,0E+00	4,234E-02
4,0E+00	4,197E-02
5,0E+00	4,272E-02
6,0E+00	4,391E-02
8,0E+00	4,675E-02
1,0E+01	4,972E-02



Dichte: $\rho_{Pb} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$

Quelle: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>



N =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	N =		
n	0	8071,3171												n	0	
H	1	7288,9705	13135,72158	14949,806	25901,518	32892,44	41863,757	49135#	Mass excess = $m_{\text{exc}}c^2 = (m(Z,A) - A*u)c^2$ in keV						H	1
He	2		14931,21475	2424,91565	11386,233	17595,106	26101,038	31598,044	40939,429	48809,203				He	2	
Li	3	28667#	25323,185	11678,886	14086,793	14908,141	20946,844	24954,264	33050,581	40797,31	50096#			Li	3	
Be	4		37996#	18374,947	15770,034	4941,672	11347,648	12606,67	20174,064	25076,506	33247,823	39954,498	49798#	57678#	Be	4
B	5		43603#	27868,346	22921,49	12415,681	12050,731	8667,931	13368,899	16562,166	23663,683	28972,278	37081,686	43770,816	B	5
C	6			35094,06	28910,491	15698,682	10650,342	0	3125,01129	3019,89305	9873,144	13694,129	21038,832	24926,178	C	6
N	7				38800,148	24303,569	17338,082	5345,481	2863,41704	101,43805	5683,658	7871,368	13114,466	15862,129	N	7
O	8					32047,954	23112,428	8007,356	2855,605	-4737,00141	-808,813	-781,522	3334,87	3797,462	O	8
F	9		Mass excess values in keV				32658#	16775,372	10680,254	1951,701	873,701	-1487,386	-17,404	-47,551	F	9
Ne	10						23996,462	16460,901	5317,166	1751,44	-7041,93131	-5731,776	-8024,715	Ne	10	
N =	0	1	2	3	4			24189,968	12926,808	6847,719	-2184,161	-5182,436	-9529,85358	Na	11	
						5		33040,092	17570,348	10910,506	-396,963	-5473,766	-13933,567	Mg	12	
N =	13	14	15	16	17		6		26119#	18183#	6769,57	-56,946	-8916,172	Al	13	
			$u = 1,660\,538\,86\,10^{-27}\text{ kg}$ $uc^2 = 931,494\,043\text{ MeV}$			18	7		32164#	23772#	10754,673	3824,318	-7144,632	Si	14	
B	5	52322#	59364#				19			31997#	18872#	10973#	-717,03	P	15	
C	6	32420,666	37557,61	45960#	53281#			20		9	25970#	17543#	4073,203	S	16	
N	7	21765,11	25251,164	32038,675	38396#	47543#	56504#			21		10	26557#	13143#	Cl	17
O	8	8062,906	9284,152	14612,96	19070,4	27442#	35713#	44954#	53850#		22		11	20083#	Ar	18
F	9	2793,378	3329,747	7559,527	11272,706	18271,772	24926,86	33226#	40296#	48903#	56289#	23	24	12	N =	
Ne	10	-5154,045	-5951,521	-2108,075	429,611	7069,949	11244,601	18057,881	23102,025	30842#	37278#	45997#	53121#	25	N =	
Na	11	-8418,114	-9357,818	-6862,316	-5517,436	-989,247	2665,004	8361,09	12654,768	19064,478	24889,293	32761#	39582#	47953#	Na	11
Mg	12	-13192,826	-16214,582	-14586,651	-15018,641	-10619,032	-8910,672	-3217,38	-954,781	4894,07	8808,603	16152#	21424#	29249#	Mg	12
Al	13	-12210,309	-17196,658	-16850,441	-18215,322	-15872,419	-14953,628	-11061,966	-8529,377	-2932,495	-130,19	5781,974	9946,326	16050,594	Al	13
Si	14	-12384,301	-21492,79678	-21895,046	-24432,928	-22949,006	-24080,907	-20492,662	-19956,77	-14360,307	-12482,507	-6579,998	-4067,274	1928,205	Si	14
P	15	-7158,753	-16952,626	-20200,575	-24440,885	-24305,218	-26337,486	-24557,669	-24857,74	-20250,977	-18994,145	-14757,82	-12873,735	-8106,838	P	15
S	16	-3159,582	-14062,532	-19044,648	-26015,697	-26585,994	-29931,788	-28846,356	-30664,075	-26896,36	-26861,197	-23162,245	-22866,568	-19019,105	S	16
Cl	17	4443#	-7067,165	-13329,771	-21003,432	-24439,776	-29013,54	-29521,857	-31761,532	-29798,097	-29800,203	-27557,81	-27307,189	-24912,99	Cl	17
Ar	18	11293#	-2200,204	-9384,141	-18377,217	-23047,411	-30231,54	-30947,659	-34714,551	-33242,011	-35039,89602	-33067,467	-34422,675	-32009,808	Ar	18
K	19	20418#	6763#	-1481#	-11168,9	-17426,171	-24800,199	-28800,691	-33807,011	-33535,205	-35559,074	-35021,556	-36593,239	-35809,606	K	19
Ca	20		13153#	4602#	-6439,359	-13161,76	-22059,22	-27274,4	-34846,275	-35137,759	-38547,072	-38408,639	-41468,479	-40811,95	Ca	20
Sc	21			13898#	2841#	-4937#	-14168,021	-20523,228	-28642,392	-32121,239	-36187,929	-37816,093	-41067,792	-41757,115	Sc	21
Ti	22				9101#	1500#	-8850,275	-15700#	-25121,552	-29321,103	-37548,459	-39005,737	-44123,422	-44932,394	Ti	22
V	23					10330#	-205#	-8169#	-18024#	-24116,38	-31879,629	-37073,013	-42002,051	-44475,385	V	23
N =	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N =		



N =																																				
Cr	24	-50259,499	-51448,807	-55416,933	-55284,741	-56932,545	-55107,491	-55281,245	-52524,14	-51834,726	-47891,49	-46503,876	-42180,653	-40414,553								Cr	24													
Mn	25	-48241,341	-50705,444	-54687,904	-55555,37	-57710,58	-56909,71	-57486,8	-55906,827	-55479,562	-53177,832	-51555,736	-48038,804	-46351,151								Mn	25													
Fe	26	-48331,615	-50945,323	-56252,456	-57479,368	-60605,352	-60180,13	-62153,418	-60663,114	-61411,832	-58921,391	-58900,749	-55545,834	-54770,668								Fe	26													
Co	27	-42644,824	-48009,541	-54027,557	-56039,352	-59344,204	-59845,868	-62228,412	-61649,012	-62898,422	-61431,505	-61840,387	-59792,686	-59169,934								Co	27													
Ni	28	-39210,779	-45335,579	-53903,674	-56081,969	-60227,694	-61155,65	-64472,079	-64220,892	-66746,096	-65512,556	-67099,277	-65126,052	-66006,285								Ni	28													
Cu	29	-31624#	-38601#	-47309,576	-51662,055	-56357,224	-58344,099	-61983,64	-62797,837	-65579,531	-65424,243	-67263,661	-66258,274	-67318,779								Cu	29													
Zn	30	-25728#	-32800#	-42297,694	-47260,499	-54187,768	-56345,48	-61171,431	-62213,025	-66003,595	-65911,599	-68899,427	-67880,441	-70007,22								Zn	30													
Ga	31	-15901#	-23986#	-34121#	-39998#	-47090,48	-52000,431	-56547,093	-58834,328	-62657,173	-63724,427	-66879,683	-67086,12	-69327,758								Ga	31													
Ge	32	-8374#	-17000#	-27768#	-33729#	-42243#	-46910#	-54349,881	-56414,625	-61624,427	-62657,81	-66979,785	-67100,605	-70563,111								Ge	32													
			-6399#	-18052#	-24964#	-33823#	-39521#	-46981#	-51502,304	-56647,81	-58899,233	-63086,666	-64343,111	-67894,336								As	33													
N =		26	27	28	29	30	-32919#	-41722#	-46491#	-54214,814	-56301,531	-62046,216	-63116,336	-67894,407								Se	34													
									31	-32798#	-38642#	-46476#	-51426#	-57063,323	-59015,201	-63628,936																				
N =		39	40	41	42	43				32	-32435#	-41676#	-46923,323	-53940,919	-56551,751	-62331,509																				
										44		33	-32304#	-38117#	-46052#	-51917,05	-57221,677																			
Cr	24	-35527#	-33152#	-27796#	-24796#	-19049#				45		34	-31699#	-40697#	-46621,677	-54243,893																				
Mn	25	-42616,698	-40672,693	-36254#	-33403#	-28597#	-25299#					46			35																					
Fe	26	-50877,951	-49573,517	-45692,348	-43128,173	-38396#	-35900#	-31000#	-28299#	47	48	36	37	38																						
Co	27	-56111,332	-55061,049	-51350,415	-50002,598	-45643,206	-43873,368	-39300#	-37036#	-32248#	-29500#	49	50	38	N =																					
Ni	28	-63742,68	-63463,815	-59978,648	-59149,87	-55203,797	-53940,319	-49863#	-48372#	-43901#	-41610#	-36747#	-34298#	51	N =																					
Cu	29	-65567,035	-65736,213	-62976,127	-62711,127	-59782,999	-58986,595	-56006,205	-54119,802	-50975,985	-48577#	-44749#	-42327#	-36449#	Cu	29																				
Zn	30	-68417,973	-69564,648	-67326,897	-68131,38	-65410,343	-65708,883	-62469,023	-62136,64	-58722,344	-57342,57	-53420#	-51844,769	-46128#	Zn	30																				
Ga	31	-68910,089	-70140,242	-68589,38	-69699,335	-68049,585	-68464,58	-66296,64	-65992,344	-63706,57	-62509,526	-59135,169	-57983,308	-53104#	Ga	31																				
Ge	32	-69907,736	-72585,911	-71297,534	-73422,437	-71856,427	-73213,046	-71214,029	-71862,211	-69488,526	-69515,169	-66303,308	-65624,008	-60901#	Ge	32																				
As	33	-68229,809	-70956,701	-70859,967	-73032,41	-72289,504	-73916,577	-72817,419	-73636,526	-72159,286	-72533,308	-70324,008	-69880,657	-66082#	As	33																				
Se	34	-68217,642	-72212,735	-72169,018	-75252,05	-74599,594	-77026,086	-75917,602	-77759,936	-76389,519	-77594,008	-75340,657	-75951,829	-72428,267	Se	34																				
Br	35	-65306,081	-69139,018	-70289,169	-73234,914	-73452,302	-76068,514	-75889,472	-77974,839	-77496,465	-79008,93	-77799,335	-78610,267	-75639,57	Br	35																				
Kr	36	-64323,624	-69014,318	-70169,443	-74179,727	-74442,736	-77892,492	-77694,038	-80589,508	-79981,709	-82430,991	-81480,267	-83265,57	-80709,426	Kr	36																				
Rb	37	-60479,832	-64824,531	-66936,228	-70803,362	-72172,854	-75454,821	-76188,201	-79074,805	-79750,025	-82167,331	-82747,017	-84597,795	-82608,998	Rb	37																				
Sr	38	-57804,063	-63173,924	-65476,577	-70308,223	-71527,705	-76008,384	-76795,439	-80643,837	-81102,572	-84523,576	-84880,413	-87921,74	-86209,141	Sr	38																				
Y	39	-52527#	-58356,577	-61217,786	-66017,338	-68192,393	-72326,557	-74157,855	-77842,123	-79283,576	-83018,723	-84299,14	-87701,749	-86487,462	Y	39																				
Zr	40	-47357#	-55517,043	-58488,484	-64192#	-66458,557	-71492#	-73149,123	-77804,35	-79348,15	-83623,101	-84868,884	-88767,265	-87890,402	Zr	40																				
Nb	41		-47478#	-52974#	-58958,557	-61879#	-67149,123	-69826,35	-74183,15	-76073,101	-80650,386	-82656,265	-86632,442	-86448,337	Nb	41																				
Mo	42		Mass excess values in keV	-47748#	-55806#	-59103#	-64556,35	-67694,927	-72700,088	-75003,889	-80167,265	-82204,165	-86805,003	-86803,495	Mo	42																				
Tc	43				-47665#	-53207#	-59122#	-62710#	-67844#	-71206,603	-75984,165	-78934,648	-83602,533	-84153,961	Tc	43																				
N =		39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	N =																					

Anlage 4: Mass Excess Table: G. Audi, A.H. Wapstra and C. Thibault, http://ie.lbl.gov/mass/2003AWMass_3.pdf



