

- 1 a.** Was sind Atome? Woraus bestehen Atome? Wie groß sind Atome? Wie groß sind Atomkerne?
- b.** Was sind "schwarze Körper"? Beschreiben Sie das Strahlungsspektrum von „schwarzen Körpern“? Beschreiben Sie das Strahlungsspektrum aus Gasentladungsröhren?
- c.** Was versteht man unter dem Photoeffekt? Wie deutet man den Photoeffekt nach Einstein? Wie groß ist der Frequenzbereich, wie groß der Photonenenergiebereich des sichtbaren Lichts (Wellenlängenbereich 400 nm (violett) bis 700 nm (rot))?
- 2 a.** Beschreiben Sie Eigenschaften (Besonderheiten und Unterschiede) von α -, β -, γ - und Röntgenstrahlung. Welche Reaktionsgleichungen beschreiben die Kernumwandlungen, die α - bzw. β -Strahlung freisetzen?
- b.** Was ist eine Elektroneneinfangsreaktion (EC)? Welche Strahlungsarten werden beim EC frei?
- c.** Betrachten Sie den Ausschnitt der Nuklidkarte in Abb. 1: Die Nuklide ${}^8\text{Be}$ und ${}^9\text{B}$ existieren nicht, weil sie spontan zerfallen. Welche Bruchstücke entstehen dabei? Welche Reaktionsgleichung beschreibt den Zerfallsprozess und wie viel Energie wird dabei frei.
- d.** Welche Nuklide (siehe Abb 2.) gehören (1) zur selben Isobarenreihe, (2) zur selben Isotopenreihe und (3) zur selben Isotonenreihe wie ${}^{40}\text{K}$?
- e.** Was bezeichnet man in der Medizin als PET-Diagnostik? Man verwendet dazu die Radionuklide ${}^{11}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$ und ${}^{18}\text{F}$. Welche Zerfalleigenschaften benutzt man?
- f.** Zur Herstellung der in **2e.** genannten Radionuklide verwendet man Ionenbeschleuniger (z. B. ein Zyklotron). Beispiel: ${}^{13}\text{N}$ entsteht beim Beschuss von ${}^{16}\text{O}$ mit ${}^1\text{H}$ -Ionen. Wie lautet die Reaktionsgleichung und wie groß ist der Reaktions-Q-Wert?
- g.** Welche Uranisotope gibt es in der Natur? Welches Uran-Isotop wird als Spaltstoff in Kernreaktoren verwendet? Gibt es Isotope anderer Elemente, die ebenfalls als Spaltstoff verwendet werden können?
- 3.** In der Kernfusionstechnik versucht man durch Verschmelzen leichter Atomkerne Energie zu erzeugen. Ein Beispiel für Fusionsreaktionen ist die Verschmelzung von Deuterium mit Tritium, bei der ${}^4\text{He}$ als eines der Endprodukte entsteht.
- a.** Stellen Sie für die Reaktionsgleichung auf.
- b.** Berechnen Sie die frei werdende Energie pro Reaktion.
- c.** Im Jahr 2000 betrug die Stromproduktion weltweit 15 400 Mrd. kWh (= $15,4 \cdot 10^{15}$ Wh). Welche Masse an Deuterium und Tritium würde benötigt, wenn man sie ausschließlich mit Kernfusion erzeugen könnte?
- d. Zusatzaufgabe optional:** Zur Zeit wird weltweit 64% der elektrischen Energie aus fossilen Brennstoffen gedeckt. Schätzen Sie die Masse der CO_2 Emission, unter der Annahme, dass pro CO_2 Molekül 4,1 eV frei wird.
(Zur Vereinfachung können Sie den Wirkungsgrad der Kraftwerke pauschal mit 50% abschätzen.)
- 4 a.** Erläutern Sie (kurz) das in Abb. 4 gezeigte Zerfallsschema von ${}^{40}\text{K}$.
- b.** Welche Aktivität besitzt ein Sack mit 50 kg Kalidünger der Sorte Kali 60% (die K_2O zu 60% enthält).
- c.** Bei guter Transportlogistik kann das Radionuklid ${}^{18}\text{F}$ für die PET-Diagnose bis zu 1000 km transportiert werden. Nehmen Sie an, dass ein Transport drei Stunden dauert, und dass einschließlich der Zerfallsverluste während der Untersuchung 500 MBq pro Patient benötigt werden. Welche Aktivität muss für zehn Patienten bestellt werden?
- d.** Eine nuklearmedizinische Untersuchung (z. B. des Herzens) erfordert 100 MBq des Radionuklids ${}^{201}\text{Tl}$. Das Element Thallium ist chemisch stark toxisch. Die tödliche Dosis für einen Erwachsenen beträgt 800 mg. Ist die Masse des verabreichten Radiopharmakons kritisch?

Karlsruher Nuklidkarte 1995

Abb. 1. Ausschnitt aus der Nuklidkarte Z = 1 - 14

Abb. 1. Ausschnitt aus der Nuklidkarte Z = 1 - 14

Abb. 2. Ausschnitt aus der Nuklidkarte Z = 15 - 21

Abb. 2. Ausschnitt aus der Nuklidkarte Z = 15 - 21

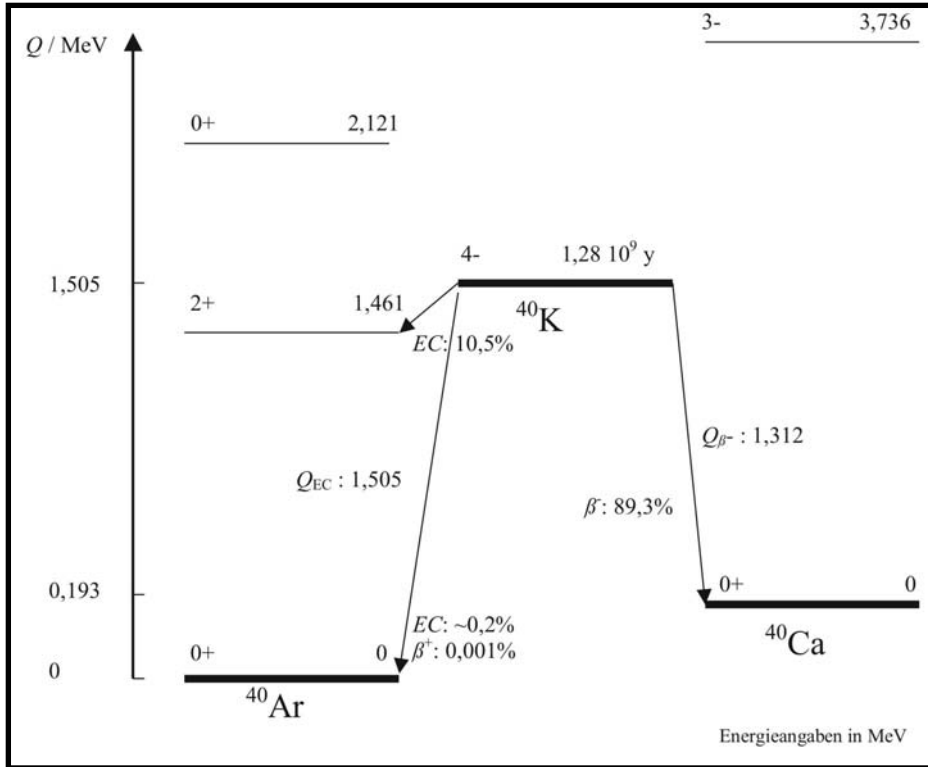


Abb. 5 Zerfallsschema des ^{40}K

Konstanten
Constants

Const
Const

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

c	299792458 m s ⁻¹	Lichtgeschwindigkeit Speed of light	Vitesse de la lumière Velocidad de la luz
$\hbar = h/2\pi$	6,6260755 (40) · 10 ⁻³⁴ J s 1,05457266 (63) · 10 ⁻³⁴ J s	Planck-Konstante Planck constant	Constante de Planck Constante de Planck
u = 1/N _A	1,6605402 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3149432 (28) · 10 ⁻² MeV	Atomare Masseneinheit Atomic mass unit	Unité de masse atomique Unidad de masa atómica
M _n = N _A · m _n m _n m _n	1,008664904 (14) u 1,6749286 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3956563 (28) · 10 ⁻² MeV	Ruhemasse des Neutrons Neutron rest mass	Masse au repos du neutron Masa en reposo del neutrón
M _p = N _A · m _p m _p m _p	1,007276470 (12) u 1,6726231 (10) · 10 ⁻²⁷ kg 9,3827231 (28) · 10 ⁻² MeV	Ruhemasse des Protons Proton rest mass	Masse au repos du proton Masa en reposo del protón
M _e = N _A · m _e m _e m _e	5,48579903 (13) · 10 ⁻⁴ u 9,1093897 (54) · 10 ⁻³¹ kg 0,51099906 (15) MeV	Ruhemasse des Elektrons Electron rest mass	Masse au repos de l'électron Masa en reposo del electrón
e	1,60217733 (49) · 10 ⁻¹⁹ C 4,8032068 (15) · 10 ⁻¹⁰ esu	Elementarladung Elementary charge	Charge élémentaire Carga elemental
e/m _e	1,75881962 (53) · 10 ¹¹ C kg ⁻¹ 5,2728086 (16) · 10 ¹¹ esu g ⁻¹	Spezifische Elektronenladung Specific electron charge	Charge massique de l'électron Carga específica del electrón
$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$	2,81794092 (38) · 10 ⁻¹⁵ m	Elektronenradius Electron radius	Rayon de l'électron Radio del electrón
a ₀	5,29177249 (24) · 10 ⁻¹¹ m	Bohr-Radius Bohr radius	Rayon de Bohr Radio de Bohr
α	7,29735308 (33) · 10 ⁻³	Feinstruktur-Konstante Fine structure constant	Constante de la structure fine Constante de estructura fina
R _∞	1,0973731534 (13) · 10 ⁷ m ⁻¹	Rydberg-Konstante Rydberg constant	Constante de Rydberg Constante de Rydberg
N _A	6,0221367 (36) · 10 ²³ mol ⁻¹	Avogadro-Konstante Avogadro constant	Constante d'Avogadro Constante de Avogadro
V _m	2,241410 (19) · 10 ⁻² m ³ mol ⁻¹	Molvolumen eines idealen Gases unter Normalbedingungen Molar volume of an ideal gas at s. t. p.	Volumen molare d'un gaz parfait aux conditions normales Volumen molar de un gas ideal en condiciones normales
R	8,314510 (70) J mol ⁻¹ K ⁻¹ 8,314510 (70) · 10 ⁷ erg mol ⁻¹ K ⁻¹	Universelle Gaskonstante Molar gas constant	Constante molaire des gaz Constante universal de los gases
k = R/N _A	1,380658 (12) · 10 ⁻²³ J K ⁻¹ 8,617385 (73) · 10 ⁻⁵ eV K ⁻¹	Boltzmann-Konstante Boltzmann constant	Constante de Boltzmann Constante de Boltzmann
F = N _A · e	9,6485309 (29) · 10 ⁴ C mol ⁻¹ 2,89255680 (87) · 10 ⁴ esu mol ⁻¹	Faraday-Konstante Faraday constant	Constante de Faraday Constante de Faraday

1 Ci = 3,7 · 10 ¹⁰ Bq	Zerfälle s ⁻¹ Disintegrations s ⁻¹ Désintégrations s ⁻¹ Desintegraciones s ⁻¹	(see also inside back cover)	1 μA = 6,2415064 · 10 ¹² e s ⁻¹ 1 eV/Atom ≈ 23 kcal mol ⁻¹ 1 MeV Ci ≈ 5,93 · 10 ⁻³ W 1 W ≈ 169 MeV Ci
1 W ≈ 3,1 · 10 ¹⁰	Spaltungen s ⁻¹ Fissions s ⁻¹ Fissions s ⁻¹ Fisiones s ⁻¹		π = 3,141593 e = 2,718282 lg e = 0,434294 ln 10 = 2,302585 ln 2 = 0,693147
1 MWd ≈ 2,7 · 10 ²¹	Spaltungen Fissions ≈ 1 g Fissions Fisiones	spaltbares Material fissionable material matière fissible material fisil	

Lösungen:

1a. Atome: Kleinste Bestandteile, in die Elemente mit chemischen Methoden zerlegt werden können. **Bestandteile:** *Hülle* und *Kern*; *Hülle* besteht aus Elektronen in diskreten Energiezuständen, *Kern* besteht aus Protonen und Neutronen. **Atomgröße:** zwischen 0,06 nm und 0,26 nm; näherungsweise $\sim 0,1$ nm; **Atomkerngröße:** Radius $R = r_0 \cdot A^{1/3}$ mit $r_0 = 1,3$ fm = $1,3 \cdot 10^{-15}$ m; näherungsweise ~ 10 fm = 10^{-5} nm.

1b. "Schwarze Körper": Ein Körper, der alle einfallende Strahlung absorbiert und nur Wärmestrahlung aussendet wird als "schwarz" bezeichnet. Das Spektrum ist kontinuierlich und die Intensität und die Lage des Strahlungsmaximums sind ausschließlich temperaturabhängig. (Beispiele: Sonnenoberfläche, näherungsweise Glühlampe und Heizstrahler.) Im Gegensatz dazu besitzt das Spektrum einer **Gasentladungsröhre** diskrete Spektrallinien, die von der elementaren Zusammensetzung des Gases abhängen.

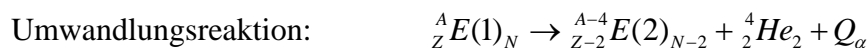
1c. Photoeffekt: Eine elektromagnetische Welle überträgt ihre *gesamte Energie* auf *ein Elektron*. Die Elektronenenergie ist proportional zu Frequenz, die Zahl der Elektronen proportional zur Intensität der elektromagnetischen Strahlung. Nach Einstein wird der elektromagnetischen Strahlung *Teilcheneigenschaft* zugeordnet. Die Teilchen nennt man *Photonen*. Die Energie der

$$\text{Photonen ist } E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

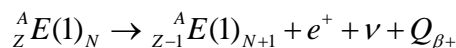
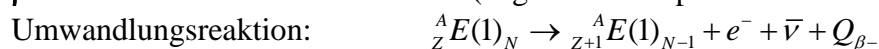
Sichtbares Licht:

violett - $\lambda = 400$ nm	$\nu = 7,5 \cdot 10^{14}$ Hz	$E = 5,0 \cdot 10^{-19}$ J = 3,1 eV
rot - $\lambda = 700$ nm	$\nu = 4,3 \cdot 10^{14}$ Hz	$E = 1,8 \cdot 10^{-19}$ J = 1,8 eV

2a. α -Teilchen: ${}^4_2\text{He}_2$ Kern bzw. ${}^4_2\text{He}_2^{++}$ - Ion wird aus dem Atomkern ausgesandt.

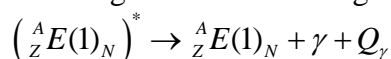


β -Teilchen: Elektron oder Positron (negatives oder positives Elektron)



γ -Strahlung und Röntgenstrahlung: Elektromagnetische Wellenstrahlung, meist sehr großer Frequenz (besonders γ -Strahlung, Röntgenstrahlung meist weniger großer Frequenz), die aus diesem Grund sehr ausgeprägte Teilcheneigenschaft (Photon) besitzt.

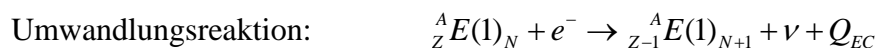
Für γ -Strahlung kann man formal die folgende Umwandlungsreaktion aufstellen:



2b. EC-Elektroneneinfang: EC-ist die Alternative zum β^+ -Zerfall. Da für die Bildung eines Positrons (Antimaterie) eine Energie vom zweifachen der Elektronenruhemasse

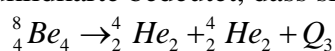
$2 \cdot m_e = 2 \cdot 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$ erforderlich ist, ist der β^+ -Zerfall nicht möglich, wenn die Energiedifferenz zwischen Ausgangs- und Endzustand kleiner als 1022 keV ist. Alternativ kann

eines der Hüllenelektronen (am häufigsten das K-Elektron der innersten Schale) eingefangen werden.



2.c. Massenzahl 8:

Die Information "2 α " in der Nuklidkarte bedeutet, dass sich ${}^8\text{Be}$ spontan in zwei ${}^4\text{He}$ -Kerne zerlegt.



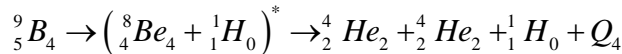
$$Q_3 = m_{\text{exc}} \left({}^8_4\text{Be}_4 \right) \cdot c^2 - 2 \cdot m_{\text{exc}} \left({}^4_2\text{He}_2 \right) \cdot c^2$$

$$Q_3 = (4941,66 - 2 \cdot 2424,91) \text{ keV}$$

$$Q_3 = 91,84 \text{ keV}$$

Massenzahl 9:

Die Information "p" in der Nuklidkarte bedeutet, dass ${}^9\text{B}$ zunächst spontan unter Aussendung eines Protons in ${}^8\text{Be}$ zerfällt, und da das ${}^8\text{B}$, wie oben gezeigt, ebenfalls instabil ist, entstehen insgesamt zwei ${}^4\text{He}$ Kerne und ein Proton..



$$Q_4 = m_{\text{exc}}({}^9_5\text{B}_4) \cdot c^2 - (2 \cdot m_{\text{exc}}({}^4_2\text{He}_2) \cdot c^2 + m_{\text{exc}}({}^1_1\text{H}_0) \cdot c^2)$$

$$Q_4 = (12415,81 - 2 \cdot 2424,91 + 7288,97) \text{ keV}$$

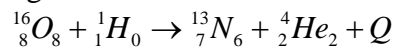
$$Q_4 = 277,02 \text{ keV}$$

- 2d. (1) Isobarenreihe A = 40: ${}^{40}_{21}\text{Sc}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, ${}^{40}_{17}\text{Cl}$, ${}^{40}_{16}\text{S}$
(2) Isotopenreihe K: ${}^{37}_{19}\text{K}$, ${}^{38}_{18}\text{Ar}$, ${}^{39}_{17}\text{Cl}$, ${}^{40}_{16}\text{S}$, ${}^{41}_{15}\text{P}$, ${}^{42}_{14}\text{Si}$, ${}^{43}_{13}\text{Al}$, ${}^{44}_{12}\text{Mg}$, ${}^{45}_{11}\text{Na}$, ${}^{46}_{10}\text{Ne}$,.....
(3) Isotonenreihe N = 21: ${}^{37}_{16}\text{S}$, ${}^{38}_{17}\text{Cl}$, ${}^{39}_{18}\text{Ar}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$, ${}^{41}_{20}\text{Ca}$, ${}^{42}_{21}\text{Sc}$,.....
(natürlich ist auch eine weniger ausführliche Auflistung ausreichend)

2e. PET - Positronen-Emissions-Tomographie

Die Radionuklide ${}^{11}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$ und ${}^{18}\text{F}$ sind reine Positronenemitter mit kurzer Halbwertszeit. Die Radionuklide werden den Patienten in Form spezieller chemischer Verbindungen injiziert. Die Positronen werden im Körper in der näheren Umgebung (~ 1 cm) des Orten, an dem das Radionuklid zerfällt, gestoppt und anschließend zusammen mit einem Elektron annihiliert (= zerstrahlt). Es entstehen zwei Photonen der Energie 511 keV. Die beiden Photonen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit unter einem Winkel von 180° emittiert, und können sehr selektive mit Hilfe der Koinzidenztechnik nachgewiesen werden. Das Verfahren ermöglicht die Lokalisierung einer im Körper angereicherten Aktivität mit hoher Ortsauflösung. Die kurze Halbwertszeit der Radionuklide ist vorteilhaft zur Vermeidung unnötiger Strahlungsdosis, erfordert aber, dass die Radionuklid nicht weit entfernt vom Anwendungsort produziert werden muss.

- 2f. Reaktionsgleichung zur Erzeugung von ${}^{13}\text{N}$ aus Beschuss von ${}^{16}\text{O}$ mit ${}^1\text{H}$ -Ionen:



$$Q = [m({}^{16}_8\text{O}_8) + m({}^1_1\text{H}_0) - m({}^{13}_7\text{N}_6) - m({}^4_2\text{He}_2)] \cdot c^2$$

$$Q = [m_{\text{exc}}({}^{16}_8\text{O}_8) + m_{\text{exc}}({}^1_1\text{H}_0) - m_{\text{exc}}({}^{13}_7\text{N}_6) - m_{\text{exc}}({}^4_2\text{He}_2)] \cdot c^2$$

$$Q = [-4737 + 7289 - 5345 - 2425] \text{ keV}$$

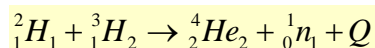
$$Q = -5218 \text{ keV} \text{ wird benötigt.}$$

- 2g. Uranisotope: ${}^{234}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$.
Spaltstoff: ${}^{235}\text{U}$

Die Isotope ${}^{234}\text{U}$, und ${}^{238}\text{U}$ gehören zur Menge der gg-Kerne. Spaltstoffe für Kernreaktoren mit thermischen Neutronen müssen ug-Kerne sein. Nach dem Einfang eines Neutrons durch einen ug-Kern entsteht ein gg-Kern, der wegen der frei werdenden Paarungsenergie eine große Anregungsenergie besitzt. Die Anregungsenergie verhilft dem Zwischenkern über die Spaltbarriere.

Andere Spaltstoffe sind: ${}^{239}\text{Pu}$

3a. Deuterium + Tritium:



3b. Reaktionsenergie:

$$Q = [m({}^2_1\text{H}_1) + m({}^3_1\text{H}_2) - m({}^4_2\text{He}_2) - m({}^1_0\text{n}_1)] \cdot c^2$$

$$Q = [m_{\text{exc}}({}^2_1\text{H}_1) + m_{\text{exc}}({}^3_1\text{H}_2) - m_{\text{exc}}({}^4_2\text{He}_2) - m_{\text{exc}}({}^1_0\text{n}_1)] \cdot c^2$$

$$Q = [13136 + 14950 - 2425 - 8071] \cdot keV$$

$$Q = 17,6 \cdot MeV$$

3c. Elektrische Energie:

$$E_{el} = 15400 \cdot 10^9 kWh = 1,54 \cdot 10^4 \cdot 10^9 \cdot 10^3 \cdot 3600 Ws$$

$$E_{el} = 1,54 \cdot 10^4 \cdot 10^9 \cdot 10^3 \cdot 3600 Ws = 5,5 \cdot 10^{19} Ws$$

Gesamtenergie:

$$E_{ges} = \frac{1}{\eta} \cdot 5,5 \cdot 10^{19} Ws = 2 \cdot 5,5 \cdot 10^{19} Ws = 1,1 \cdot 10^{20} Ws$$

Es gilt:

$$1 eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J \text{ oder } 1 J = 6,242 \cdot 10^{18} eV$$

$$E_{ges} = 1,1 \cdot 10^{20} \cdot 6,24 \cdot 10^{18} eV = 6,9 \cdot 10^{38} eV$$

Zahl Fusionen:

$$N_{ges} = \frac{E_{ges}}{17,6 MeV} = \frac{6,9 \cdot 10^{38} eV}{17,6 \cdot 10^6 eV} = 3,9 \cdot 10^{31}$$

Masse Deuterium:

$$m_{ges}({}^2H) = N_{ges} \frac{A_r({}^2H)}{N_A} = 3,9 \cdot 10^{31} \cdot \frac{2 g}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,29 \cdot 10^8 g$$

$$m_{ges}({}^2H) = 129 \cdot 10^6 g = 129 t$$

Masse Tritium:

$$m_{ges}({}^3H) = \frac{3}{2} \cdot 129 \cdot 10^6 g = 194 t$$

3c. Gesamte Energie, die bei einem Wirkungsgrad von 50% zur Erzeugung der gesamten elektrischen Energie der Welt benötigt wird: $E_{ges} = 1,1 \cdot 10^{20} Ws$

Anteil fossiler Energie:

$$E_{ges,f} = 0,64 \cdot 1,1 \cdot 10^{20} Ws = 0,7 \cdot 10^{20} Ws$$

$$E_{ges,f} = 0,7 \cdot 10^{20} \cdot 6,24 \cdot 10^{18} eV = 4,4 \cdot 10^{38} eV$$

Zahl der CO₂ Moleküle:

$$N_{ges} = \frac{E_{ges,f}}{4,1 eV} = \frac{4,4 \cdot 10^{38} eV}{4,1 eV} = 1,1 \cdot 10^{38}$$

Masse CO₂:

$$m_{ges}(CO_2) = N_{ges} \frac{A_r(CO_2)}{N_A} = 1,1 \cdot 10^{38} \cdot \frac{44 g}{6,02 \cdot 10^{23}} = 8,0 \cdot 10^{15} g$$

$$m_{ges}(CO_2) = 8 \cdot 10^9 \cdot 10^6 g = 8 Gt = 8 Mrd. t$$

4a. ⁴⁰K zerfällt durch β⁻ in ⁴⁰Ca und durch EC/β⁺-Zerfall in ⁴⁰Ar um. Die Halbwertszeit beträgt 1,28 10⁹ y, ein Wert, der vergleichbar ist mit dem Alter Erde. Damit gehört ⁴⁰K zu den primordialen Elementen (Elementen, die seit Entstehung der Erde vorhanden sind). 89,3% der Zerfälle führen über β⁻-Zerfall in den Grundzustand von ⁴⁰Ca. 10,5% wandeln sich durch EC in einen Anregungszustand des ⁴⁰Ar bei der Energie 1,46 MeV um, der anschließend durch Aussendung einer γ-Strahlung der Energie von 1,46 MeV in den Grundzustand übergeht. Ein kleiner Anteil der EC/β⁺-Zerfälle (EC: 0,2%, β⁺: 0,001%) führt zum Grundzustand des ⁴⁰Ar. Pro Zerfall des ⁴⁰K werden also 0,105 γ-Quanten ausgesandt.

4b. Der 50 kg Sack Kalidünger soll zu 60% aus K₂O bestehen, also beträgt die K₂O Masse 30 kg. Die Massenanteil des Kaliums beträgt:

$$\frac{2 \cdot A_r(K)}{2 \cdot A_r(K) + 1 \cdot A_r(O)} = \frac{2 \cdot 39,0983}{2 \cdot 39,0983 + 1 \cdot 15,994} = 0,8302$$

Gesamtmasse Kalium: $m(K) = 0,8303 \cdot 30\text{kg} = 24,91\text{kg}$

Gesamtmasse ^{40}K : $m(^{40}\text{K}) = 0,000117 \cdot 24,91\text{kg} = 2,914\text{g}$

Zahl der ^{40}K Atome: $N(^{40}\text{K}) = N_A \frac{2,914\text{g}}{40\text{g}} = 4,4 \cdot 10^{22}$

Aktivität: $A = -\lambda \cdot N = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N$

$$A = -\frac{\ln 2 \cdot 4,4 \cdot 10^{22}}{1,28 \cdot 10^9 \cdot 365,25 \cdot 86400\text{s}} = -7,55 \cdot 10^5\text{ s}^{-1}$$

$$A = 755\text{ kBq}$$

4c. Radioaktives Zerfallsgesetz: $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Benötigte Aktivität A_0 für einen Patient:

$$A_0 = A(t) \cdot e^{+\lambda t} = 500 \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{\ln 2 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 60\text{s}}{109,7 \cdot 60\text{s}}} = 1,56 \cdot 10^9\text{ Bq}$$

$$A_0 = 1,56\text{ GBq}$$

Gesamtmenge: $A_{0,\text{ges}} = 15,6\text{ GBq}$

4d. Differentielles Zerfallsgesetz: $A(t) = -\lambda \cdot N = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{N_A \cdot m}{A_r(^{201}\text{Tl})}$

$$m = -\frac{T_{1/2} \cdot A_r(^{201}\text{Tl})}{\ln 2 \cdot N_A} \cdot A$$

Für $A = -100 \cdot 10^6\text{ s}^{-1}$ $m = \frac{73,1 \cdot 60 \cdot 60\text{ s} \cdot 201\text{ g mol}^{-1}}{\ln 2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}} \cdot 10^8\text{ g}$

$$m = 1,26 \cdot 10^{-8}\text{ g}$$