

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

1. a. Aus welchen Elementarteilchen ist ein Atom aufgebaut?  
 b. Beschreiben Sie den Atomaufbau und die Grundzüge des Bohrschen Atommodells.  
 c. Was versteht man unter „Elektronenschalen“? Wie werden sie bezeichnet?  
 d. Wie viele Elektronen können die verschiedenen Schalen aufnehmen?

2. Betrachten Sie das Aluminium Isotop  $^{27}\text{Al}$ :

a. Berechnen Sie die (exakte) Masse  $m$  in den Einheiten 1 kg und 1 GeV/c<sup>2</sup>.

Massenexcess des  $^{27}\text{Al}$   $m_{exc}(13, 27) = m_{exc}(^{27}\text{Al}) = -17196,658 \text{ keV} / c^2$

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

$$m(^{27}\text{Al}) = m(13, 27) = m_{exc}(13, 27) - 27 \cdot u$$

$$m(^{27}\text{Al}) = m(13, 27) = 25133,14525 \text{ MeV} / c^2$$

Mit

$$1 \text{ eV} = 1,602177733 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

und

$$c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$$

folgt:

$$m(^{27}\text{Al}) = m(13, 27) = 4,480 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

b. Berechnen Sie die Bindungsenergie B.

$$B(Z, A) = (Z \cdot m_{exc}(1,1) + N \cdot m_{exc}(0,1) - m_{exc}(Z, A)) \cdot c^2$$

$$B(Z, A) = 224,951714 \text{ MeV}$$

c. Berechnen Sie die Bindungsenergie pro Nukleon B/A.

$$B/A = \frac{B(13, 27)}{27} = \frac{224,951714}{27} \text{ MeV} = 8,332 \text{ MeV}$$

d. Schätzen Sie die Atomgröße. Radius:  $R_{at} \cong 0,1 \text{ nm}$

e. Wie ändert sich die Atomkerngröße als Funktion der Atommassenzahl? Schätzen Sie den Atomkernradius für  $^{27}\text{Al}$ .

$$R_K = 1,3 \text{ fm} \cdot \sqrt[3]{A}$$

$$R_{K,^{27}\text{Al}} = 1,3 \text{ fm} \cdot \sqrt[3]{27} = 3,9 \text{ fm}$$

f. Beschreiben Sie den Zerfall des  $^{27}\text{Mg}$  zum  $^{27}\text{Al}$  an Hand des Zerfallsschemas im Anhang.

3. Erklären Sie folgende Begriffe:

a. Isotope, Isobare, Isotone.

b.  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Strahlung. Welche Umwandlungsreaktionen beschreiben den  $\alpha$ -,  $\beta^-$ -,  $\beta^+$ - und den EC-Zerfall (EC-electron capture). Was gilt für die Strahlungsenergien und Q-Werte?

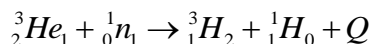
c. Erklären Sie die Begriffe "Spontanspaltung", "neutroneninduzierte Spaltung" und "Spaltbarriere"?

4. a. Beschreiben Sie die Funktionsweise eines NaJ-Szintillationsdetektors und eines Ge-Halbleiterdetektors als Nachweisgerät für Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlung.

b. Erläutern Sie das Prinzip einer Dicken- und Dichtemessung mit Hilfe von Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlung.

c. Erklären Sie die prinzipielle Funktionsweise eines des Proportionalzählrohrs.

d. Zum Neutronennachweis verwendet man oft  $^3\text{He}$  Gas gefüllte Proportionalzählrohre: Langsame Neutronen können mit  $^3\text{He}$  eine Kernreaktion eingehen, bei der  $^3\text{H}$  und  $^1\text{H}$  als Endprodukte entstehen. Berechnen Sie die dabei frei werdende Energie Q.



$$Q = (m_{exc}(2,3) + m_{exc}(0,1) - m_{exc}(1,3) - m_{exc}(1,1)) \cdot c^2$$



$$Q = (14931,2148 + 8071,3171 - 14949,806 - 7288,9709) \cdot \text{keV}$$

$$Q = 763,755 \text{ keV}$$

e. Die  $^1\text{H}$  und  $^3\text{H}$  Ionen (in 4d.) werden im  $^3\text{He}$  Gas des Zählrohres abgebremst. Wie etwa sieht das Impulshöhenspektrum aus, dass nach 4d. zu erwarten ist?

5. Der Hörsaal A210 befindet sich über dem Bestrahlungsbunker des Labors. Man nehme an, dass beim Messbetrieb mit einer  $^{60}\text{Co}$  Strahlungsquelle Personen im Hörsaal A210 mindestens  $R = 3 \text{ m}$  von der Quelle entfernt sind. Zusätzlich befindet sich eine  $z = 72 \text{ cm}$  dicke Betondecke (engl. ordinary concrete) zwischen Labor und Hörsaal. Die  $^{60}\text{Co}$  Quelle hatte am 09.10.1979 eine Aktivität von  $17 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ . Im Anhang finden Sie ein Zerfallsschema des  $^{60}\text{Co}$ . Betrachten Sie nur die beiden  $\gamma$ -Quanten höchster Energie (1173 keV und 1332 keV).

a. Wie groß ist die Zahl der  $\gamma$ -Quanten der Energie 1173 keV und 1332 keV, die unter Berücksichtigung des Abstands  $R$  und der Abschirmungswirkung der Betondecke der Dicke  $z$  im Hörsaal in einer Bezugsfläche von  $1 \text{ m}^2$  in der Zeit von 1 s zu erwarten sind.

b. Wie groß war die ursprüngliche Masse des  $^{60}\text{Co}$  in der Strahlenquelle zum Referenzdatum?

7. In einem Vorlesungsversuch wurde die Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung der Energie  $E_\gamma = 662 \text{ keV}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) in Aluminium und Blei untersucht. Die Untergrundzählrate betrug 0 Ereignisse in einer Messzeit von 10 s. Ohne Absorber wurden im Mittel 9334 Ereignisse in 10 s gemessen.

Bestimmen Sie den Schwächungskoeffizienten  $\mu$ , den Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho}$

und den Wirkungsquerschnitt  $\sigma$ .

(Dichte: Aluminium  $\rho_{\text{Al}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$ , Blei  $\rho_{\text{Pb}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$ ;

Molmasse: Aluminium  $A_{\text{Al}} = 26,982 \text{ g mol}^{-1}$ , Blei  $A_{\text{Pb}} = 207,2 \text{ g mol}^{-1}$ ;

Avogadro Konstante:  $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23} \text{ g mol}^{-1}$ )

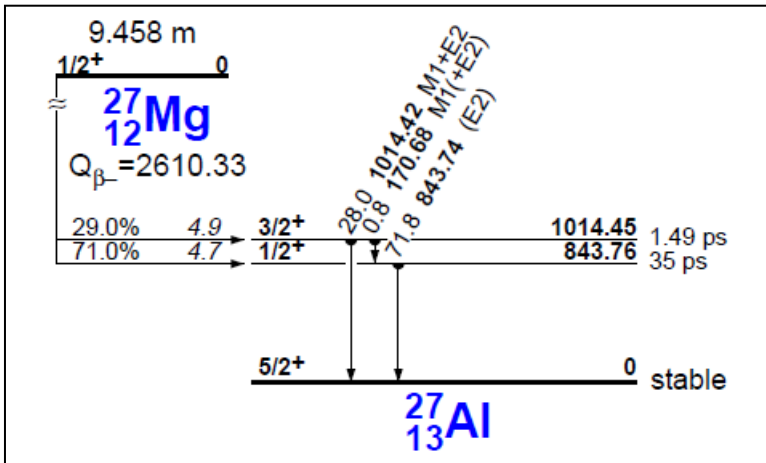
Messdaten:

Absorberdicke	Absorbermaterial	
	Aluminium	Blei
$z / \text{cm}$	$N / 10 \text{ s}$	$N / 10 \text{ s}$
0,4		5808
0,8	7817	
3,6		164
10,0	1391	



Anhang:

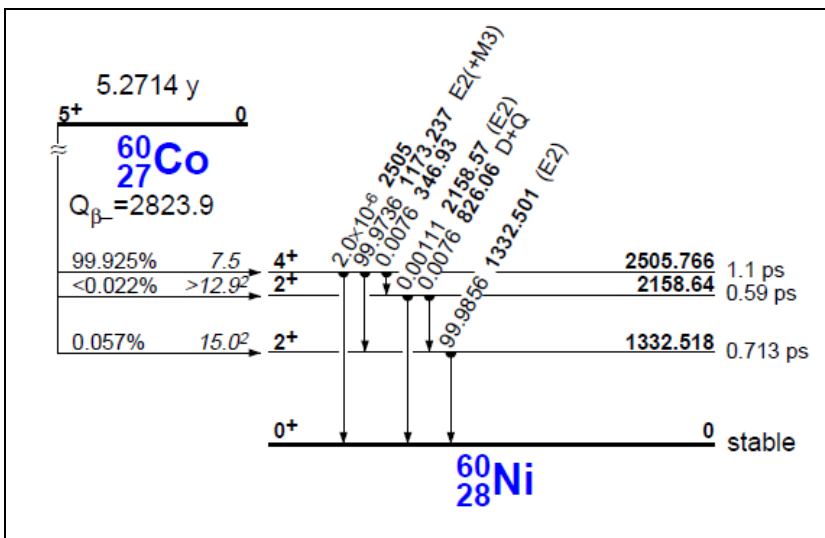
A1. Zerfallsschema von  $^{27}\text{Mg}$ :



$\gamma(^{27}\text{Al})$  from  $^{27}\text{Mg}$  (9.458 m)  $\beta^-$  decay <for I $\gamma$ % multiply by 1.00>  
 170.685 ( $\pm$ 0.81) M1(+E2);  $\delta = +0.056$   
 843.743 ( $\pm$ 71.84) (E2)  
 1014.423 ( $\pm$ 28.04) M1+E2;  $\delta = -0.35112$

Quelle: <http://www.wiley-vch.de/books/info/0-471-35633-6/toi99/toi99cd.pdf>

A2. Zerfallsschema von  $^{60}\text{Co}$ :



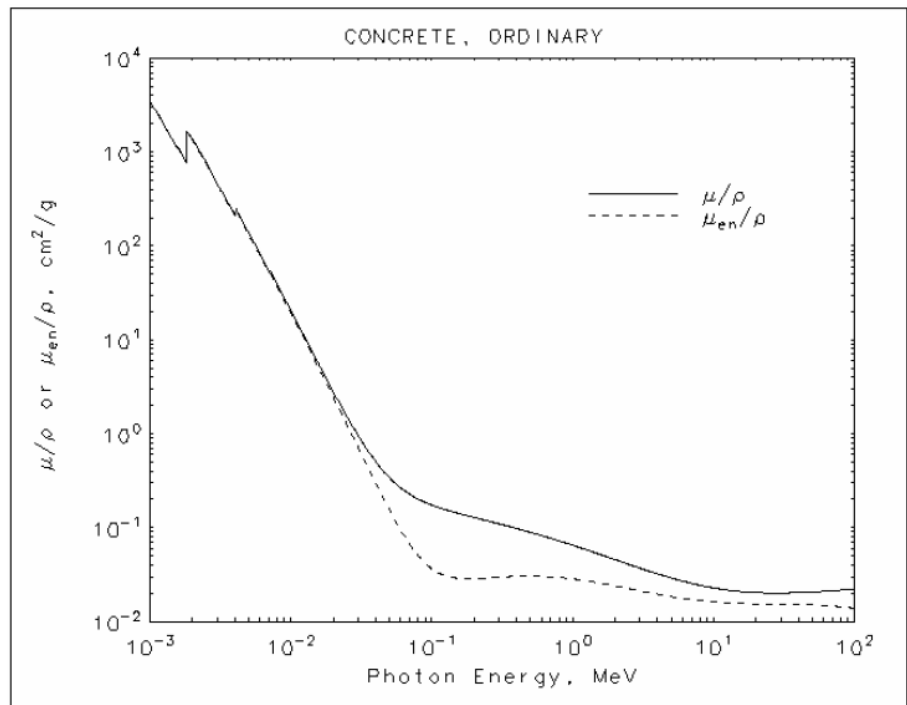
$\gamma(^{60}\text{Ni})$  from  $^{60}\text{Co}$  (5.2714 y)  $\beta^-$  decay <for I $\gamma$ % multiply by 1.0>  
 346.937 ( $\pm$ 0.0076 s)  
 826.063 ( $\pm$ 0.0076 s) D+Q;  $\delta = +0.93$   
 1173.2374 ( $\pm$ 99.97367)  
 E2(+M3);  $\delta = -0.002522$   
 1332.5015 ( $\pm$ 99.98564) (E2)  
 2158.5710 ( $\pm$ 0.0011118) (E2)  
 2505 ( $\pm$ 2.0 $\times$ 10<sup>-6</sup>)

Quelle: <http://www.wiley-vch.de/books/info/0-471-35633-6/toi99/toi99cd.pdf>



## Anlage A3 Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient

$E$	$\mu/\rho$
MeV	$\text{cm}^2/\text{g}$
1,00E-02	2,05E+01
1,50E-02	6,35E+00
2,00E-02	2,81E+00
3,00E-02	9,60E-01
4,00E-02	5,06E-01
5,00E-02	3,41E-01
6,00E-02	2,66E-01
8,00E-02	2,01E-01
1,00E-01	1,74E-01
1,50E-01	1,44E-01
2,00E-01	1,28E-01
3,00E-01	1,10E-01
4,00E-01	9,78E-02
5,00E-01	8,92E-02
6,00E-01	8,24E-02
8,00E-01	7,23E-02
1,00E+00	6,50E-02
1,25E+00	5,81E-02
1,50E+00	5,29E-02
2,00E+00	4,56E-02
3,00E+00	3,70E-02
4,00E+00	3,22E-02
5,00E+00	2,91E-02
6,00E+00	2,70E-02
8,00E+00	2,43E-02
1,00E+01	2,28E-02
1,50E+01	2,10E-02
2,00E+01	2,03E-02



**Dichte:**  $\rho_{\text{Concrete}} = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ ;

**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	5	6	7	8	9	10	11	12	Na	11	
								24189,968	12926,808	6847,719	-2184,161	-5182,436	-9529,85358	Mg	12	
								33040,092	17570,348	10910,506	-396,963	-5473,766	-13933,567	Al	13	
N =	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N =		
			$u = 1,660\ 538\ 86\ 10^{-27}\ \text{kg}$ $uc^2 = 931,494\ 043\ \text{MeV}$													
B	5	52322#	59364#													
C	6	32420,666	37557,61	45960#	53281#											
N	7	21765,11	25251,164	32038,675	38396#	47543#	56504#									
O	8	8062,906	9284,152	14612,96	19070,4	27442#	35713#	44954#	53850#							
F	9	2793,378	3329,747	7559,527	11272,706	18271,772	24926,86	33226#	40296#	48903#	56289#					
Ne	10	-5154,045	-5951,521	-2108,075	429,611	7069,949	11244,601	18057,881	23102,025	30842#	37278#	45997#	53121#			
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)



5a. Massenschwächungskoeffizient für 1,173 MeV und 1,332 MeV:

Logarithmische Interpolation:

E/MeV	mü/rho	lnE	ln(mü/rho)
1,000	6,50E-02	0,000	-2,733
1,250	5,81E-02	0,223	-2,846
1,500	5,29E-02	0,405	-2,939
<b>1,173</b>	<b>0,05999</b>	0,15956457	-2,813614972
<b>1,332</b>	<b>0,05623</b>	0,28668157	-2,87826525

Massenschwächungskoeffizient:  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{E=1,173\text{MeV}} = 0,05999 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{E=1,332\text{MeV}} = 0,05623 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Schwächungskoeffizient:  $\mu_{E=1,173\text{MeV}} = 0,13794 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

$\mu_{E=1,332\text{MeV}} = 0,12933 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Halbwertszeit der Quelle:  $T_{1/2} = 5,2714 \text{ y}$

Referenzdatum der Quelle: 09.10.1979

Aktivität am Referenzdatum:  $A_0 = 1,70 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$

Aktuelles Datum: 26.11.2012

Zeitdifferenz:  $\Delta T = 12101 \text{ d} = 33,133 \text{ y}$

Aktuelle Aktivität des  $^{60}\text{Co}$ :  $A = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)\Delta T}{T_{1/2}}} = 2,178 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$

Aus dem Zerfallsschema kann man die relativen Intensitäten pro Zerfall ablesen. Die Werte lauten:

$I_{rel,1173\text{keV}} = 0,999736$

$I_{rel,1332\text{keV}} = 0,999856$

Multipliziert man  $I_{rel}$  mit  $A$ , so erhält man die aktuellen Intensitäten der von der Quelle insgesamt ausgesandten  $\gamma$ -Quanten:

$I_{1173\text{keV}} = 2,179 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$

$I_{1332\text{keV}} = 2,179 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$

Beide  $\gamma$ -Strahlungen verteilen sich auf den gesamten Raumwinkel. Gesucht ist die Zahl der Quanten pro  $1 \text{ m}^2$  im Abstand von 3 m. Dazu muss die Kugeloberfläche für  $R = 3 \text{ m}$  bestimmt werden.

$O = 4\pi \cdot R^2 = 4\pi \cdot 9 \text{ m}^2 = 113,097 \text{ m}^2$

Intensität pro  $1 \text{ m}^2$  in 3m Abstand:  $\left(\frac{dI}{dA}\right)_{1173\text{keV}} = 1,926 \cdot 10^7 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\left(\frac{dI}{dA}\right)_{1332\text{keV}} = 1,927 \cdot 10^7 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Für beide  $\gamma$ -Quanten muss die Schwächung in der Betondecke von 72 cm Dicke berechnet werden.

Intensität pro  $1 \text{ m}^2$  in 3m Abstand mit Schwächung in 72 cm Beton:

$\left(\frac{dI}{dA}\right)_{1173\text{keV},\text{Beton}} = 1,926 \cdot 10^7 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot e^{-0,13797 \text{ cm}^{-1} \cdot 72 \text{ cm}}$

$\left(\frac{dI}{dA}\right)_{1173\text{keV},\text{Beton}} = 934,296 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$$\left(\frac{dI}{dA}\right)_{1332keV, \text{Beton}} = 1,927 \cdot 10^7 m^{-2} s^{-1} \cdot e^{-0,12933cm^{-1} \cdot 72cm}$$

$$\left(\frac{dI}{dA}\right)_{1332keV, \text{Beton}} = 1740,324 m^{-2} s^{-1}$$

Zahl der 1,173 MeV und 1,332 MeV Quanten pro 1 m<sup>2</sup> und 1 s in 3 m Abstand mit 72 cm dicker Betonabschirmung im Zwischenraum

$$\left(\frac{dI}{dA}\right)_{ges, \text{Beton}} = 2674 m^{-2} s^{-1}$$

5b. Aktivität zum Bezugszeitpunkt:  $A_0 = 1,70 \cdot 10^{11} s^{-1}$

Zahl der Atome:  $N_0 = \frac{A_0}{-\lambda} = \frac{A_0 \cdot T_{1/2}}{-\ln 2}$

$$N_0 = \frac{-1,7010^{11} s^{-1} \cdot 5,2714 \cdot 365,25 \cdot 86400 s}{-\ln 2}$$

$$N_0 = 4,0799 \cdot 10^{19}$$

Masse:  $m_0 = \frac{A_{60Co}}{N_A} \cdot N_0 = \frac{60 g mol^{-1}}{6,0221 \cdot 10^{23} mol^{-1}} \cdot 4,0799 \cdot 10^{19}$

$$m_0 = \frac{A_{60Co}}{N_A} \cdot N_0 = 4,06 mg$$

7. Schwächungskoeffizient  $\mu = \frac{\ln\left(\frac{N(z_2) - N_u}{N_0}\right) - \ln\left(\frac{N(z_1) - N_u}{N_0}\right)}{z_2 - z_1}$

Aluminium  $\mu_{Al} = \frac{\ln\left(\frac{1391-0}{9334}\right) - \ln\left(\frac{7817-0}{9334}\right)}{(10,0-0,8) cm} = -0,188 cm^{-1}$

Blei  $\mu_{Pb} = \frac{\ln\left(\frac{164-0}{9334}\right) - \ln\left(\frac{5808-0}{9334}\right)}{(3,6-0,4) cm} = -1,115 cm^{-1}$

Massenschwächungskoeffizient:

Aluminium  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Al} = 0,0703 cm^2 g^{-1}$

Blei  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Pb} = 0,0986 cm^2 g^{-1}$

Wirkungsquerschnitt:

Aluminium  $\sigma_{Al} = \frac{A_{mol}}{N_A} \cdot \frac{\mu}{\rho} = \frac{26,982 g mol^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} mol^{-1}} \cdot 0,0703 cm^2 g^{-1}$

$$\sigma_{Al} = 3,1499 \cdot 10^{-24} cm^2 = 3,1 b$$

Blei  $\sigma_{Al} = \frac{A_{mol}}{N_A} \cdot \frac{\mu}{\rho} = \frac{207,2 g mol^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} mol^{-1}} \cdot 0,0986 cm^2 g^{-1}$

$$\sigma_{Al} = 3,3941 \cdot 10^{-23} cm^2 = 33,9 b$$

