

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

**Bitte beachten Sie, dass bei einigen Fragen mehrere Antworten angekreuzt werden müssen.**

1. **Zur Demonstration der Atom/Molekülgröße kann man Ölsäure (Summenformel:  $C_{18}H_{34}O_2$ ), die in einer Konzentration von  $1/2500$  in n-Heptan gelöst ist, auf eine Wasseroberfläche tropfen. In einem Versuch soll ein Lösungstropfen von  $0,03\text{ ml}$  nach dem Verdunsten des Lösungsmittels einen kreisförmigen Ölsäurefleck von  $9\text{ cm}$  Durchmesser erzeugen. Man nehme an, dass die Ölsäureschicht monomolekular ist. Schätzen Sie die Größe des Ölsäuremoleküls:**

Volumen des Öls: 
$$V_{\text{öl}} = \frac{1}{2500} \cdot 0,03\text{ cm}^3 = 1,2 \cdot 10^{-5}\text{ cm}^3$$

gleich Volumen des Zylinders mit Radius  $R = 4,5\text{ cm}$  und Höhe  $h$ .

Das Volumen ist: 
$$V_{\text{Zylinder}} = \pi \cdot R^2 \cdot h$$

Die Höhe ist: 
$$h = \frac{V_{\text{Zylinder}}}{\pi \cdot R^2} = \frac{V_{\text{öl}}}{\pi \cdot R^2} = \frac{1,2 \cdot 10^{-5}\text{ cm}^3}{\pi \cdot 20,25\text{ cm}^2} = 1,9 \cdot 10^{-7}\text{ cm}$$

Durchmesser des Ölsäuremoleküls:  $D = 2 \cdot R \cong 2 \cdot 10^{-9}\text{ m} = 2\text{ nm}$

- a. 20 nm
- b. 2 nm
- c. 0,2 pm
- d. 0,2  $\mu\text{m}$
- e. 0,2-nm.

2. **Vergleichen Sie die Atomradien von Eisen(Fe,  $Z = 26$ ) und Wolfram(W,  $Z = 74$ ):**

- a Der Radius für Fe ist größer als der von W:  $R_{\text{Fe}} = (74/26) \cdot R_{\text{W}}$ .
- b Die Radien hängen nicht von der Ordnungszahl  $Z$  ab.
- c Der Radius für Fe ist kleiner als der von W:  $R_{\text{Fe}} = (26/74) \cdot R_{\text{W}}$ .
- d Beiden sind etwa gleich und betragen  $R \sim 0,13\text{ nm}$ .
- e Die Radien sind proportional zur Atommassenzahl  $A$ .

3. **Wie viele Moleküle  $H_2O$  enthält  $1\text{ cm}^3$  Wasser? Dichte:  $\rho_{H_2O} = 1,0\text{ g cm}^{-3}$ .**

- a.  $3,34 \cdot 10^{25}$
- b.  $1,60 \cdot 10^{19}$
- c.  $3,34 \cdot 10^{22}$
- d.  $6,02 \cdot 10^{23}$

4. **Welche Aussagen zum Atomaufbau sind richtig?**

- a. Die Elektronenzahl in der K-Schale eines Elementes ist gleich seiner Ordnungszahl  $Z$ .
- b. Die Ionisierungsenergie für die K-Schale ist kleiner als die für die L-Schale.
- c. Neutrale, nicht angeregte Atome mit  $Z \geq 10$  haben immer eine Gesamtzahl von 10 Elektronen in der K- und der L-Schale.
- d. Die K, L, M, N,....-Schalen können maximal 2, 8, 18, 32, ....Elektronen aufnehmen.
- e. Neutrale Edelgasatome mit  $Z > 2$  haben 8 Elektronen in der äußeren Schale.
- f. Die Ionisierungsenergie der Alkali-Elemente ist im Vergleich mit anderen Elemente besonders hoch.

5. Welche Aussage ist richtig?

- a. Die Balmer Serie des Wasserstoffs liegt im Bereich der UV-Strahlung.
- b. Die Balmer Serie gehört zum Lichtspektrum des Wasserstoffs.
- c. Interstellare Gasnebel erscheinen deshalb rot, weil sie sehr viel Heliumgas enthalten, und deshalb sehr intensiv die rote  $H_{\alpha}$ -Linie der Balmer Serie des He-Atoms aussendet.
- d. Die Frequenzen der Spektrallinien der Balmer Serie sind proportional zu  $1/n^2$ , wobei  $n = 1, 2, 3, \dots$  die natürlichen Zahlen durchläuft
- e. Die  $H_{\alpha}$ -Linie der Balmer Serie des Wasserstoffs entsteht durch einen Elektronensprung vom dritten zum zweiten Anregungszustand.

6. Durch welche Formulierung werden „Schwarze Körper“ in der Physik richtig beschrieben?

- a. „Schwarze Körper“ werden deshalb als "schwarz" bezeichnet, weil sie alle auftretende elektromagnetische Strahlung vollständig absorbieren.
- b. „Schwarze Körper“ werden deshalb als "schwarz" bezeichnet, weil sie alle auftretende elektromagnetische Strahlung vollständig reflektieren.
- c. Körper mit dunklen bzw. schwarzen Oberflächen werden in der Physik generell als „Schwarze Körper“ bezeichnet.
- d. "Schwarze Körper" besitzen ein kontinuierliches Strahlungsspektrum
- e. „Schwarzer Körper“ sind eine andere Bezeichnung für "Schwarze Löcher". Sie können keinerlei Strahlung aussenden.

7. Welche Aussage zur elektromagnetischen Strahlung ist richtig?

- a. Die gelbe He-Linie mit der Wellenlänge 587 nm besitzt eine Energie von 2,1 eV.
- b. Die rote  $H_{\alpha}$ -Wasserstofflinie hat eine Energie von 1,89 keV
- c. Das Infrarotlicht besitzt Wellenlängen von 10 - 380 nm.
- d. Der Mikrowellenbereich mit Wellenlängen von 1 mm bis 1 m entspricht Frequenzen von 300 MHz bis 300 GHz.
- e. Röntgenstrahlung ist nicht-ionisierend.

8. Welche Aussagen beschreiben (neutrale) Isotope richtig?

- a. Die Zahl der Neutronen und die Zahl der Protonen ist gleich.
- b. Die Protonenzahl ist gleich der Elektronenzahl, während die Neutronenzahl davon abweichen kann.
- c. Summe aus Neutronenzahl und Protonenzahl ist konstant.
- d. Die Zahl der Protonen ist bei Isotopen einer bestimmten Sorte gleich.

9. Welche Aussage ist richtig?

- a. Die Masse des neutralen Wasserstoffs  $^1\text{H}$  ist kleiner als die Masse des freien Neutrons, aber größer als die Atommassenkonstante  $u$
- b. Multipliziert mit  $c^2$  beträgt die Neutronenmasse  $m_n \cdot c^2 = 931,494 \text{ MeV}$ .
- c. Die Atommassenkonstante entspricht exakt der Masse des freien Neutrons
- d. Neutronen zerfallen in Proton, weil ihre Masse kleiner als die Protonenmasse ist.
- e. Die Atommassenkonstante beträgt  $1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

10. Die Bindungsenergie  $B(6,12)$  von  $^{12}\text{C}$  beträgt:

- a.  $B(6,12) = 0,000 \text{ MeV}$ , da  $^{12}\text{C}$  Bezugsmasse ist.
- b.  $B(6,12) = 92,162 \text{ MeV}$ .
- c. Ist nicht genau bekannt.
- d. Ist immer gleich dem Massenexcesswert  $m_{\text{exc}}$ .
- e. Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon  $B/A$  des  $^{12}\text{C}$  ist gleich 7,68 MeV

11. Bestimmen Sie mit Hilfe der beiliegenden Atommassentabelle (Mass excess values) den genauen Massenwert eines neutralen  $^{27}\text{Al}$  Atoms.
- a.  $m(^{27}\text{Al})/u = 26,981539$
- b.  $m(^{27}\text{Al}) \cdot c^2 = 14,8992 \text{ GeV}$
- c.  $m(^{27}\text{Al}) \cdot c^2 = 25,133142 \text{ GeV}$
- d.  $m(^{27}\text{Al}) = 4,48038913 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
- e.  $m(^{27}\text{Al}) = 2,65771 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
12. In der Kernfusionsforschung nutzt man die Kernreaktion  $^2\text{H} + ^2\text{H}$ , bei der neben einem Neutron ein weiteres Reaktionsprodukt erzeugt wird. Die Reaktionsenergie beträgt:
- a. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} \cdot c^2 = - 4032 \text{ keV}$
- b. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} \cdot c^2 = + 17,589 \text{ MeV}$
- c. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} \cdot c^2 = + 3,268 \text{ MeV}$
- d. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} \cdot c^2 = + 18353 \text{ keV}$
- e. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} \cdot c^2 = - 3268 \text{ keV}$
13. Welche Aussage über die radioaktiven Zerfallsprozesse ist richtig?
- a. Beim  $\alpha$ -Zerfall werden positive Elektronen (Positronen) freigesetzt.
- b. EC bezeichnet den Einfang eines Hüllenelektrons und die anschließende Umwandlung von Neutronen in ein Proton und ein Antineutrino.
- c. EC bezeichnet den Einfang eines Hüllenelektrons und die anschließende Umwandlung von Protonen in ein Neutron und ein Neutrino.
- d. Innerhalb eines Atomkerns können sich zwar Protonen in Neutronen, nicht aber Neutronen in Protonen umwandeln.
- e. Positronenzerfall ist als Konkurrenz zur EC Reaktion möglich, wenn die Zerfallsenergie größer als 511 keV ist.
- f. Bei der Umwandlung eines freien Neutrons in ein Proton werden zusätzlich zum Proton ein Elektron und ein Antineutrino gebildet.
14. Eigenschaften der  $\gamma$ -Strahlung. Welche Aussage ist richtig?
- a.  $\gamma$ -Quanten sind ungeladene Teilchen mit der Ruhemasse Null.
- b.  $\gamma$ -Quanten niedriger Energie (Energiebereich: keV - MeV) reagieren ähnlich wie Röntgen- und Licht-Quanten erfahren in Materie Photoeffekt. Dabei wird die gesamte Energie des Quants auf ein Hüllenelektron übertragen.
- c. Im Gegensatz zu Röntgen- oder Licht-Quanten reagieren  $\gamma$ -Quanten in Materie nur durch Paarerzeugung. Dabei wird ein Elektron-Positron-Paar erzeugt und ein Teil der Energie des  $\gamma$ -Quants als kinetische Energie auf diese beiden Teilchen übertragen.
- d.  $\gamma$ -Quanten sehr hoher Energie (Energiebereich: GeV) reagieren mit Materie vorzugsweise durch Comptoneffekt. Dabei wird ein Teil der Energie des  $\gamma$ -Quants auf ein Elektron übertragen und ein neues  $\gamma$ -Quant mit kleinerer Energie erzeugt.
15. Wie viel Energie wird typischerweise bei einer Kernspaltung frei?
- a. 200 eV
- b. 0,2 GeV
- c. 4,1 eV
- d. kann man nicht vorhersagen, da der Prozess stochastisch und der Energiewert reiner Zufall ist.
- e. 200 keV

- 16. Welche Aussagen zu nuklearen Kettenreaktionen im Kernreaktor sind richtig?**
- a. In Kernreaktoren verwendet man als Spaltstoff für die durch thermische Neutronen induzierte Kettenreaktion  $^{238}\text{U}$  oder  $^{232}\text{Th}$ .
- b. Eine Kettenreaktion ist nur dann möglich, wenn die Masse der Spaltstoffe einen bestimmten Wert (die kritische Masse) übersteigt. Die kritische Masse hängt von der Spaltstoffgeometrie ab.
- c. Wenn in einem Leichtwasserreaktor das als Kühlmittel und Moderator dienende Wasser unfallbedingt entweicht, kann die Kettenreaktion nicht mehr gestoppt werden.
- d. Zur Steuerung der Kettenreaktion im Leichtwasserreaktor verwendet man Regelstäbe (Cd- oder B-Verbindungen) sowie eine Borsalzzugabe im Kühlwasser.
- e. Durch eine Kombination von leichtem Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Natururan kann man eine Kettenreaktion erzeugen.
- f. Durch eine Kombination von schwerem Wasser ( $\text{D}_2\text{O}$ ) und Natururan kann man eine Kettenreaktion erzeugen.
- g. Spaltstoffe sind:  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$
- 17. Welche Aussagen zu den direkt und indirekt ionisierenden Strahlungen sind richtig?**
- a.  $\alpha$ -Teilchen erzeugen in 1 cm Luft typischerweise ca. 30000 Ionenpaare.
- b. Indirekt ionisierende Strahlung reagiert mit Materie durch Photo-, Compton- und Paarerezeugungseffekt.
- c. Alle geladenen Teilchen erzeugen in Materie Ionisationsspuren mit gleicher Ionisationsdichte.
- d.  $\alpha$ -Teilchen besitzen in Luft eine Reichweite von 5 cm bis 10 m.
- e. Neutronen und Neutrinos sind indirekt ionisierende Teilchen.
- 18. Welche Aussagen zu den direkt ionisierenden Strahlungen sind richtig?**
- a.  $\alpha$ -Teilchen eines bestimmten radioaktiven Zerfalls sollen in Luft eine Reichweite von 10 cm besitzen. Die Reichweite in Wasser beträgt dann circa 1mm.
- b. Beim Abbremsvorgang von geladenen Teilchen in Materie können einzelne Elektronen eine große kinetische Energie erhalten. Man nennt diese dann  $\delta$ -Strahlung.
- c. Radioaktive Stoffe, die geladene Teilchen erzeugen, stellen nach einer Aufnahme im menschlichen Körper eine besondere Gefährdung dar.
- d. Geladene Teilchen übertragen bei der Wechselwirkung in Materie im Mittel 1 keV auf die sekundär gebildeten Elektronen.
- e. Geladene, direkt ionisierende Teilchen können den Körper einer Person ohne jegliche Wechselwirkung durchqueren.
- f.  $\alpha$ -,  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Teilchen, Protonen- und Ionenstrahlung bezeichnet man als direkt ionisierend.
- 19. Welche Aussagen zu den indirekt ionisierenden Strahlungen sind richtig?**
- a. Ungeladene, indirekt ionisierende Teilchen können den Körper einer Person ohne jegliche Wechselwirkung durchqueren.
- b. Elektronen und Positronen sind indirekt ionisierend.
- c. Neutronen reagieren praktisch ausschließlich mit den Elektronen in der Materie.
- d.  $\gamma$ -Strahlung ist indirekt ionisierend. Sie kann auf Elektronen der Atomhülle (Photoeffekt, Comptoneffekt), aber auch auf den Atomkernen (Kernphotoeffekt) Energie übertragen.
- e.  $\gamma$ -Strahlung wird in Materie exponentiell geschwächt.
- f. Durch den Photoeffekt entsteht ein Lochzustand in einer inneren Schale, da das Elektron aus der Atomhülle entfernt wird. Das Loch wird durch Elektronen aus höheren Schalen gefüllt und es entsteht charakteristische Röntgenstrahlung.

**20. Welche Aussagen zur Kernenergie sind richtig?**

- a. Brennstoff eines Kernkraftwerks sind Spaltstoffe, wie z. B.  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$ .
- b. Beim Leichtwasser wird der Reaktorkern direkt mit Umgebungswasser (Flußwasser) gekühlt. Dadurch sind diese Reaktoren besonders wirtschaftlich und sicher.
- c. In Deutschland sind 17 Kernkraftwerke mit einer Nettoleistung von 20.457 MWe (brutto) am Netz. Sie leisten ca. 22% der allgemeinen Stromversorgung und ermöglichen eine Einsparung von ca. 100 – 150 Mio. Tonnen  $\text{CO}_2$ .
- d. Kernkraftwerke erzeugen bereits im Normalbetrieb eine erhebliche, leicht nachweisbare, gefährliche Strahlenbelastung in ihrer Umgebung.
- e. Besondere Risiken der Kernkraftwerke stellen die Nachwärmeproduktion der Spaltprodukte in Kombination mit einem großen Inventar an radioaktiven Stoffen dar.
- f. Leichtwasserreaktoren können auch mit Natururan betrieben werden

**21. Welche Aussagen zur Kerntechnik sind richtig?**

- a. In Deutschland betreibt man Siedewasser- oder Druckwasserreaktoren. Diese verwenden Natururan als Brennstoff und schweres Wasser als Moderator.
- b. Bei einem Leichtwasserreaktor wird angereichertes Uran mit 3- 4%igen  $^{235}\text{U}$  Anteil als Brennstoff und normales Wasser als Moderator und Kühlmittel verwendet.
- c. Die Neutronendichte im Reaktor wird durch Regelstäbe bestehend aus neutronenabsorbierenden Stoffen (z. B. Cadmium und Bor) und durch einen Zusatz von Borsäure mit variabler Konzentration im Kühlmittel/Moderator geregelt.
- d. Brennelement können direkt nach dem Ausbau aus dem Reaktordruckgefäß in einen Transportbehälter verpackt und abtransportiert werden.
- e. Metalle, die einer starken Neutronenbestrahlung ausgesetzt sind, können aufquellen und eine erhebliche Verschlechterung ihrer Materialeigenschaften erfahren. Dies gilt besonders für die Brennstabhüllen und das Reaktordruckgefäß.

**22. Welche Aussagen zur Röntgenfluoreszenz sind richtig?**

- a. Röntgenstrahlen regen bestimmte Stoffe/Kristalle zum Leuchten an (oft im Bereich des sichtbaren grünen Lichts) anregen. Dies nennt man Röntgenfluoreszenz.
- b. Röntgenfluoreszenzstrahlung ist kontinuierlich, ähnlich wie weißes Sonnenlicht.
- c. Röntgenfluoreszenzstrahlung enthält charakteristische Röntgenlinien, mit deren Hilfe man die in einem Material enthaltenen Elemente eindeutig identifizieren kann.
- d. Geladene Teilchen oder Röntgen- und  $\gamma$ -Quanten können Elektronenlochzustände in inneren Elektronenschalen erzeugen. Beim Füllen der Löcher mit Elektronen aus höheren Schalen kommt es zur Aussendung von charakteristischer Röntgenstrahlung.

**23. Welche Aussagen zur Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung sind richtig?**

- a. Bei Röntgenstrahlung und  $\gamma$ -Energien bis ca. 100 keV ist die Schwächung in Materie stark  $Z$ -abhängig.
- b. Bei der Abschirmung von Röntgenstrahlung ( $E < 100$  keV) kommt es im Wesentlichen auf die Dichte des Absorbermaterials an. Die Ordnungszahl ist weniger wichtig.
- c. Eine 10 cm dicke Bleischicht ( $\rho_{\text{Pb}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$ ) schwächt  $\gamma$ -Strahlung von  $\sim 1$  MeV etwa gleich stark wie eine 50 cm dicke Betonwand ( $\rho_{\text{Pb}} = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ )
- d. Der Abschirmwirkung von 20 cm Blei entspricht bei  $\gamma$ -Strahlung von  $\sim 1$  MeV etwa 1,25 m Beton.
- e. Zur Schwächung von Röntgenstrahlung ist Aluminium besser geeignet als Eisen.

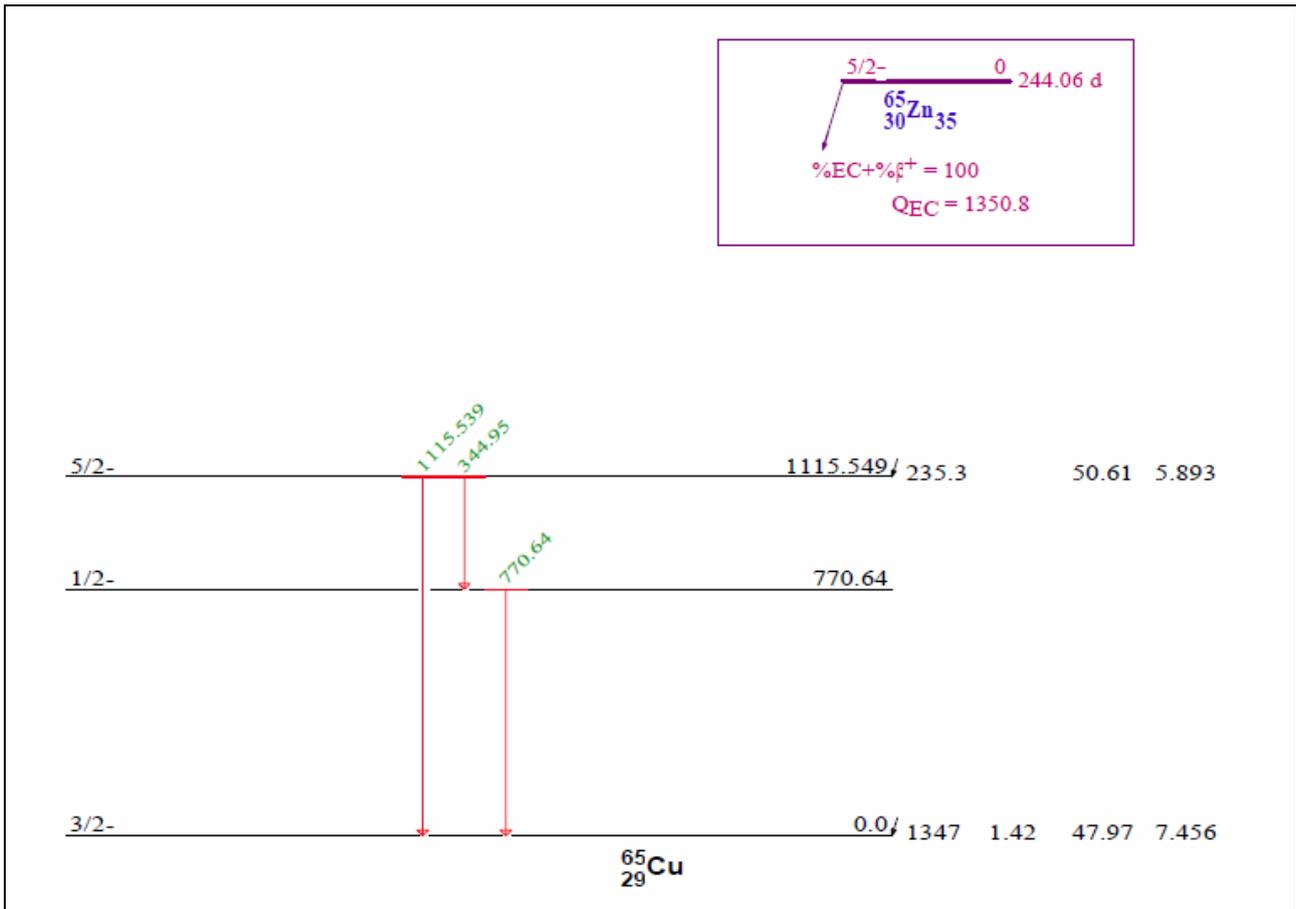
**24. Welche Aussagen zum Nachweis ionisierender Strahlung sind richtig?**

- a. Bei einer Gasionisationskammer werden die von der Strahlung im Gas erzeugten Ladungsträger durch einen Lawinenprozess an der Anode erheblich verstärkt.
- b. Beim Proportionalzählrohr entstehen Ladungsimpulse unterschiedlicher Größe, wobei die Impulshöhe proportional zur Energie ist, die von der primären Strahlung im Zählrohr deponiert wurde.
- c. Ein Geiger-Müller-Zähler ist ein Gasetektor, der bei sehr kleinen Spannungen betrieben wird.
- d. Beim Geiger Müller Zähler ist das Ausgangssignal unabhängig von der Art und Energie des primären Strahlungsteilchens.
- e. Zur Schwächung von Röntgenstrahlung ist Aluminium besser geeignet als Blei.

25. Man betrachte das Zerfallsschema des  $^{65}\text{Zn}$  in der Abb. 1 der Anlage.
- Für welche der  $\gamma$ -Strahlungen sollte man eine Abschirmung auslegen?
  - Bestimmen Sie für diese  $\gamma$ -Strahlungen die Schwächung  $I/I_0$  in 20 cm Eisen.
  - Schätzen Sie die Dicke einer Bleiabschirmung, die eine gleiche Schwächung bewirkt, wie die 20 cm Eisen Schicht.
  - Berechnen Sie den genauen Schwächungswert für die von Ihnen geschätzte Bleidicke.
26. Im Labor soll eine  $^{65}\text{Zn}$  Strahlenquelle zur Kalibrierung des Ge- Detektors verwendet werden. Für diese Strahlenquelle existiert eine Aktivitätsspezifikation von 1,58 MBq für das Bezugsdatum 01.01.2009 um 00:00h.
- Welche Aktivität besitzt die Kalibrierquelle am 25.11.2010?
  - $^{65}\text{Zn}$  zerfällt durch EC+ $\beta^+$ -Zerfall zum  $^{65}\text{Cu}$ . Wie lauten die Reaktionsgleichungen für die beiden genannten Zerfallsarten?
  - Wie viele  $^{65}\text{Cu}$  Atome sind zwischen dem 01.01.2009 und dem 25.11.2010 in der Quelle erzeugt worden?
27. In der Vorlesung wird die Schwächung der  $\gamma$ -Strahlung der Energie 661 keV einer  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle in Blei. Ohne Abschirmungsmaterial liefert die Quelle im Detektor in einem 12 s Messintervall 9788 Ereignisse. Bringt man eine 20 mm dicke Abschirmungsplatte zwischen Quelle und Detektor, werden 1244 Ereignisse gemessen. Mit einer 28 mm dicken Abschirmung misst man 530 Ereignisse. Die Nullrate des Detektors beträgt 25 Ereignisse in 12 s.
- Berechnen Sie den Schwächungskoeffizienten  $\mu$ ,
  - den Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho}$ ,
  - den Gesamtwirkungsquerschnitt  $\sigma_{ges}$ ,
  - und vergleichen Sie mit Literaturwerten (siehe Anlage).

Anlagen:

Abb. 1 Zerfallsschema des  $^{57}\text{Co}$



$^{65}\text{Cu}:^{65}\text{Zn}$   $\epsilon$  decay

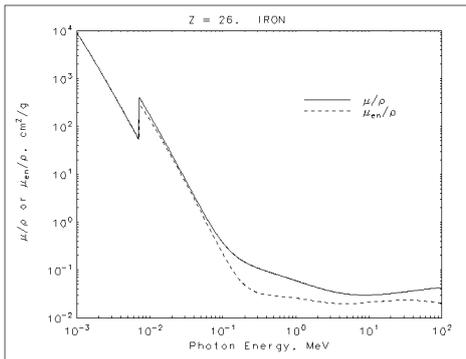
$E_\gamma$	$E_{\text{level}}$	$J\pi_i$	$J\pi_f$	Mult	$\delta$	$I_\gamma^\dagger$	$T_{1/2}$
770.62	770.649	1/2-	3/2-	M1+E2	0.0967	0.00303	99 fs
344.9520	1115.5564	5/2-	1/2-	[E2]		0.00303	0.285 ps
1115.5464	1115.5564	5/2-	3/2-	M1+E2	-0.43715	50.6024	0.285 ps

$\dagger$ : For absolute intensity per 100 decays, multiply by 1.

**2a. Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient**

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

Dichte des Eisen:  $7,874 \text{ g cm}^{-3}$

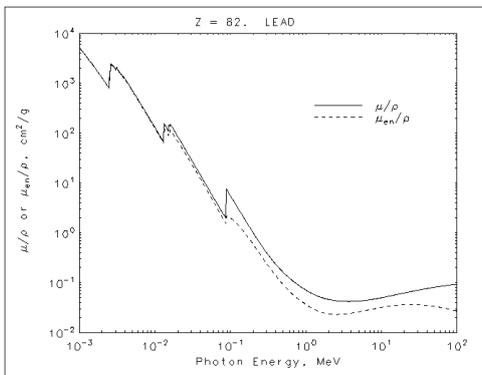


Mass Attenuation Coefficient for Iron					
Energy (MeV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	Energy (MeV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	Energy (MeV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)
0,001	9085,000	0,030	8,17600	1,000	0,060
0,002	3399,000	0,040	3,629	1,250	0,054
0,002	1626,000	0,050	1,958	1,500	0,049
0,003	557,600	0,060	1,205	2,000	0,043
0,004	256,700	0,080	0,595	3,000	0,036
0,005	139,800	0,100	0,372	4,000	0,033
0,006	84,840	0,150	0,196	5,000	0,031
0,007	53,190	0,200	0,146	6,000	0,031
K 0,007	407,600	0,300	0,110	8,000	0,030
0,008	305,600	0,400	0,094	10,000	0,030
0,010	170,600	0,500	0,084	15,000	0,031
0,015	57,080	0,600	0,077	20,000	0,032
0,020	25,680	0,800	0,067		

**2b. Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient**

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

Dichte des Blei:  $11,35 \text{ g cm}^{-3}$



Mass Attenuation Coefficient for Lead (Blei)						
Energy (MeV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	Energy (MeV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	Energy (MeV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	
1,00E-02	1,31E+02	6,00E-02	5,02E+00	1,25E+00	5,88E-02	
1,00E-02	1,31E+02	8,00E-02	2,42E+00	1,50E+00	5,22E-02	
1,00E-02	1,31E+02	8,80E-02	1,91E+00	2,00E+00	4,61E-02	
1,00E-02	1,31E+02	K 8,80E-02	7,68E+00	3,00E+00	4,23E-02	
1,52E-02	1,08E+02	1,00E-01	5,55E+00	4,00E+00	4,20E-02	
L2 1,52E-02	1,49E+02	1,50E-01	2,01E+00	5,00E+00	4,27E-02	
1,55E-02	1,42E+02	2,00E-01	9,99E-01	6,00E+00	4,39E-02	
1,59E-02	1,34E+02	3,00E-01	4,03E-01	8,00E+00	4,68E-02	
L1 1,59E-02	1,55E+02	4,00E-01	2,32E-01	1,00E+01	4,97E-02	
2,00E-02	8,64E+01	5,00E-01	1,61E-01	1,50E+01	5,66E-02	
3,00E-02	3,03E+01	6,00E-01	1,25E-01	2,00E+01	6,21E-02	
4,00E-02	1,44E+01	8,00E-01	8,87E-02			
5,00E-02	8,04E+00	1,00E+00	7,10E-02			

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#	<b>Mass excess = <math>m_{exc}c^2 = (m(Z,A) - A * u) * c^2</math> in keV</b>						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		<b>Mass excess values in keV</b>				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	5		24189,968	12926,808	6847,719	-2184,161	-5182,436	-9529,85358	Na	11	
								33040,092	17570,348	10910,506	-396,963	-5473,766	-13933,567	Mg	12	
N =	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N =		
			<b><math>u = 1,660\,538\,86\,10^{-27}</math> kg</b> <b><math>uc^2 = 931,494\,043</math> MeV</b>													
B	5	52322#	59364#						26119#	18183#	6769,57	-56,946	-8916,172	Al	13	
C	6	32420,666	37557,61	45960#	53281#				32164#	23772#	10754,673	3824,318	-7144,632	Si	14	
N	7	21765,11	25251,164	32038,675	38396#	47543#	56504#							P	15	
O	8	8062,906	9284,152	14612,96	19070,4	27442#	35713#	44954#	53850#					S	16	
F	9	2793,378	3329,747	7559,527	11272,706	18271,772	24926,86	33226#	40296#	48903#	56289#			Cl	17	
Ne	10	-5154,045	-5951,521	-2108,075	429,611	7069,949	11244,601	18057,881	23102,025	30842#	37278#	45997#	53121#	Ar	18	
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 =		

Anlage 4: Mass Excess Table: G. Audi, A.H. Wapstra and C. Thibault, [http://ie.lbl.gov/mass/2003AWMass\\_3.pdf](http://ie.lbl.gov/mass/2003AWMass_3.pdf)



## Lösungen:

**25a.**  $^{65}\text{Zn}$  zerfällt zu 100% durch  $\text{EC}+\beta^+$ -Zerfall zum  $^{65}\text{Cu}$ . Die Halbwertszeit beträgt  $T_{1/2} = 244,06 \text{ d}$  und die Zerfallsenergie  $Q_{\text{EC}} = 1350,8 \text{ keV}$ . Ein relativer Anteil von 50,61% des EC-Zerfalls führt zum zweiten Anregungszustand im  $^{65}\text{Cu}$  mit der Energie 1115,549 keV und ein relativer Anteil von 47,97% des EC zum Grundzustand des  $^{65}\text{Zn}$ . Die verbleibenden 1,42% der gesamten Zerfallsintensität entsprechen dem  $\beta^+$ -Zerfall zum Grundzustand.

Der Anregungsenergie des zweiten Anregungszustands des  $^{65}\text{Cu}$  wird überwiegend durch einen direkten Cross-Over-Übergang zum Grundzustand frei. Die relative Intensität dieser  $\gamma$ -Linie mit 1115,539 keV beträgt 50,60%. Die  $\gamma$ - $\gamma$ -Kaskade über den ersten Anregungszustand mit den Energien 344,95 keV und 770,64 keV besitzt eine relative Intensität von nur 0,003 %.

Eine Abschirmung muss deshalb für die  $\gamma$ -Strahlung mit 1115 keV ausgelegt werden. Die anderen  $\gamma$ -Strahlungen können vernachlässigt werden.

**25b.** Zur Bestimmung der Schwächung der  $\gamma$ -Strahlung mit 1115,54 keV in Eisen wird der Massenschwächungskoeffizient durch (logarithmische) Interpolation aus den Tabellenwerten ermittelt.

E	ln E	ln(my/rho)	my/rho
keV			cm**2/g
1000	6,90776	-2,81341	0,06000
1250	7,13090	-2,91877	0,05400
1115,54	7,01709	-2,86504	0,05698

Massenschwächungskoeffizient:  $\mu/\rho = 0,05698 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Schwächungskoeffizient:  $\mu = 0,05698 \cdot 7,874 \text{ cm}^{-1} = 0,44866 \text{ cm}^{-1}$

Schwächung:  $\frac{I}{I_0} = \exp(-0,44866 \text{ cm}^{-1} \cdot 20 \text{ cm}) = \exp(-8,9732)$

$$\frac{I}{I_0} = 0,0001268 = 1,3 \cdot 10^{-4}$$

**25c.** Bei Energien um 1 MeV ist die abschirmende Wirkung von zwei Elementen in etwa gleich, wenn das Produkt aus Dichte und Dicke gleich ist.

Dichte von Eisen:  $\rho_{\text{Fe}} = 7,874 \text{ g cm}^{-3}$

Dichte von Blei:  $\rho_{\text{Pb}} = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$

Geschätzte Dicke des Bleis:  $x_{\text{Pb}} = \frac{\rho_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Pb}}} \cdot 20 \text{ cm} = \frac{7,874}{11,35} \cdot 20 \text{ cm} = 13,87 \text{ cm}$

**25d.** Schwächung der  $\gamma$ -Strahlung mit der Energie 1115,54 keV in 13,87 cm Blei. Der Massenschwächungskoeffizient wird durch (logarithmische) Interpolation aus den Tabellenwerten ermittelt.

E	ln E	ln(my/rho)	my/rho
keV			cm**2/g
1000	6,90776	-2,64508	0,07100
1250	7,13090	-2,83361	0,05880
1115,54	7,01709	-2,73746	0,06473



Massenschwächungskoeffizient:  $\mu/\rho = 0,06473 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Schwächungskoeffizient:  $\mu = 0,06473 \cdot 11,35 \text{ cm}^{-1} = 0,734469 \text{ cm}^{-1}$

Schwächung:  $\frac{I}{I_0} = \exp(-0,73469 \text{ cm}^{-1} \cdot 13,87 \text{ cm}) = \exp(-10,190)$

$$\frac{I}{I_0} = 0,00003754 = 3,8 \cdot 10^{-5}$$

Fazit: Die aus den Vorlesungsunterlagen entnommene Darstellung von  $\mu/\rho$  als Funktion der Energie der  $\gamma$ -Strahlung zeigt zwar, dass bei  $\sim 1 - 2 \text{ MeV}$  die Werte von  $\mu/\rho$  näherungsweise konstant sind, woraus die in 25c. verwendete Beziehung:

$$\rho_1 \cdot x_1 = \rho_2 \cdot x_2 \text{ folgt,}$$

trotzdem ergibt sich für das Schwächungsverhältnis  $I/I_0$  Werte von  $1,3 \cdot 10^{-4}$  und  $3,8 \cdot 10^{-5}$ , die sich um den Faktor 3,4 unterscheiden.

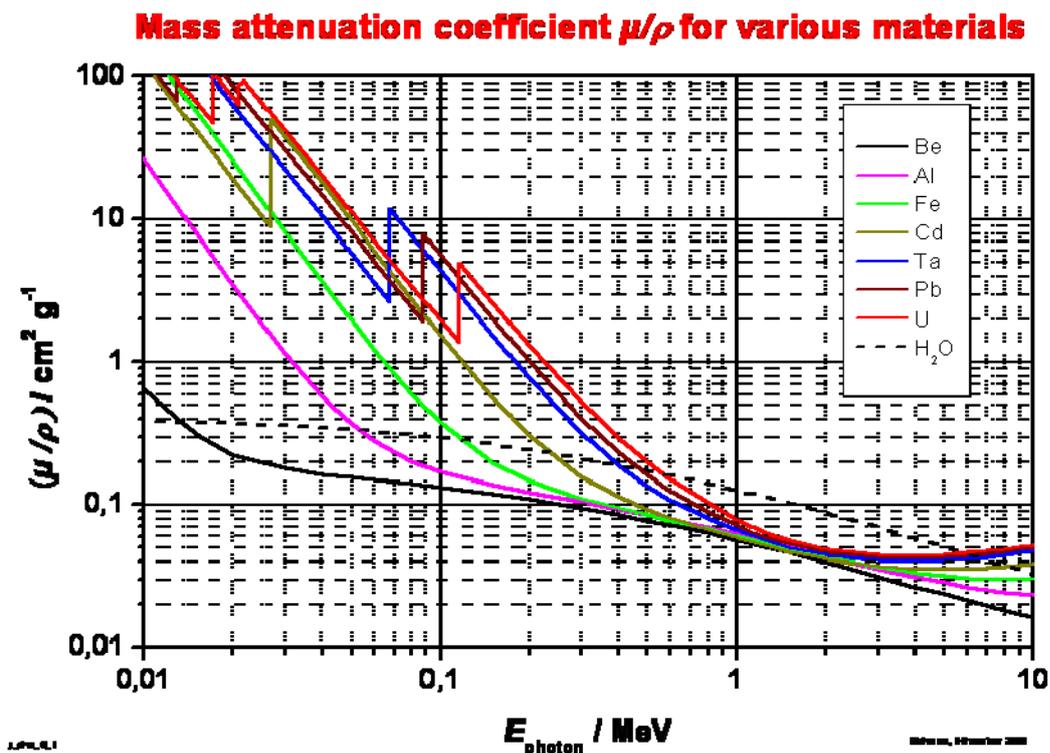


Abbildung: Massenschwächungskoeffizient für verschiedene Elemente als Funktion der Energie.

- 26a. Als Bezugsdatum für eine  $^{65}\text{Zn}$  Strahlenquelle wurde 01.01.2009 um 00:00 h angegeben.  
Aktivität zum Bezugszeitpunkt:  $A_0 = 1,58 \text{ MBq}$   
Die Aktivität am 25.11.2010 um 00:00 h ist gesucht.  
Zeitdifferenz:  $T = 693 \text{ d}$



Aktivität am 25.11.2010:

$$A = 1,58 \text{ MBq} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot 693 \text{ d}}{244,06 \text{ d}}\right)$$

$$A = 1,58 \text{ MBq} \cdot 0,13971$$

$$A = 0,2207 \text{ MBq} = 221 \text{ kBq}$$

**26b.** Reaktionsgleichungen für EC+ $\beta^+$ :



**26c.** Am 01.01.2009 00:00 h enthielt die Quelle eine  ${}^{65}\text{Zn}$  Aktivität von 1,58 MBq.  
Zahl der  ${}^{65}\text{Zn}$  Atome am 01.01.2009 00:00 h:

$$N_0 = -\frac{A}{\lambda} = -\frac{A \cdot T_{1/2}}{\ln 2}$$

$$N_0 = -\frac{-1,5810^6 \text{ s}^{-1} \cdot 244,06 \cdot 86400 \text{ s}}{\ln 2}$$

$$N_0 = 4,8066 \cdot 10^{13}$$

Am 25.11.2010 00:00 h enthielt die Quelle eine  ${}^{65}\text{Zn}$  Aktivität von 221 kBq.  
Zahl der  ${}^{65}\text{Zn}$  Atome am 25.11.2010 00:00 h:

$$N_1 = -\frac{A}{\lambda} = -\frac{A \cdot T_{1/2}}{\ln 2}$$

$$N_1 = -\frac{-221 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot 244,06 \cdot 86400 \text{ s}}{\ln 2}$$

$$N_1 = 6,7232 \cdot 10^{12}$$

Zahl der neu entstandenen  ${}^{65}\text{Cu}$  Atome:

$$N_{\text{Cu}} = N_0 - N_1$$

$$N_{\text{Cu}} = 4,8066 \cdot 10^{13} - 6,7232 \cdot 10^{12} = 4,1342 \cdot 10^{13}$$

**27a.** Zählrate ohne Schwächung:  $R_1 = 9788(12 \text{ s})^{-1}$

Zählrate hinter  $x_2 = 2 \text{ cm Pb}$ :  $R_2 = 1244(12 \text{ s})^{-1}$

Zählrate hinter  $x_3 = 2,8 \text{ cm Pb}$ :  $R_3 = 530(12 \text{ s})^{-1}$

Nullrate des Detektors:  $R_0 = 25(12 \text{ s})^{-1}$

Für  $x_2 = 2 \text{ cm}$  gilt:

$$R_2 - R_0 = (R_1 - R_0) \cdot \exp(-\mu_{1,2} \cdot x_2)$$

$$\mu_{1,2} = \frac{-\ln\left(\frac{R_2 - R_0}{R_1 - R_0}\right)}{x_2} = \frac{-\ln\left(\frac{1244 - 25}{9788 - 25}\right)}{2,0 \text{ cm}}$$

$$\mu_{1,2} = 1,0403 \text{ cm}^{-1}$$

Für  $x_3 = 2,8 \text{ cm}$  gilt:

$$R_2 - R_0 = (R_1 - R_0) \cdot \exp(-\mu_{1,2} \cdot x_2)$$



$$\mu_{1,3} = \frac{-\ln\left(\frac{R_2 - R_0}{R_1 - R_0}\right)}{x_3} = \frac{-\ln\left(\frac{530 - 25}{9788 - 25}\right)}{2,8}$$

$$\mu_{1,3} = 1,0578 \text{ cm}^{-1}$$

Schwächungskoeffizient:

Mittelwert:

$$\mu = 1,049 \text{ cm}^{-1}$$

Massenschwächungskoeffizient:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1,049 \text{ cm}^{-1}}{11,35 \text{ g cm}^{-3}} = 0,09243 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma_{ges} = \frac{A_{rel}}{N_A} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{207,2 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,09243 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\sigma_{ges} = \frac{A_{rel}}{N_A} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) = 3,180 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 = 31,8 \text{ b}$$

Massenschwächungskoeffizient aus der Literatur:

E	ln E	ln(my/rho)	my/rho
keV			cm**2/g
<b>600</b>	6,39693	-2,07944	<b>0,12500</b>
<b>800</b>	6,68461	-2,42250	<b>0,08870</b>
<b>661</b>	6,49375	<b>-2,19490</b>	<b>0,11137</b>

Der Messwert weicht 17 % vom Tabellenwert ab.

