

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

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

**1. Die Größe der Atome verschiedener Elemente ist**

- a proportional zur Ordnungszahl.
- b näherungsweise konstant.
- c proportional zu Massenzahl.
- d bei Übergangsmetallen typischerweise kleiner als bei Edelgasen.
- e bei sehr massereichen Elementen besonders gering.

**2. Atomradien sind ungefähr**

- a. 10 - 20 nm.
- b. 1 - 2  $\mu\text{m}$ .
- c. 0,1 - 0,2 pm.
- d. 0,1 - 0,2  $\mu\text{m}$ .
- e. 0,1 - 0,2 nm.

**3. Wie viele Moleküle des  $\text{H}_2\text{O}$  enthält ein Liter Wasser? Verwenden Sie für die Dichte**

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,0 \text{ g cm}^{-3}.$$

- a.  $3,34 \cdot 10^{25}$
- b.  $6,02 \cdot 10^{23}$
- c.  $3,34 \cdot 10^{23}$
- d.  $1,80 \cdot 10^{24}$

**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 größer als für L-Schale.
- c. Neutrale, nicht angeregte Atome mit  $Z \geq 2$  haben 2 Elektronen in der K-Schale.
- d. Die K, L, M, N,....-Schalen sind mit 2, 4, 9, 16, ....Elektronen besetzt.
- e. Neutrale Edelgasatome mit  $Z > 2$  haben 8 Elektronen in der äußeren Schale.
- f. Die Ionisierungsenergie für Elektronen der K-Schale ist für alle Elemente konstant.

**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 Heliums.
- c. Interstellare Gasnebel erscheinen deshalb rot, weil sie sehr viel Wasserstoffgas enthalten, welches eine rote  $\text{H}_\alpha$ -Linie der Balmer Serie 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  $\text{H}_\alpha$ -Linie der Balmer Serie des Wasserstoffs entsteht durch einen Elektronensprung vom zweiten zum ersten Anregungszustand.



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

- a. „Schwarze Körper“ müssen immer eine dunkle bzw. schwarze Färbung besitzen.
- b. Die Sonne kann als „Schwarzer Körper“ bezeichnet werden.
- c. „Schwarze Körper“ werden deshalb als "schwarz" bezeichnet, weil sie alle auftreffende Strahlung komplett reflektieren.
- d. „Schwarze Körper“ absorbieren alle auftreffende Strahlung und senden eine reine Temperaturstrahlung in Form des Planckschen Strahlungsspektrums aus.
- e. „Schwarzer Körper“ sind deshalb schwarz, weil er keinerlei Strahlung aussendet.

7. **Verschiedene elektromagnetischen Strahlungsarten sollen nach aufsteigender Frequenz sortiert werden. Welche Aussage ist richtig?**

$\gamma$ -Strahlung (1), sichtbares Licht (2), Radio-Mittelwelle (3), Radarstrahlung (4), weiche UV-Strahlung (5), IR-Strahlung (6), Radio-Longwelle (7), kontinuierliche Röntgenstrahlung (8), kosmische Strahlung (9), charakteristische Röntgenstrahlung (10), harte UV-Strahlung (11), Mikrowellenstrahlung (12), UKW (13).

- a.  $(13) < (5) < (10) < (2)$
- b.  $(5) < (11) < (8) < (1)$
- c.  $(2) < (5) < (6) < (3)$
- d.  $(7) < (6) < 12 < (9)$

8. **Durch welche gemeinsame Eigenschaften werden Isobare beschrieben?**

- a. Die Zahl der Neutronen und die Zahl der Protonen ist gleich.
- b. Summe aus Protonenzahl und Elektronenzahl ist gleich der Neutronenzahl.
- c. Summe aus Neutronenzahl und Protonenzahl ist konstant.
- d. Zahl der Elektronen, Protonen und Neutronen ist exakt gleich.

9. **Welche Aussage ist richtig?**

- a. Die Atommassenkonstante  $u$  ist größer als die Masse des neutralen Wasserstoffs  $^1\text{H}$ , aber kleiner als die Masse des Neutrons.
- b. Multipliziert mit  $c^2$  beträgt die Atommassenkonstante  $u \cdot c^2 = 931,494 \text{ MeV}$ .
- c. Die Atommassenkonstante entspricht exakt der Masse eines neutralen Wasserstoffatoms  $^1\text{H}$ .
- d. Die Atommassenkonstante hat den Wert  $1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .
- e. Die Atommassenkonstante ist gleich  $(1/12)$  der Masse des neutralen  $^{12}\text{C}$  Isotopes.

10. **Welche Aussage gilt für den Massenexzess (engl. mass excess)  $m_{\text{exc}}$ ?**

- a.  $m_{\text{exc}}$  ist die nach der Beziehung  $\Delta m = B/c^2$  aus der Bindungsenergie  $B$  berechenbare Massendifferenz  $\Delta m$ .
- b.  $m_{\text{exc}}$  entspricht der verlorenen Masse bei der Ionisation eines Atoms.
- c.  $m_{\text{exc}}$  die Differenz von Atomkernmasse und Atommasse.
- d.  $m_{\text{exc}}$  entspricht dem Massenunterschied zwischen der Atommasse und dem Produkt aus Atommassenzahl  $A$  und Atommassenkonstante  $u$ .

11. **Prüfen Sie mit Hilfe der beiliegenden Atommassentabelle (Mass excess values) die folgenden Aussagen. Welche Aussage ist in Bezug auf den genauen Massen bzw. Energiewert des  $^{16}\text{O}$  richtig?**

- a.  $m(^{16}\text{O}) \cdot c^2 = 14,9039 \text{ MeV}$
- b.  $m(^{16}\text{O}) = 2,65771 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
- c.  $m(^{16}\text{O}) \cdot c^2 = 14,8992 \text{ GeV}$
- d.  $m(^{16}\text{O}) = 2,65602 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
- e.  $m(^{16}\text{O}) \cdot c^2 = 15,9994 \text{ GeV}$



12. Beim Nachweis von Neutronen verwendet man im R+S-Labor einen Proportionaldetektor, der mit  $^3\text{He}$  gefüllt ist. Neutronen können mit  $^3\text{He}$  reagieren, wobei geladene Teilchen in Form von  $^1\text{H}$  und  $^3\text{H}$  erzeugt werden. Bestimmen Sie die Reaktionsenergie mit Hilfe der Atommassentabellen (Mass Excess Values). Welcher Wert ist richtig?

- a. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} = c^2 = -763,75535 \text{ keV}$
- b. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} = c^2 = +800,93785 \text{ keV}$
- c. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} = c^2 = -1918,2134 \text{ keV}$
- d. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} = c^2 = -763,75535 \text{ keV}$
- e. Reaktionsenergie:  $Q_{\text{Reakt}} = c^2 = +0,76375535 \text{ MeV}$

13. Welche Aussage über radioaktive Zerfallsprozesse ist richtig?

- a. Beim  $\alpha$ -Zerfall wird Kernmaterie in besonders stabiler Form ( $^4\text{He}^{++}$ ) emittiert.
- b. Positronen sind Bestandteil der Protonen im Atomkern.
- c. Innerhalb eines Atomkerns können sich zwar Protonen in Neutronen, nicht aber Neutronen in Protonen umwandeln.
- d. Bei der Umwandlung eines freien Neutrons in ein Proton werden zusätzlich zum Proton ein Positron und ein Neutrino neu gebildet.

14. Eigenschaften der  $\gamma$ -Strahlung. Welche Aussage ist richtig?

- a.  $\gamma$ -Quanten sind geladene Teilchen mit endlicher Ruhemasse.
- 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 nur mit Hilfe des Comptoneffekts. Dabei wird ein Teil der Energie des  $\gamma$ -Quants auf ein Elektron übertragen und ein neues  $\gamma$ -Quant mit kleinerer Energie erzeugt.
- d.  $\gamma$ -Quanten sehr hoher Energie (Energiebereich: GeV) erzeugen in Materie vorzugsweise Elektron-Positron-Paare.

15. Beim Comptoneffekt

- a. wird stets der Energieerhaltungssatz verletzt.
- b. wird ein Teil der Energie eines  $\gamma$ - oder Röntgen-Quants auf ein Elektron der Atomhülle übertragen.
- c. verschwindet das einfallende Photon vollständig.
- d. entstehen winkelgestreute Photonen mit kleinerer Energie.
- e. erhält ein Elektron der Atomhülle die gesamte Energie des einfallenden Photons.
- f. werden Positronen erzeugt.

16. Welche Beziehung gilt allgemein für die Energie von Photonen

- a.  $E = m c^2$
- b.  $E = \frac{1}{2} m v^2$
- c.  $E = e U$
- d.  $E = (h c)/\lambda = h \nu$
- e.  $\Delta E = (h/2\pi)/\Delta t$

17. Welche Aussagen zu den direkt ionisierenden Strahlungen sind richtig?

- a.  $\alpha$ -Teilchen erzeugen in 1 cm Luft typischerweise ca. 300 Ionenpaare.
- b. Geladenen Teilchen erzeugen unterschiedlich dichte Ionisationsspuren in Materie.
- c.  $\alpha$ -Teilchen besitzen in Luft eine Reichweite von 2 cm bis 10 cm.
- d. Geladene, direkt ionisierende Teilchen können den Körper einer Person ohne jegliche Wechselwirkung durchqueren.



- 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 der Materie.
  - d.  $\gamma$ -Strahlung ist indirekt ionisierend. Sie kann auf Elektronen der Atomhülle (Photoeffekt), aber auch auf den Atomkernen (Kernphotoeffekt) Energie übertragen.
  - e.  $\gamma$ -Strahlung wird in Materie exponentiell geschwächt.
- 20. Welche Aussage zur Kernenergie ist richtig?**
- a. 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 CO<sub>2</sub>.
  - b. Brennstoff eines Kernkraftwerks sind spontansplattendende Stoffe wie z. B. <sup>238</sup>U.
  - c. Kernkraftwerke sind absolut sicher und völlig risikolos
  - 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.
- 20. Welche Aussage zur Kerntechnik ist 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 <sup>235</sup>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. Bor) und durch einen Zusatz von Borsäure mit variabler Konzentration im Kühlmittel/Moderator geregelt.
  - d. Brennelemente 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.
- 25. Welche Aussage zur Röntgenfluoreszenz ist 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.
- 26. Welche Aussage zur Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung ist richtig?**
- a. Bei  $\gamma$ -Energien von ca. 100 keV ist die Schwächung stark Z-abhängig.
  - b. Bei der Abschirmung von Röntgenstrahlung ( $E < 100$  keV) kommt es im Wesentlichen auf die Dichte des Absorbers an. Die Ordnungszahl ist weniger wichtig.
  - c. Eine 10 cm dicke Bleischicht ( $\rho_{Pb} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$ ) schwächt  $\gamma$ -Strahlung von  $\sim 1$  MeV etwa gleich stark wie eine 50 cm dicke Betonwand ( $\rho_{Pb} = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ )
  - d. 10 m Wasser entspricht bei  $\gamma$ -Strahlung von  $\sim 1$  MeV etwa 4 m Beton.
  - e. Zur Schwächung von Röntgenstrahlung ist Aluminium besser geeignet als Eisen.



27. Das Isotopenlabor der FHH wird zurzeit saniert. Für den Antrag einer neuen Umgangsgenehmigungen ist folgendes zu prüfen: Im Bestrahlungsbunker soll eine  $^{60}\text{Co}$  Strahlenquelle verwendet, deren Aktivität am Bezugsdatum 9.10.79 mit  $17,02 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$  angegeben wurde. Eine Aktivität von  $1 \text{ GBq}$  des  $^{60}\text{Co}$  erzeugt in einem Abstand von  $1 \text{ m}$  eine Dosisleistung von  $0,354 \text{ mSv h}^{-1}$ . Die Wände des Bunkers bestehen aus verdichtetem Beton ( $\rho_{\text{Beton}} = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ ) und besitzen eine Dicke von  $75 \text{ cm}$ . Die Strahlenschutztür ist  $6,5 \text{ cm}$  dick und enthält eine  $5 \text{ cm}$  dicke Bleiplatten ( $\rho_{\text{pb}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$ ).
- Beschreiben Sie die Zerfallseigenschaften des  $^{60}\text{Co}$  anhand der Zerfallsdaten der Anlage 1.
  - Wie groß ist außerhalb des Raumes, im Abstand von  $10 \text{ cm}$  hinter den Bunkerwänden die maximal zu erwartenden Dosisleistung? Man nehme dazu (konservativ!) an, dass die Gesamtdosis ähnlich geschwächt wird, wie die  $1332 \text{ keV}$   $\gamma$ -Strahlung des  $^{60}\text{Co}$ . Die Quelle soll  $10 \text{ cm}$  vor der Wand positioniert werden.
  - Vergleichen Sie die Schwächungswirkung von Betonwand und Bleitür. Verwenden Sie zur Berechnung der Schwächung in der Tür eine vergleichbar Messgeometrie, wie bei der Bunkerwand (Quelle  $10 \text{ cm}$  vor der Tür, Messpunkt  $10 \text{ cm}$  hinter der Tür).
  - Außerhalb der Bunkerwände soll die Dosisleistung den Grenzwert  $1 \text{ mSv pro Jahr}$  nicht übersteigen. Wie groß wäre die  $^{60}\text{Co}$  Aktivität, die diesen Grenzwert überschreiten würde?
28. In einem Laborversuch wurde die Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung der Energie  $59,5 \text{ keV}$  ( $^{241}\text{Am}$ ) und  $661 \text{ keV}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) in Aluminium untersucht. Nach Abzug des Untergrunds wurden folgende Werte ermittelt:

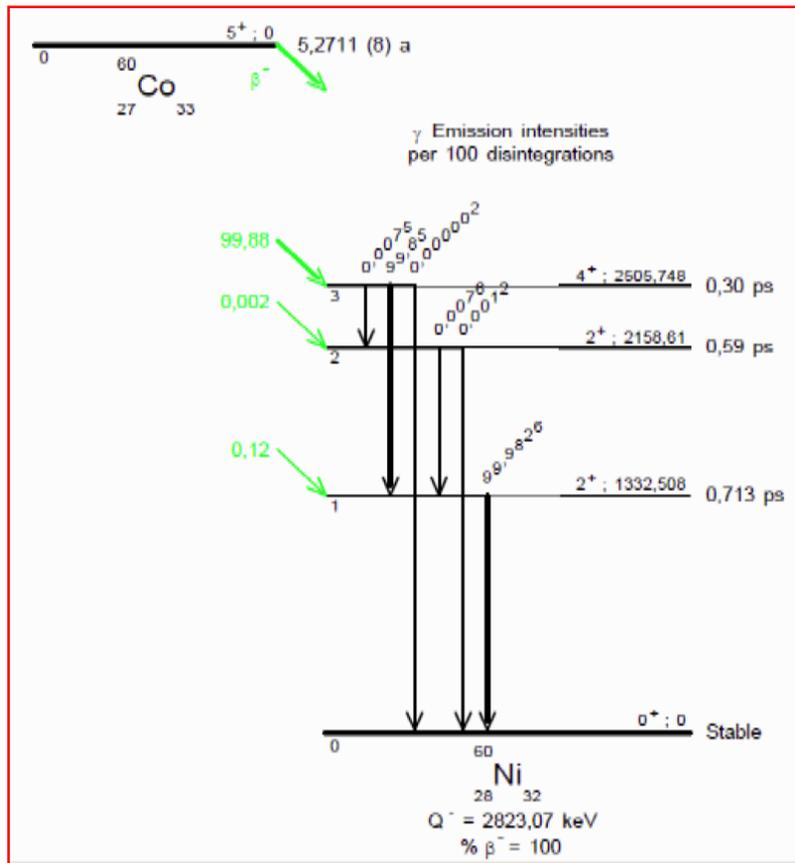
Absorberdicke	$E_\gamma = 661,6 \text{ keV}$	$E_\gamma = 59,5 \text{ keV}$
$x / \text{cm}$	<b>N / 15s</b>	<b>N / 15s</b>
0	24072	2045
4	11006	83

- Berechnen Sie den Schwächungskoeffizienten  $\mu$ , den Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho}$ , die Halbwertsdicke  $d_{1/2}$  und den Gesamtwirkungsquerschnitt  $\sigma_{\text{ges}}$  und vergleichen Sie ihre Ergebnisse mit Literaturwerten (siehe Anlage 2b).
29. Man betrachte die in Aufgabe 27. beschriebene  $^{60}\text{Co}$  Quelle, die am Bezugsdatum 09.10.79 eine gewisse Menge  $^{60}\text{Co}$  Atome enthielt, die eine Aktivität von  $170,2 \text{ GBq}$  erzeugten. Wie viele Atome des  $^{60}\text{Co}$  enthält die Quelle heute am 20.05.10 und wie viele  $^{60}\text{Ni}$  Atome sind seither entstanden?



Anlagen:

1a Zerfallsschema des  $^{60}\text{Co}$ :



Quelle: [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Co-60\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Co-60_tables.pdf)

1b. Tabelle der  $\gamma$ -Linien:

	Energy keV	Photons per 100 disint.
$\gamma_{3,2}(\text{Ni})$	347,14 (7)	0,0075 (4)
$\gamma_{2,1}(\text{Ni})$	826,10 (3)	0,0076 (8)
$\gamma_{3,1}(\text{Ni})$	1173,228 (3)	99,85 (3)
$\gamma_{1,0}(\text{Ni})$	1332,492 (4)	99,9826 (6)
$\gamma_{2,0}(\text{Ni})$	2158,57 (3)	0,0012 (2)
$\gamma_{3,0}(\text{Ni})$	2505,692 (5)	0,0000020 (4)

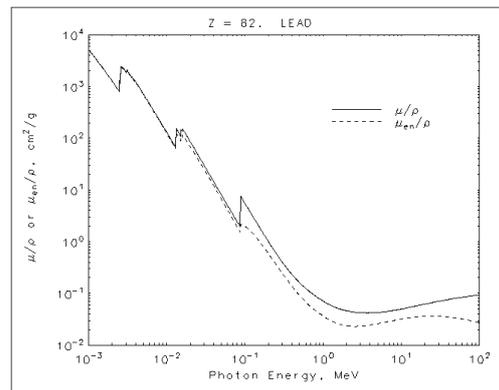
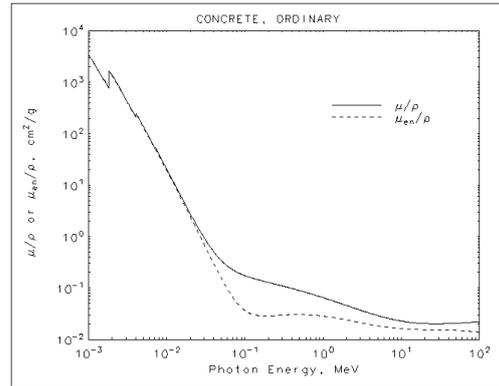
Die Intensitätsangabe "*Photons per 100 disint.*" bezeichnet die "*Zahl der  $\gamma$ -Quanten bezogen auf 100 Zerfälle des  $^{60}\text{Co}$* ".

Quelle: [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Co-60\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Co-60_tables.pdf)



2a. Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient

E / MeV	$(\mu/\rho) / (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	
	Beton	Blei
1,00E-01	1,738E-01	5,549E+00
1,50E-01	1,436E-01	2,014E+00
2,00E-01	1,282E-01	9,985E-01
3,00E-01	1,097E-01	4,031E-01
4,00E-01	9,783E-02	2,323E-01
5,00E-01	8,915E-02	1,614E-01
6,00E-01	8,236E-02	1,248E-01
8,00E-01	7,227E-02	8,870E-02
1,00E+00	6,495E-02	7,102E-02
1,25E+00	5,807E-02	5,876E-02
1,50E+00	5,288E-02	5,222E-02
2,00E+00	4,557E-02	4,606E-02
3,00E+00	3,701E-02	4,234E-02
4,00E+00	3,217E-02	4,197E-02
5,00E+00	2,908E-02	4,272E-02
6,00E+00	2,697E-02	4,391E-02
8,00E+00	2,432E-02	4,675E-02
1,00E+01	2,278E-02	4,972E-02
1,50E+01	2,096E-02	5,658E-02
2,00E+01	2,030E-02	6,206E-02

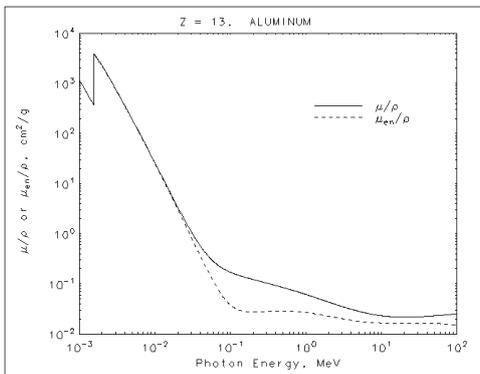


Dichte: Beton (concrete, ordinary)  $\rho_{\text{Beton}} = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\rho_{\text{Blei}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$

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

2b. Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient

Dichte des Aluminiums:  $2,699 \text{ g cm}^{-3}$



Mass Attenuation Coefficient for Aluminium					
Energy (MeV)	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Energy (MeV)	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Energy (MeV)	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
1,00E-03	1,19E+03	3,00E-02	1,13E+00	1,00E+00	6,15E-02
1,50E-03	4,02E+02	4,00E-02	5,69E-01	1,25E+00	5,50E-02
1,56E-03	3,62E+02	5,00E-02	3,68E-01	1,50E+00	5,01E-02
K 1,56E-03	3,96E+03	6,00E-02	2,78E-01	2,00E+00	4,32E-02
2,00E-03	2,26E+03	8,00E-02	2,02E-01	3,00E+00	3,54E-02
3,00E-03	7,88E+02	1,00E-01	1,70E-01	4,00E+00	3,11E-02
4,00E-03	3,61E+02	1,50E-01	1,38E-01	5,00E+00	2,84E-02
5,00E-03	1,93E+02	2,00E-01	1,22E-01	6,00E+00	2,66E-02
6,00E-03	1,15E+02	3,00E-01	1,04E-01	8,00E+00	2,44E-02
8,00E-03	5,03E+01	4,00E-01	9,28E-02	1,00E+01	2,32E-02
1,00E-02	2,62E+01	5,00E-01	8,45E-02	1,50E+01	2,20E-02
1,50E-02	7,96E+00	6,00E-01	7,80E-02	2,00E+01	2,17E-02
2,00E-02	3,44E+00	8,00E-01	6,84E-02		

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#	<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	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 =		
			<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	Si	14	
C	6	32420,666	37557,61	45960#	53281#				32164#	23772#	10754,673	3824,318	-7144,632	P	15	
N	7	21765,11	25251,164	32038,675	38396#	47543#	56504#							S	16	
O	8	8062,906	9284,152	14612,96	19070,4	27442#	35713#	44954#	53850#					Cl	17	
F	9	2793,378	3329,747	7559,527	11272,706	18271,772	24926,86	33226#	40296#	48903#	56289#			Ar	18	
Ne	10	-5154,045	-5951,521	-2108,075	429,611	7069,949	11244,601	18057,881	23102,025	30842#	37278#	45997#	53121#	Na	11	
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#	Mg	12
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#	Al	13
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	Si	14
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	P	15
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	S	16
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	Cl	17
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	Ar	18
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	K	19
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	Ca	20
Ca	20		13153#	4602#	-6439,359	-13161,76	-22059,22	-27274,4	-34846,275	-35137,759	-38547,072	-38408,639	-41468,479	-40811,95	Sc	21
Sc	21			13898#	2841#	-4937#	-14168,021	-20523,228	-28642,392	-32121,239	-36187,929	-37816,093	-41067,792	-41757,115	Ti	22
Ti	22				9101#	1500#	-8850,275	-15700#	-25121,552	-29321,103	-37548,459	-39005,737	-44123,422	-44932,394	V	23
V	23					10330#	-205#	-8169#	-18024#	-24116,38	-31879,629	-37073,013	-42002,051	-44475,385	N =	
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:

**27.a.**  $^{60}\text{Co}$  zerfällt zu 100% durch  $\beta^-$ -Zerfall zum  $^{60}\text{Ni}$ . Die Halbwertszeit beträgt  $T_{1/2} = 5,2711 \text{ a}$ , die Zerfallsenergie  $Q = 2823,07 \text{ keV}$ . Ein relativer Anteil von 99,88% des  $\beta^-$ -Zerfalls führt zum dritten Anregungszustand im  $^{60}\text{Ni}$  mit der Energie 2505,748 keV, ein Anteil von 0,002% zum zweiten Anregungszustand des  $^{60}\text{Ni}$  mit der Energie 2158,61 keV und 0,12% der Zerfallsintensität führt zum ersten Anregungszustand im  $^{60}\text{Ni}$  mit der Energie 1332,508 keV. Ein  $\beta^-$ -Zerfall zum Grundzustand des  $^{60}\text{Ni}$  oder zu anderen Anregungszuständen existiert nicht (jedenfalls nicht nach dem hier angegebenen Zerfallsschema).

Der Anregungsenergie des dritten Anregungszustands des  $^{60}\text{Ni}$  wird zu 99,85% durch eine  $\gamma$ - $\gamma$ -Kaskade mit den Energien von 1173,228 keV und von 1332,492 keV abgestrahlt. Ein Cross-Over-Übergang mit der Energie 2505,692 keV existiert zwar auch, ist aber mit einer relativen Intensität von 0,0000020% kaum nachweisbar. Auch die anderen  $\gamma$ -Übergänge besitzen nur sehr geringe Intensitäten: Der  $\gamma$ -Übergang mit  $E_\gamma = 347,14 \text{ keV}$  vom dritten zum zweiten Anregungszustand hat die Intensität  $I_\gamma = 0,0075\%$ , der Übergang mit  $E_\gamma = 826,10 \text{ keV}$  vom zweiten zum ersten Anregungszustand die Intensität  $I_\gamma = 0,0075\%$  und er Übergang mit  $E_\gamma = 2158,37 \text{ keV}$  vom zweiten Anregungszustand zum Grundzustand hat die Intensität  $I_\gamma = 0,0076\%$ .

**27b.** Zum Bezugszeitpunkt (09.10.79) hatte die Quelle eine Aktivität von 170,2 GBq. Zeitdifferenz zwischen Bezugsdatum und heutigem Datum (20.05.10):

$$\Delta t = 30,6119 \text{ a}$$

Halbwertszeit des  $^{60}\text{Co}$ :  $T_{1/2} = 5,2711 \text{ a}$

Aktivität  $A_1$  am 20.05.10:  $A_1 = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot \Delta t}{T_{1/2}}\right) = 3,039 \text{ GBq}$

Zunächst wird bestimmt, wie groß die Dosisleistung im Messpunkt außerhalb des Bunkers ist, ohne dabei die Schwächung in der Betonwand zu berücksichtigen.

Eine Aktivität  $A_0 = 1 \text{ GBq}$  erzeugt nach Aufgabenstellung in 1 m Abstand die

Dosisleistung:  $\dot{H}_0 = 0,354 \text{ mSv h}^{-1}$ .

Eine Aktivität  $A_1 = 3,039 \text{ GBq}$  erzeugt in 1 m Abstand folglich die Dosisleistung:

$$\dot{H}_1 = 1,076 \text{ mSv h}^{-1}.$$

Der Abstand Quelle - Messpunkt beträgt jedoch nicht 1,00 m, sondern 0,10 m + 0,75 m + 0,10 m = 0,95 m. Da eine Strahlungsintensität, und damit auch eine Dosisleistung,

proportional zu  $\frac{1}{r^2}$  ist, gilt:

$$\dot{H}(r = 0,95 \text{ m}) = \dot{H}(r = 1,00 \text{ m}) \cdot \frac{1,00^2 \text{ m}^2}{0,95^2 \text{ m}^2}$$

Ohne Schwächung beträgt die Dosisleistung im Messpunkt:

$$\dot{H}(r = 0,95 \text{ m}) = 1,192 \text{ mSv h}^{-1}$$

Die Strahlungswechselwirkung mit der Betonbunkerwand zwischen Quelle und Messpunkt verringert die Strahlungsdosis im Messpunkt. Zur Berechnung werden Massenschwächungskoeffizienten für normalen Beton verwendet. (Erläuterung: Normaler Beton besitzt keinen Zusatz von Schwerspat,  $\text{BaSO}_4$ . Dieser wird Barytbeton genannt. Er wird häufig im Strahlenschutz eingesetzt, da er höhere Massenschwächungskoeffizienten besitzt als normaler Beton).



Interpolation von Tabellenwerten für  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{Beton}}$  :

E	ln E	ln(my/rho)	my/rho
keV			cm**2/g
1250	7,13090	-2,84611	0,05807
1500	7,31322	-2,93973	0,05288
1332	7,19444	-2,87873	0,05621

Massenschwächungskoeffizient:  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{Beton}} = 0,05621 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Dichte des Betons:  $\rho_{\text{Beton}} = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$

Schwächungskoeffizient:  $\mu_{\text{Beton}} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{Beton}} \cdot \rho_{\text{Beton}} = 0,12927 \text{ cm}^{-1}$

Wanddicke:  $x_{\text{Wand}} = 75 \text{ cm}$

Schwächung:  $\frac{I(x_{\text{Wand}})}{I_0} = e^{-\mu_{\text{Beton}} \cdot x_{\text{Wand}}} = 6,156 \cdot 10^{-5}$

Dosisleistung mit Berücksichtigung der Schwächung in der Betonwand:

Lösung:  $\dot{H}_{\text{Beton}} = 1,192 \text{ mSv h}^{-1} \cdot 6,156 \cdot 10^{-5} = 73,38 \text{ nSv h}^{-1}$

$\dot{H}_{\text{Beton}} = 0,643 \text{ mSv a}^{-1}$

Die Aktivität  $A_1 = 3,039 \text{ GBq}$  des  $^{60}\text{Co}$  erzeugt (vergl. 27b.) in 1m Abstand die Dosisleistung:

$\dot{H}_1 = 1,076 \text{ mSv h}^{-1}$

In der hier zu betrachtenden Geometrie beträgt der Abstand Quelle - Messpunkt nicht 1,00 m, sondern  $0,10 \text{ m} + 0,065 \text{ m} + 0,10 \text{ m} = 0,265 \text{ m}$ . Da eine Strahlungsintensität, und damit auch eine Dosisleistung, proportional zu  $\frac{1}{r^2}$  ist, gilt:

$\dot{H}(r = 0,95 \text{ m}) = \dot{H}(r = 1,00 \text{ m}) \cdot \frac{1,00^2 \text{ m}^2}{0,265^2 \text{ m}^2}$

Ergebnis für die Dosisleistung im Messpunkt, ohne Berücksichtigung von Schwächung in der Betonwand:

$\dot{H}(r = 0,95 \text{ m}) = 15,319 \text{ mSv h}^{-1}$

Die Tür zwischen Quelle und Messpunkt verringert die Strahlungsdosis im Messpunkt. als (konservative) Abschätzung soll nur die Schwächung in der 5 cm dicken Blei Schicht der Tür betrachtet werden.

Interpolation:

E	ln E	ln(my/rho)	my/rho
keV			cm**2/g
1250	7,13090	-2,83429	0,05876
1500	7,31322	-2,95229	0,05222
1332	7,19444	-2,87541	0,05639

Interpolationswert:  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{Blei}} = 0,05639 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

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



Schwächungskoeffizient:  $\mu_{\text{Blei}} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{Blei}} \cdot \rho_{\text{Blei}} = 0,63724 \text{ cm}^{-1}$

Wanddicke:  $x_{\text{Tür}} = 5 \text{ cm}$

Schwächung:  $\frac{I(x_{\text{Tür}})}{I_0} = e^{-\mu_{\text{Blei}} \cdot x_{\text{Tür}}} = 4,133 \cdot 10^{-2}$

Dosisleistung mit Berücksichtigung der Schwächung in der Betonwand:

Lösung:  $\dot{H}_{\text{Tür}} = 15,319 \text{ mSv h}^{-1} \cdot 4,133 \cdot 10^{-2} = 633,13 \mu\text{Sv h}^{-1}$   
 $\dot{H}_{\text{Tür}} = 5,5 \text{ Sv a}^{-1}$

**27c.** Bei einer ganzjährigen, 24stündigen Betriebszeit im Bestrahlungsraum mit einer Quellenposition vor einer der Bunkeraußenwände und dauerndem Aufenthalt einer Person hinter der Bunkerwand, lägen die jetzt abgeschätzten Dosiswerte bereits dicht am Grenzwert von 1 mSv pro Jahr.

Dosisleistung mit Berücksichtigung der Schwächung in der Betonwand:

Dosisleistung nach **27.a**:  $\dot{H}_{\text{Beton}} = 1,192 \text{ mSv h}^{-1} \cdot 5,15610^{-5} = 73,38 \text{ nSv h}^{-1}$   
 $\dot{H}_{\text{Beton}} = 0,643 \text{ mSv a}^{-1}$

Bereits ab einem Dosiswert, der um den Faktor  $\frac{1 \text{ mSv}}{0,643 \text{ mSv}} = 1,55$  größer als die Aktivität

$A_1$  am Bezugsdatum 20.05.10 wäre:  $A_1 = 3,039 \text{ GBq}$

Bei einer Aktivität von  $A_2 = 1,55 \cdot 3,039 \text{ GBq} = 4,726 \text{ GBq}$  würde der Grenzwert überschritten werden.

**(Bem.:** Natürlich können auch Bestrahlungen mit größeren Aktivitäten in dem Bestrahlungsraum durchgeführt werden. Man kann die Einhaltung der Grenzwerte erreichen auch durch Beschränkungen der Betriebszeiten erreichen.)

**28.** Für die  $\gamma$ -Strahlung der Energie 59,5 keV gilt:

Schwächungskoeffizient:  $\mu = -\frac{\ln \frac{I_1}{I_0}}{\Delta x} = -\frac{\ln \frac{83}{2045}}{4 \text{ cm}} = 0,8011 \text{ cm}^{-1}$

Halbwertsdicke:  $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = 0,865 \text{ cm}$

Massenschwächungskoeffizient:  $\frac{\mu}{\rho} = \frac{0,8011 \text{ cm}^{-1}}{2,699 \text{ g cm}^{-3}} = 0,297 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Interpolation:

Massenschwächungskoeffizient für Aluminium			
Tabellenwerte		Interpolierter Wert	
E / MeV	(mü/rho) cm**2 g**-1	Ex / MeV	(mü/rho) cm**2 g**-1
5,00E-02	3,68E-01	5,95E-02	2,82E-01
6,00E-02	2,78E-01		

Interpolation:  $\frac{\mu}{\rho} = 0,282 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Relative Abweichung von experimentellem und theoretischem Wert: 5,2%.



Wirkungsquerschnitt: 
$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{26,982 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,297 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) = 13,3 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 13,3 \text{ b}$$

**Für die  $\gamma$ -Strahlung der Energie 661,6 keV gilt:**

Schwächungskoeffizient: 
$$\mu = -\frac{\ln \frac{I_1}{I_0}}{\Delta x} = -\frac{\ln \frac{11006}{24072}}{4 \text{ cm}} = 0,1957 \text{ cm}^{-1}$$

Halbwertsdicke: 
$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = 3,54 \text{ cm}$$

Massenschwächungskoeffizient: 
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{0,1957 \text{ cm}^{-1}}{2,699 \text{ g cm}^{-3}} = 0,0725 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Massenschwächungskoeffizient für Aluminium			
Tabellenwerte		Interpolierter Wert	
E / MeV	(mü/rho) cm**2 g**-1	Ex / MeV	(mü/rho) cm**2 g**-1
6,00E-01	7,80E-02	6,62E-01	7,46E-02
8,00E-01	6,84E-02		

Aus der Tabelle erhält man: 
$$\frac{\mu}{\rho} = 0,0746 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Relative Abweichung von experimentellem und theoretischem Wert: 2,9%.

Wirkungsquerschnitt: 
$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{26,982 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,0725 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) = 3,24 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 3,2 \text{ b}$$

29. Zum Bezugszeitpunkt (09.10.79) hatte die Quelle eine Aktivität von 170,2 GBq. Die Zahl der  $^{60}\text{Co}$  Atome betrug:

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

$$N_0 = -\frac{-170,2 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1} \cdot 5,2711 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s}}{\ln 2}$$

$$N_0 = 4,0845 \cdot 10^{19}$$

Zum aktuellen Datum (20.05.10) besitzt die Quelle eine Aktivität von 3,039 GBq. Die Zahl der  $^{60}\text{Co}$  Atome hat deshalb auf:

$$N_1 = -\frac{-3,039 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1} \cdot 5,2711 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s}}{\ln 2}$$

$$N_1 = 7,210 \cdot 10^{17}$$

Die Zahl der in dieser Zeit neu entstandenen  $^{60}\text{Ni}$  Atome beträgt:

$$\Delta N = N_0 - N_1 = 4,012 \cdot 10^{19}$$

Die Masse des neu gebildeten Nickel beträgt:

$$m = \frac{\Delta N \cdot A_{rel}}{N_A} = \frac{4,012 \cdot 10^{19} \cdot 60 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cong 4,0 \text{ mg}$$

