

Aufgabe 1.

Massendefekt und Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Hahn stellte bei der Bestrahlung von Uran mit Neutronen fest, dass sich Barium-139 und Krypton-95 bildeten. Heute ist bekannt, dass dies durch die Spaltung von Uran-235 geschieht, das zunächst ein Neutron aufnimmt und sich anschließend in zwei leichtere Atomkerne aufspaltet.



Um zu verstehen, wie bei der Kernspaltung Energie „frei“ wird, muss man die Massen betrachten.

- A. Vergleiche die Massen auf der linken und auf der rechten Seite der Reaktionsgleichung (Voraussetzung: Aufgabe 1 wurde richtig gelöst!) mit Hilfe eines Taschenrechners und gib die Differenz an (7 Nachkommastellen).

Baustein	${}^{235}_{92}\text{U}$	${}_0^1\text{n}$	${}^{139}_{56}\text{Ba}$	${}^{95}_{36}\text{Kr}$
Masse in kg	$3,9029967 \cdot 10^{-25}$	$1,6749275 \cdot 10^{-27}$	$2,3066377 \cdot 10^{-25}$	$1,5765121 \cdot 10^{-25}$

- B. Die Massendifferenz wird vollständig in Energie umgewandelt, die Energiemenge kann man mit EINSTEINS berühmter Gleichung $E = m \cdot c^2$ berechnen. Rechne die Energie aus, die bei der Spaltung eines Atoms entsteht). (nach dem obigen Prinzip)
- C. 1g Uran-235 enthält rund $2,6 \cdot 10^{21}$ Atome. Berechne die in 1g Uran-235 enthaltene Energie und vergleiche mit dem Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland (in 2018 rund $1,3 \cdot 10^{16}$ J).
- D. Wie viele Liter Benzin müsste man verbrennen, um die gleiche Energiemenge freizusetzen, wie sie bei der Spaltung von 1 g Uran-235 entsteht?
(Hinweis: Der „Netto“-Heizwert von Benzin beträgt ca. 42,4 MJ pro Kilogramm.
Die Dichte von Benzin $D = 0,74$ kg/L)

Aufgabe 2. Natürliche Strahlenbelastung durch Radon-222

Ein wesentlicher Teil der natürlichen Strahlenbelastung ist auf das Einatmen des radioaktiven Edelgases Radon-222 zurückzuführen. Im Durchschnitt absorbiert man auf diese Weise in Deutschland 4,1 mJ an Strahlungsenergie im Jahr.

- A. Welchen Ursprung hat das Radon-222? Welches Organ ist davon besonders betroffen? Begründe.
- B. Radon-222 ist ein α -Strahler. Stelle die Kernreaktionsgleichung für den Zerfall auf.
- C. Berechne die jährliche Energiedosis für eine Person mit einer Masse von 75 kg.
- D. Berechne die zugehörige jährliche Äquivalentdosis in mSv. Die durchschnittliche natürliche Strahlenbelastung in Deutschland beträgt 2mSv. Welchen Anteil hat das Einatmen von Radon daran?

Aufgabe 3 NIKOTIN

Der Tabak von Zigaretten enthält neben zahlreichen schädlichen Substanzen auch das radioaktive Polonium-210 (α -Strahler). Der Lungenkrebs von Rauchern kann in mehr als der Hälfte der Fälle auf dessen Strahlung zurückgeführt werden. Durch das tägliche Rauchen von 25 Zigaretten nimmt man pro Jahr 11,0 mJ an Strahlungsenergie auf.

- A. Stelle die Kernreaktionsgleichung für das Radionuklid auf.
- B. Warum schlägt ein Geiger-Müller-Zähler nicht aus, wenn man eine Zigaretenschachtel vor das Zählrohr hält?
- C. Die Masse des Rauchers betrage 75,6 kg. Berechne die Energiedosis in mGy und die Äquivalentdosis in mSv.

Aufgabe 4. Tschernobyl AKW

Nach dem Reaktorunfall im Jahr 1986 von Tschernobyl kam es in vielen Teilen Deutschlands zum Fallout von Cäsium-137 (β -Strahler; 0,548 MeV).

Noch 25 Jahre danach weisen Wildschweine in Bayern eine starke Strahlenbelastung durch dieses Nuklid auf. Der Grund liegt darin, dass sie sich von Trüffeln und Pilzen ernähren, die das Cs-137 einlagern. In einem Keiler mit einer Masse von 170 kg konnte eine Aktivität durch Cs-137 von 1,10 MBq nachgewiesen werden.

- Die EU-Richtlinie sieht vor, dass erlegte Wildschweine nur als Nahrungsmittel geeignet sind, wenn der Grenzwert von 0,60 kBq/kg nicht überschritten wird. Prüfe, ob dies für den Keiler erfüllt wird. Bilde dazu den Quotienten aus Aktivität und Körpermasse.
- Wie viele Zerfälle von Cs-137 ereignen sich in einer Woche in dem Wildschwein?
- Berechne die wöchentlich aufgenommene Strahlungsenergie.
- Berechne die Energiedosis und Äquivalentdosis des Tieres für den Zeitraum von einer Woche.

ERGEBNISSE:

- Massendefekt: $\Delta m = 3,6596175 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- Freigesetzte Energie pro Spaltung: $E = 3,29 \times 10^{-10} \text{ J} \approx 2056 \text{ MeV}$
- Energieverbrauch: 1g Uran hat $8,55 \times 10^{11} \text{ J}$ Energie;
1:15200 circa, 0,0066% macht 1g Uran zum Energieverbrauch 2018
- E//HDV. $V = E / (H \times D) = 27250 \text{ Liter Benzin entsprechen energetisch 1g Uran-235}$

A2

Teil	Ergebnis
A	Ursprung: Radium-226 (Uranreihe) $\rightarrow$ betroffenes Organ: Lunge
B	Zerfall: $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} + ^4\text{He}$
C	Energiedosis: 54,67 $\mu\text{Gy}/\text{Jahr} = 5,47 \cdot 10^{-5} \text{ Gy}$ ($w_R=20$)
D	Äquivalentdosis: 1,093 mSv/Jahr , Anteil an Gesamtdosis: ~54,7 %

A3

- Energiedosis:** ca. **0,146 mGy** $^{210}\text{Po}_{84} \rightarrow ^{206}\text{Pb}_{82} + ^4\text{He}_2$
- Äquivalentdosis:** ca. **2,91 mSv**
- Vergleich mit Röntgenaufnahmen:** $\Rightarrow$ etwa **29 Röntgenaufnahmen** des Brustkorbes (je 0,1 mSv).

A4.

Teilaufgabe	Ergebnis
a) Aktivitätsdichte (A/m)	1,10 MBq / 170 kg $\approx$ 0,00647 MBq/kg $\rightarrow$ Grenzwert (0,6 MBq/kg) nicht überschritten
b) Zerfälle in 1 Woche	$1,10 \times 10^6 \text{ Bq} \times 604800 \text{ s} \approx 6,65 \times 10^{11} \text{ Zerfälle}$
c) Energieaufnahme pro Woche	$6,65 \times 10^{11} \times 0,548 \text{ MeV} \approx 5,84 \times 10^{-5} \text{ J}$
d) Energiedosis / Äquivalentdosis	$D \approx 3,44 \times 10^{-7} \text{ Gy}$; $H \approx 3,44 \times 10^{-7} \text{ Sv}$ ($w_R = 1$ für β^- -Strahlung)

Theoriefragen (Energiedosis, Äquivalentdosis, Aktivität)

1. Was wird durch die Energiedosis angegeben?
2. In welcher SI-Einheit misst man die Energiedosis?
3. In welcher Einheit misst man die Äquivalenzdosis?
4. Wie vielmal wirksamer sind langsame Neutronen gegenüber Gammastrahlen?
5. Wie vielmal wirksamer sind Alphateilchen gegenüber Gammastrahlen?
6. Wie viel Sievert entspricht 1 rem?
7. Einheit der Dosisleistung?
8. Wie kann man sich vor ionisierender Strahlung schützen?
9. Wie kann man sich vor radioaktivem Fallout (Staub in der Luft) schützen?
10. Warum ist der Verzehr von Pilzen oder Wild nach einem Kernkraftunfall zu vermeiden?
11. Warum stellt das radioaktive Iod I-131 nur in den ersten Tagen nach einem Kernkraftunfall ein Problem dar?
12. Wie groß ist die Äquivalenzdosis einer Protonenstrahlung mit 0,5 Gy?
13. Nennen Sie die vier Strahlenbelastungspfade!
14. Welche Größe wird in Sievert gemessen?
15. Welche Größe wird in Gray gemessen?
16. Unterschied zwischen der Äquivalenzdosis und der Energiedosis bei radioaktiver Strahlung?
17. Wie setzen sich die Einheiten Sievert bzw. Gray aus den SI-Basiseinheiten zusammen?
18. Wie groß sind ca. die natürliche und die künstliche Strahlenbelastung?
19. Was bedeuten „Inkorporation“, „Anreicherung“ und „Nahrungskette“ im Strahlenschutz?
20. Welche biologischen Wirkungen hat radioaktive Strahlung?
21. Welche Einheiten gibt es in der Strahlendosimetrie?
22. Wie können Neutronen abgeschirmt werden?
23. Welche Prozesse führen zu einer Schwächung von γ -Strahlung?
24. Worin besteht die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie?

Rechenaufgaben zur Strahlenphysik

Biologische Wirkung von Strahlung bzw. Dosisbegriffe in der Strahlenschutzphysik

1. ☐ Ein Körper mit 0,5 kg Masse absorbiert 0,2 J Strahlungsenergie. Berechne die Energiedosis in Gy.
2. ☐ In der Lebensmittelbestrahlung wird bis zu 5 kGy verwendet. Wie viele Joule pro Kilogramm ist das?
3. ☐ Wie viel Energie muss auf einen Menschen mit 70 kg einwirken, um eine Dosis von 2 Gy zu erzeugen?
4. ☐ Ein Patient erhält 0,01 Gy durch α -Strahlung ($w_R = 20$). Berechne die Äquivalentdosis.
5. ☐ Ein Stoff ist bestrahlt worden und hat dabei eine Energiedosis von 2 Gy erhalten. Welche Energiemenge ist von 100 g absorbiert worden?
6. ☐ Ein Arbeiter ist einer Neutronenstrahlung ($w_R = 10$) mit 0,004 Gy ausgesetzt. Bestimme die Äquivalentdosis.
7. ☐ Ein Tumor von 0,8 kg absorbiert bei einer Therapie 1,8 Gy. Wie viel Energie wurde absorbiert?
8. ☐ Ein Mensch nimmt durch Radon-222 pro Jahr 4,1 mJ auf. Berechne die Energiedosis und Äquivalentdosis ($w_R = 20$) bei 75 kg.
9. ☐ Ein Bleiabsorber von 5 kg absorbiert 0,4 J Strahlungsenergie. Welche Dosis ergibt sich daraus?
10. ☐ Ein Radiopharmakon reichert sich in der Schilddrüse an (Äquivalentdosis 5 mSv). Berechne die effektive Dosis ($w_T = 0,04$).
11. ☐ Ein Tumor mit 0,3 kg Masse absorbiert 0,45 J. Welche Energiedosis wurde erreicht?

12. ☐ Eine α -Strahlungsquelle erzeugt jährlich 4,2 mJ. Welche Energiedosis und Äquivalentdosis ($w_R = 20$) ergeben sich bei 80 kg Körpermasse?
13. ☐ Eine 60 kg schwere Person erhält 0,8 Sv Äquivalentdosis durch Protonen ($w_R = 5$). Wie viel Energie wurde absorbiert?
14. ☐ Wie schwer muss ein Tumor sein, wenn er bei 0,36 J eine Dosis von 1,2 Gy erhalten soll?
15. ☐ Wie groß ist die Körpermasse, wenn bei 0,3 J eine Energiedosis von 0,005 Gy erreicht wird?
16. ☐ Ein Mensch erhält 2×10^{-4} Gy durch α -Strahlung ($Q = 12$). Berechne absorbierte Energie und Äquivalentdosis ($m = 65$ kg).
17. ☐ Berechne die effektive Dosis, wenn Leber ($w_T = 0,05$, $H_T = 1$ mSv) und Lunge ($w_T = 0,12$, $H_T = 2$ mSv) bestrahlt werden.
18. ☐ Welche Körpermasse ergibt bei 0,9 J und Äquivalentdosis von 0,15 Sv ($w_R = 10$) eine passende Energiedosis?
19. ☐ Welche Masse hat ein Organ, wenn bei 2,4 J eine Dosis von 3 Gy entsteht?
20. ☐ Wie viel Energie darf ein 65 kg schwerer Mensch bei γ -Strahlung ($w_R = 1$) aufnehmen, wenn 50 mSv erlaubt sind?
21. ☐ Wie groß ist die Körpermasse, wenn bei $w_R = 5$ und 0,24 J eine Äquivalentdosis von 0,6 Sv erreicht wurde?
22. ☐ Die Aktivität eines Präparats beträgt 3,5 MBq. Wie viele Zerfälle erfolgen in 2 Stunden?
23. ☐ Ein radioaktives Präparat enthält $1,5 \times 10^{15}$ Kerne und hat Zerfallskonstante $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Berechne die Aktivität.
24. ☐ Durch radioaktives Iod-131 wird 7,5 mJ aufgenommen. Wie hoch ist die Energiedosis bei 70 kg?
25. ☐ Ein Patient erhält eine Energiedosis von 0,05 Gy bei Äquivalentdosis von 1 Sv. Welche Strahlungsart liegt vor?
26. ☐ Durch Radon-222 wird die Lunge bestrahlt.
 - a) Welches Organ ist am stärksten gefährdet? Begründe.
 - b) Gib die Zerfallsgleichung von Rn-222 an.
 - c) Wie viel Energie wird aufgenommen, wenn bei 80 kg die Grenze 20 mSv/Jahr beträgt?
27. ☐ Ein Tumor (0,2 kg) erhält 2,0 Gy pro Sitzung.
 - a) Berechne Energie pro Sitzung.
 - b) Wie viel nach 30 Sitzungen?
 - c) Temperaturerhöhung ohne Abkühlung? ($c = 4200 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$)
28. ☐ Ionendosis in Luft: 1,0 kg Luft, $1,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ erzeugt.
 - a) Berechne J in C/kg.
 - b) Wie viele Ionenpaare? ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)
 - c) Welche Energie in J bei 33 eV pro Paar?
 - d) Energiedosis in Gy?
29. ☐ Ein Techniker erhält 5 mGy durch Neutronen ($w_R = 10$).
 - a) Berechne H.
 - b) Wie groß wäre H bei Gammastrahlung?
 - c) Erkläre den Unterschied.
30. ☐ Bei einer Röntgenuntersuchung absorbiert ein Patient 0,07 J ($m = 70$ kg).
 - a) Berechne D in Gy.
 - b) Berechne H ($w_R = 1$).
 - c) Vergleiche mit der natürlichen Dosis (2 mSv).
31. ☐ Arbeitsplatz: 50 $\mu\text{Sv/h}$, Grenze 20 mSv/Jahr.
 - a) Wie viele Stunden erlaubt?
 - b) Wie viele 8-Stunden-Tage?
32. ☐ Kosmische Strahlung auf Flügen: 0,2 mSv pro Flug.
 - a) Wie viele Stunden in 12 km Höhe entsprechen 1,2 mSv?
 - b) Wie viele Flüge?
33. ☐ Ein Radiopharmakon reichert sich in der Schilddrüse an.
 - a) Effektive Dosis bei $w_T = 0,04$.
 - b) Wie groß wäre E bei Gonaden ($w_T = 0,08$)?
 - c) Biologische Erklärung des Unterschieds.
34. *** Bei einem Gammastrahl mit einer Querschnittsfläche von $2,0 \text{ cm}^2$ treten jede Sekunde 700 Millionen Photonen durch diesen Querschnitt. Jedes Photon hat eine Energie von 1,25 MeV. Der Strahl durchläuft einen 0,75 cm dicken Muskel ($\rho = 0,95 \text{ g/cm}^3$) und verliert dabei 5,0 % seiner Intensität. Berechnen Sie die mittlere Energiedosis je Sekunde!
35. *** Ein Tumor am Bein einer Person hat eine Masse von 3,0 g. Berechnen Sie die minimale Aktivität, die eine Strahlenquelle haben muss, wenn der Tumor in 14 min einer Dosis von 10 Gy ausgeliefert werden soll. Nehmen Sie an, dass jeder Zerfall innerhalb der Quelle im Mittel mit einer Energie 0,70 MeV auf den Tumor wirkt.

ERGEBNISSE:

A1. 0,4 Gy A2. 5000 J/kg A3. 140 J A4. 0,2 Sv A5. 0,2 J A6. 0,04 Sv A7. 1,44 J A8. 0,0000547 Gy ; 0,00109 Sv A9. 0,08 Gy A10. 0,2 mSv A11. 1,5 Gy A12. $5,25 \times 10^{-5}$ Gy ; 0,00105 Sv A13. 11,2 J A14. 0,3 kg A15. 60 kg A16. 0,013 J ; 0,0024 Sv	A17. 0,29 mSv A18. 60 kg A19. 0,8 kg A20. 3,25 J A21. 2,0 kg A22. $2,52 \times 10^9$ Zerfälle A23. $3,0 \times 10^9$ Bq A24. $1,07 \times 10^{-4}$ Gy A25. α -Strahlung A26a. Lunge A26b. $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po}$ + ^4He A26c. 1,6 J A27a. 0,4 J A27b. 12 J A27c. 14,3 K A28a. $1,0 \times 10^{-6}$ C/kg A28b. $6,25 \times 10^{12}$ Paare	A28c. $3,3 \times 10^{-6}$ J A28d. $3,3 \times 10^{-6}$ Gy A29a. 0,05 Sv A29b. 0,005 Sv A30a. 0,001 Gy A30b. 0,001 Sv A30c. 0,001 Sv < 0,002 Sv A31a. 400 h A31b. 50 Tage A32a. 6 h A32b. 6 Flüge A33a. 0,2 mSv A33b. 0,4 mSv A33c. Gonaden sind reproduktiv relevant – höheres Gewicht in Effektivdosis A34. 4,92 mGy/s A35. $3,2 \times 10^8$ Bq
--	---	--

Aktivität radioaktiver Stoffe und Zerfallsprozesse

- Ein radioaktives Präparat enthält $1,5 \times 10^{15}$ Kerne. Bei einer λ von $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ – wie groß ist die Aktivität?
- Ein Präparat hat eine Aktivität von 3,5 MBq. Wie viele Zerfälle treten innerhalb von 2 Stunden auf?
- Die Zerfallskonstante bei einem Nuklid liegt bei $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Berechnen Sie die Halbwertszeit.
- Ein Stoff enthält 2×10^{14} Kerne mit einer Zerfallskonstante von $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Wie groß ist die Aktivität?
- Ein radioaktives Präparat zeigt 6,0 MBq Aktivität. Wie viele Zerfälle finden in 30 Minuten statt?
- Eine radioaktive Substanz weist eine Aktivität von 4 MBq auf. Wie viele Zerfälle erfolgen dabei pro Sekunde?
A) 4 Mio. B) 4000 C) 40.000 D) 400.000 E) 4
- Die Aktivität eines radioaktiven Präparats beträgt 2 MBq. Wie viele Zerfälle werden in einer Minute registriert?
A) 12 Mio. B) 120.000 C) 1.200.000 D) 2 Mio. E) 60 Mio.
- Eine Substanz zerfällt mit 3 MBq. Wie viele Zerfälle geschehen in 10 Minuten?
A) 1,8 Mio. B) 180.000 C) 18 Mio. D) 30 Mio. E) 3 Mio.
- In einer radioaktiven Probe ereignen sich 500.000 Zerfälle pro Sekunde. Wie groß ist die gemessene Aktivität?
A) 0,05 MBq B) 0,5 MBq C) 5 MBq D) 50 MBq E) 500 MBq
- Eine Messung zeigt eine Aktivität von 6 MBq. Was bedeutet dies in Bezug auf die Zerfallsrate?
A) 6 Mio. Zerfälle/Sek. B) 6000 Zerfälle/Sek. C) 600 Zerfälle/Sek. D) 60 Mio. Zerfälle/Sek. E) 0,6 Mio./s
- Eine Substanz hat eine Aktivität von 1,5 MBq. Wie viele Zerfälle geschehen in zwei Minuten?
A) 180.000 B) 1.800.000 C) 90.000 D) 3 Mio. E) 15.000
- Bei einer Probe treten in einer Stunde 360 Mio. Zerfälle auf. Wie groß ist ihre mittlere Aktivität?
A) 1 MBq B) 10 MBq C) 100 MBq D) 0,1 MBq E) 6 MBq
- Nach 4 Stunden mit Halbwertszeit 2 h sind noch 25 mg einer Substanz übrig. Die Aktivität wird mit 0,5 MBq gemessen. Wie groß war die Anfangsaktivität?
A) 1 MBq B) 2 MBq C) 4 MBq D) 0,25 MBq E) 8 MBq
- Eine Substanz verliert jede Stunde die Hälfte ihrer Aktivität. Beginnend mit 8 MBq – wie viel Aktivität verbleibt nach 3 Stunden? A) 1 MBq B) 2 MBq C) 4 MBq D) 3 MBq E) 0,5 MBq
- Eine Quelle hatte anfangs 12 MBq Aktivität. Nach 1 Stunde waren es 6 MBq. Nach welcher Zeit ab Beginn beträgt die Aktivität 1,5 MBq? A) 1 h B) 2 h C) 3 h D) 4 h E) 5 h

ERGEBNISSE:

$3,0 \times 10^9$ Bq $2,52 \times 10^9$ Zerfälle 13860 s = 3 h 51 min $1,0 \times 10^8$ Bq $1,08 \times 10^9$ Zerfälle	6. 4 Mio. 7. 1.200.000 8. 18 Mio. 9. 5 MBq 10. 6 Mio. Zerfälle/Sek.	11. 1.800.000 12. 1 MBq 13. 4 MBq 14. 1 MBq 15. 3 h
--	---	---

Massendefekte und Energien berechnen (siehe Tabelle der Isotopenmassen in der Formelsammlung)

1. Wird ein thermisches Neutron von einem U-235-Kern absorbiert, so entsteht ein instabiler Zwischenkern, der in die Nuklide Kr-89 und Ba-144 zerfallen kann. Wie lautet die Reaktionsgleichung für diesen Vorgang? Geben Sie auch den Zwischenkern an. Berechnen Sie die bei der Spaltung freiwerdende Energie.
2. Ein Uran-235-Kern wird durch ein Neutron in einen Strontium-95- und einen Xenon-139-Kern gespalten. Berechnen Sie die bei der Spaltung freiwerdende Energie.
3. Neben anderen Reaktionen finden in einem Kernreaktor Spaltreaktionen statt, bei denen aus einem Kern Uran-235 durch Beschuss mit einem Neutron ein Kern Zirkonium-94, ein Kern Cerium-140, zwei Neutronen sowie sechs Elektronen entstehen. Stellen Sie die Reaktionsgleichung auf. Berechnen Sie den Massendefekt, ohne die Massen der Elektronen zu berücksichtigen. Berechnen Sie die freiwerdende Bindungsenergie bei der Spaltung eines Kerns.
4. Ein Lithium-6-Kern absorbiert ein Neutron und zerfällt in Tritium (^3H) und ein Helium-4-Teilchen.
 - a) Gib die Reaktionsgleichung an.
 - b) Welche Energie wird dabei ungefähr frei? (Tipp: $\approx 4,8 \text{ MeV}$)
5. Die bei Kernprozessen entstehenden Neutronen haben in der Regel eine kinetische Energie von einigen MeV. Neutronen mit einer kinetischen Energie unter $0,1 \text{ eV}$ bezeichnet man als thermische Neutronen. Welche mittlere Geschwindigkeit haben Neutronen der mittleren kinetischen Energie $0,1 \text{ eV}$?
6. Zwei Kerne von schwerem Wasserstoff (^2D und ^3T) fusionieren zu einem Helium-4-Kern und einem Neutron. Stelle die Reaktionsgleichung auf.
7. Spaltreaktion der Hiroshima-Bombe:

$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3 ^1_0\text{n}$$
8. Ein instabiler Uran-239-Kern wandelt sich unter Beta $^-$ -Zerfall in Neptunium-239 um. Notiere die Reaktionsgleichung.
9. Fusionsreaktion der Wasserstoffbombe:

$$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$$
10. Ein Kalium-40-Kern nimmt ein Elektron auf (Elektroneneinfang) und wandelt sich in Argon-40 um. Gib die Reaktionsgleichung an.
11. Ein Americium-241-Kern emittiert ein Alpha-Teilchen und wird dabei zu Neptunium-237. Stelle die Reaktionsgleichung auf.
12. Zwei Helium-3-Kerne verschmelzen zu einem Helium-4-Kern und zwei Protonen. Gib die vollständige Reaktionsgleichung an.

Hinweise zu Reaktionen:

1. Spaltreaktion von Uran-235 mit Zw.-kern:

$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{89}_{36}\text{Kr} + ^{144}_{56}\text{Ba} + 3 ^1_0\text{n}$$

2. Spaltreaktion:

$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{95}_{38}\text{Sr} + ^{139}_{54}\text{Xe} + 2 ^1_0\text{n}$$

3. Spaltreaktion mit Beta-Zerfall:

$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{94}_{40}\text{Zr} + ^{140}_{58}\text{Ce} + 2 ^1_0\text{n} + 6\beta^-$$

4. Lithium-6-Reaktion:

$$(\Delta E \approx 4,8 \text{ MeV}) \quad ^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^4_2\text{He}$$

5. Keine Reaktionsgleichung – Ergebnis:
 $v \approx 437 \text{ m/s}$ für thermisches Neutron bei $0,1 \text{ eV}$

6. Fusionsreaktion:

$$^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} + 17,6 \text{ MeV}$$

8. Beta $^-$ -Zerfall von Uran-239:

$$^{239}_{92}\text{U} \rightarrow ^{239}_{93}\text{Np} + ^0_{-1}\text{e}^- + \bar{\nu}_e$$

9. Fusionsreaktion der Wasserstoffbombe:

$$^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} + 17,6 \text{ MeV}$$

10. Elektroneneinfang von Kalium-40:

$$^{40}_{19}\text{K} + ^0_{-1}\text{e}^- \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar} + \nu_e$$

11. Alpha-Zerfall von Americium-241:

$$^{241}_{95}\text{Am} \rightarrow ^{237}_{93}\text{Np} + ^4_2\text{He}$$

12. Fusion zweier Helium-3-Kerne:

$$^3_2\text{He} + ^3_2\text{He} \rightarrow ^4_2\text{He} + 2 ^1_1\text{H}$$

ERGEBNISSE:

1. Reaktionsgleichung: $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{89}_{36}\text{Kr} + ^{144}_{56}\text{Ba} + 3 ^1_0\text{n}$
Zwischenkern: $^{236}_{92}\text{U}^*$ $E = 3,96 \times 10^{-10} \text{ J} = 2474 \text{ MeV}$
2. Freigesetzte Energie bei Spaltung in Sr-95 und Xe-139: $E = 5,62 \times 10^{-11} \text{ J} = 351 \text{ MeV}$
3. Reaktionsgleichung: $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{94}_{40}\text{Zr} + ^{140}_{58}\text{Ce} + 2 ^1_0\text{n} + 6 \beta^-$
Massendefekt: $\approx 0,206 \text{ u}$ $E \approx 2,42 \times 10^{-11} \text{ J} = 151,0 \text{ MeV}$
Freigesetzte Energie: $\approx 192 \text{ MeV}$
4. 4a. Reaktionsgleichung: $^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^4_2\text{He}$ $E \approx 8,76 \text{ MeV} \approx 1,40 \times 10^{-12} \text{ J}$
4b. Freigesetzte Energie: $\approx 4,8 \text{ MeV}$
5. Mittlere Geschwindigkeit thermischer Neutronen (0,1 eV): $\approx 440 \text{ m/s}$
6. Reaktionsgleichung: $^2_1\text{D} + ^3_1\text{T} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$
Freigesetzte Energie: $\approx 17,5 \text{ MeV}$ $E \approx 2,66 \times 10^{-12} \text{ J} = 16,58 \text{ MeV}$
7. Hiroshima-Spaltreaktion: $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3 ^1_0\text{n}$
 $E = 3,96 \times 10^{-10} \text{ J} = 2474 \text{ MeV}$
8. Reaktionsgleichung (Beta-): $^{239}_{92}\text{U} \rightarrow ^{239}_{93}\text{Np} + \beta^- + \bar{\nu}_e$
Freigesetzte Energie: $\approx 1,26 \text{ MeV}$ $E \approx 1,26 \text{ MeV} = 2,02 \times 10^{-13} \text{ J}$
9. Wasserstoffbombe-Fusionsreaktion: $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$
Freigesetzte Energie: $\approx 17,5 \text{ MeV}$ $E \approx 17,6 \text{ MeV} = 2,82 \times 10^{-12} \text{ J}$
10. Reaktionsgleichung (Elektroneneinfang): $^{40}_{19}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar} + \nu_e$
Freigesetzte Energie: $\approx 1,5 \text{ MeV}$ $E = 2,40 \times 10^{-13} \text{ J} = 1,50 \text{ MeV}$
11. Alpha-Zerfall: $^{241}_{95}\text{Am} \rightarrow ^{237}_{93}\text{Np} + ^4_2\text{He}$
Freigesetzte Energie: $\approx 5,59 \text{ MeV}$ $E = 9,03 \times 10^{-13} \text{ J} = 5,64 \text{ MeV}$
12. Reaktionsgleichung: $^3_2\text{He} + ^3_2\text{He} \rightarrow ^4_2\text{He} + 2 ^1_1\text{H}$
Freigesetzte Energie: $\approx 12,85 \text{ MeV}$ $E = 2,06 \times 10^{-12} \text{ J} = 12,85 \text{ MeV}$

Exponentielle Prozesse: Zerfall, Abschirmung, Halbwertszeit

1. Bei einem radioaktiven Stoff zerfällt jedes Jahr 10 % der noch vorhandenen Masse. Wie viel Prozent sind nach 10 Jahren vorhanden?
2. Ein radioaktiver Gammastrahler mit der Energie von 2 MeV soll durch eine Bleiplatte abgeschirmt werden, so dass hinter der Platte nur noch eine Intensität von 1,0 % der ursprünglichen Strahlung gemessen wird. Mit einer 1,4 cm dicken Platte kann die Intensität dieser Strahlung auf die Hälfte reduziert werden. Wie dick muss die Bleiabschirmung sein?
3. Bei einem radioaktiven Stoff werden pro Stunde 14 % umgewandelt. Wenn man zu Beginn 600 g hat, wie viel sind es dann noch nach einem Tag? Berechne die Halbwertszeit dieses Stoffes!
Ein anderer radioaktiver Stoff hat eine Halbwertszeit von 35 Jahren. Wieviel % werden pro Jahr umgewandelt?
4. Röntgenstrahlen werden durch Bleiplatten abgeschirmt. Pro mm Dicke der Bleiplatte nimmt die Strahlung um ca. 5 % ab. Auf welchen Bruchteil nimmt die Strahlung bei 10 mm Plattendicke ab?
5. Der Massenschwächungskoeffizient von β -Strahlen der Maximalenergie 3 MeV beträgt ca. $5,1 \text{ cm}^2/\text{g}$. Wie groß ist die Halbwertsdicke für diese Strahlung in einem Aluminiumblech?
6. Strahlung der Intensität $30 \text{ mW}/\text{cm}^2$ wird beim Durchgang durch zwei Glasplatten abgeschwächt. Die Absorption der beiden Platten beträgt 30 % bzw. 50 %. Berechnen Sie die Intensität nach den beiden Platten!
7. ☒ **Nachweis am Seeufer**
Ein Geigerzähler misst an einem vergrabenen radioaktiven Objekt nach 5 Tagen noch 370 Impulse pro Minute. Zu Beginn waren es 1000 Impulse pro Minute. Wie viele Prozent der ursprünglichen Strahlung sind nach den 5 Tagen noch vorhanden?
8. ☒ **Museumspräparat**
Ein altes Uranerzpräparat aus dem naturwissenschaftlichen Museum hat heute eine Aktivität von 1500 Bq. Man weiß, dass es ursprünglich mit einer Aktivität von 6000 Bq aus der Grube gebracht wurde. Nach wie vielen Jahren ist die aktuelle Aktivität erreicht worden?
9. ☒ **Verlorenes Präparat**
Ein radioaktives Präparat war jahrelang verschollen. Als es wiedergefunden wurde, maß man eine Aktivität von 280 Bq. Die Halbwertszeit des Isotops beträgt 12 Jahre. Ursprünglich hatte das Präparat 1120 Bq. Wie viele Jahre war es verschwunden?

10. ☐ **Alphastrahler im Labor**

In einem Labor lagert ein Alphastrahler, dessen Aktivität auf 25 % der Anfangsaktivität gesunken ist. Das ist nach 8 Tagen der Fall. Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Tag?

11. ☐ **Forschungsreaktor**

Ein Physikstudent möchte eine Probe mit einer bekannten Aktivität herstellen. Nach 10 Stunden soll die Probe 2000 Bq liefern. Der Zerfallsfaktor beträgt $\lambda = 0,92 \text{ a} = 0,92 \text{ a} = 0,92$. Wie groß muss die Anfangsaktivität $N_{0,00}$ sein?

12. ☐ **Radon im Keller**

In einem schlecht gelüfteten Keller wird eine Radonkonzentration von 320 Bq/m^3 gemessen. Am Vortag (24 Stunden zuvor) betrug die Konzentration noch 400 Bq/m^3 . Wie hoch ist der Zerfallsfaktor λ pro Stunde?

13. ☐ **Plutoniumprobe**

Eine kleine Plutoniumprobe zeigt eine Aktivität von nur noch 0,0001 % der ursprünglichen Menge. Wie viele Halbwertszeiten sind seit der Herstellung vergangen?

14. ☐ **Cesium-137**

Die Halbwertszeit von Cs-137 beträgt 30 Jahre. Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Jahr? ☐ **Verstrahlter Filter**

Ein Luftfilter wird aus einer radioaktiven Zone entfernt. Nach 3 Stunden hat seine Aktivität noch 80 % des ursprünglichen Werts. Wie lange dauert es, bis nur noch 10 % übrig sind?

15. ☐ **Lagerkontrolle im Institut**

Ein Institut dokumentiert, dass eine Jodprobe heute 720 Bq beträgt. Ursprünglich hatte sie eine Aktivität von 2880 Bq. Wie viel Prozent der Anfangsaktivität sind noch vorhanden?

16. **Kohlenstoffdatierung**

Ein Fundstück enthält heute nur noch 15 % des ursprünglichen C-14-Gehalts.

a) Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Jahr?

b) Nach wie vielen Jahren ist nur noch 1 % des ursprünglichen C-14 übrig?

17. **Aktivität im Zwischenlager**

Ein Isotop hat eine Halbwertszeit von 24 Jahren. In einem Fass misst man heute noch 40 % der ursprünglichen Aktivität.

a) Wie lange liegt das Material schon?

b) Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Jahr?

18. **Uran in Gestein**

Heute sind in einer Gesteinsprobe nur noch 25 % des ursprünglichen Uran-235 enthalten.

a) Wie viele Halbwertszeiten sind vergangen?

b) Wie lange dauert es, bis nur noch 0,1 % übrig sind?

19. **Jodtablette im Labor**

Ein Labor hat vor 60 Tagen eine Jod-131-Probe hergestellt. Heute sind noch 6,25 % übrig.

a) Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Tag?

b) Wie groß ist die Halbwertszeit?

20. **Wasserstofffusion und Restisotope**

Nach 70 Jahren verbleiben von einem Isotop noch 12 %.

a) Wie viele Jahre dauert es, bis nur noch 1 % vorhanden ist?

b) Wie groß ist der Restanteil Q nach 200 Jahren?

21. **Rückverfolgung radioaktiver Kontamination**

Ein Gebiet war vor 100 Jahren mit einem Isotop kontaminiert. Heute misst man noch 3,125 % der ursprünglichen Aktivität.

a) Wie groß ist die Halbwertszeit?

b) Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Jahr?

22. **Langzeitverhalten eines Speicherelements**

Ein Element hat einen Zerfallsfaktor von $\lambda = 0,93$ pro Jahr.

a) Wie viele Jahre vergehen, bis nur noch 20 % der Aktivität bleibt?

b) Wie groß ist die Halbwertszeit?

23. **Medizinischer Tracer**

Ein Tracer zerfällt mit einer Halbwertszeit von 6 Stunden.

a) Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Stunde?

b) Nach wie vielen Stunden ist nur noch 1 % der ursprünglichen Menge vorhanden?

24. **Sicherheitstest eines Endlagers**

Ein radioaktives Isotop zeigt nach 140 Jahren noch 10 % seiner ursprünglichen Aktivität.

a) Wie groß ist der Zerfallsfaktor λ pro Jahr?

b) Wie groß ist die Halbwertszeit?

25. Nachverfolgung von Fallout

Eine Spaltprobe zeigt heute eine Aktivität von 18 %, gegenüber einem bekannten Stand vor 75 Jahren.

- Wie groß ist der Zerfallsfaktor a pro Jahr?
- Nach wie vielen Jahren ist die Aktivität unter 0,5 % gefallen?

ERGEBNISSE:

$\approx 34,87\%$ $\approx 9,3\text{ cm}$ Bleidicke - Nach 24 h: $\approx 29,3\text{ g}$, - Halbwertszeit: $\approx 4,5\text{ h}$ Zerfall pro Jahr bei $T_{1/2} = 35\text{ a}$: $\approx 1,95\%$ - Bruchteil nach 10 mm: $\approx 59,9\%$ - Halbwertsdicke in Alu: $\approx 0,136\text{ cm}$ - Endintensität: $\approx 10,5\text{ mW/cm}^2$ - Rest nach 5 Tagen: 37% - Alter des Präparats: ≈ 2 Halbwertszeiten $\rightarrow \approx 48\text{ Jahre}$ - Verschwunden: $\approx 24\text{ Jahre}$ - Zerfallsfaktor a: $\approx 0,841$ pro Tag - Anfangsaktivität: $\approx 5223\text{ Bq}$ - Zerfallsfaktor a: $\approx 0,991$ pro Stunde - Halbwertszeiten vergangen: $\approx 13,3$ - Zerfallsfaktor Cs-137: $\approx 0,977$ pro Jahr Zeit bis 10 %: $\approx 9,97\text{ h}$ Aktivitätsrest: 25 % 16a. Zerfallsfaktor a: $\approx 0,933$ 16b. Zeit bis 1 %: $\approx 435\text{ Jahre}$	17a. Lagerdauer: $\approx 32\text{ Jahre}$ 17b. Zerfallsfaktor a: $\approx 0,971$ 18a. Halbwertszeiten: 2 18b. Zeit bis 0,1 %: $\approx 6,6$ Halbwertszeiten 19a. Zerfallsfaktor a: $\approx 0,936$ 19b. Halbwertszeit: $\approx 20\text{ Tage}$ 20a. Zeit bis 1 %: $\approx 112\text{ Jahre}$ 20b. Restanteil nach 200 Jahren: $\approx 0,66\%$ 21a. Halbwertszeit: 20 Jahre 21b. Zerfallsfaktor a: $\approx 0,965$ 22a. $\approx 13,4\text{ Jahre}$ 22b. Halbwertszeit: $\approx 9,7\text{ Jahre}$ 23a. Zerfallsfaktor a: $\approx 0,891$ 23b. Zeit bis 1 %: $\approx 39,8\text{ Stunden}$ 24a. Zerfallsfaktor a: $\approx 0,9826$ 24b. Halbwertszeit: $\approx 45\text{ Jahre}$ 25a. Zerfallsfaktor a: $\approx 0,972$ 25b. Zeit bis 0,5 %: $\approx 151\text{ Jahre}$
---	---

Exponentielle Prozesse: Halbwertszeit (ohne Taschenrechner)

- Die Halbwertszeit einer radioaktiven Mischung liegt bei 3 Jahren. Wie viel Prozent der Ausgangsmenge zersetzt sich nach 12 Jahren? A) 87,5% B) 93,75% C) 75% D) 25% E) 50%
- Die Halbwertszeit einer radioaktiven Mischung liegt bei 4 Jahren. Wie viel Prozent der Ausgangsmenge bleibt nach 16 Jahren übrig? A) 6,25% B) 12,5% C) 25% D) 50% E) 75%
- Die Halbwertszeit einer radioaktiven Mischung liegt bei 5 Jahren. Wie viel Prozent der Ausgangsmenge bleibt nach 15 Jahren übrig? A) 6,25% B) 12,5% C) 25% D) 50% E) 75%
- Die Halbwertszeit einer radioaktiven Mischung liegt bei 3 Jahren. Wie viel Prozent der Ausgangsmenge bleibt nach 12 Jahren übrig? A) 6,25% B) 12,5% C) 25% D) 50% E) 75%
- Von einer radioaktiven Substanz blieb nach 12 Stunden nur noch 12,5%. Die Halbwertszeit ist daher gleich: A) 0,5 h B) 4 h C) 8 h D) 12 h E) 32 h
- Von einer radioaktiven Substanz blieb nach 16 Stunden nur noch 6,25%. Die Halbwertszeit ist daher gleich: A) 0,5 h B) 4 h C) 8 h D) 12 h E) 32 h
- Die Halbwertszeit von radioaktivem Iod beträgt 15 Minuten. Zu Beginn der Untersuchung liegt 240 mg Iod vor. Wie viel Iod bleibt nach eine Stunde übrig? A) 15 mg B) 20 mg C) 30 mg D) 120 mg E) 60 mg
- Die Halbwertszeit von radioaktivem Iod beträgt 20 Minuten. Zu Beginn der Untersuchung liegt 240 mg Iod vor. Wie viel Iod bleibt nach eine Stunde übrig? A) 15 mg B) 20 mg C) 25 mg D) 30 mg E) 120 mg
- Zu Beginn liegen 120 radioaktive Atome vor. Nach 20 Stunden sind es nur noch 30. Ermitteln Sie daraus die Halbwertszeit! A) 5 h B) 10 h C) 15 h D) 20 h E) 40 h
- Zu Beginn liegen $12 \cdot 10^{25}$ radioaktive Atome vor. Nach 16 Stunden sind es nur noch $3 \cdot 10^{25}$. Ermitteln Sie daraus die Halbwertszeit! A) 2 h B) 4 h C) 6 h D) 8 h E) 12 h
- ^3H (Tritium) besitzt eine Halbwertszeit von circa 12 Jahren. Derzeit liegen 10 mg Tritium vor. a) Wie viel mg Tritium waren es vor 36 Jahren vorhanden? A) 20 B) 30 C) 40 D) 60 E) 80 b) Wie viel Prozent der heutigen Menge bleibt nach weiteren 24 Jahren vorhanden? A) 12,5% B) 25% C) 50% D) 10% E) 75%
- Es liegt 10 mg ^{131}I (Iod) vor. Nach 16 Tagen sind es nur noch 2,5 mg. Berechnen Sie daraus die Halbwertszeit. A) 2 d B) 4 d C) 6 d D) 8 d E) 10 d
- Es liegt 80 mg eines radioaktiven Isotopengemisches vor. Nach 9 Minuten sind es nur noch 10 mg. Berechnen Sie daraus die Halbwertszeit. A) 1 min B) 2 min C) 3 min D) 4 min E) 6 min
- Vor 24 Jahren betrug die Masse eines Isotops 16 g. Heute sind es 1 g. Berechnen Sie daraus die Halbwertszeit.

A) 3 a B) 4 a C) 5 a D) 6 a E) 8 a

15. Vor 8 Tagen betrug die Masse eines Isotops 22,5 g. Heute sind davon noch 25% vorhanden. Berechnen Sie daraus die Halbwertszeit. A) 2 d B) 3 d C) 4 d D) 5 d E) 6 d

1. B) 93,75% 2. A) 6,25% 3. C) 25% 4. A) 6,25% 5. C) 8 h 6. C) 8 h 7. A) 15 mg 8. B) 30 mg 9. B) 10 h 10. D) 8 h 11a. D) 80 mg 11b. A) 25% 12. D) 8 d 13. B) 2 min 14. C) 4a 15. C) 4 d	
---	--

Überprüfe, ob ein exponentielles Gesetz vorliegt!

B1	t	3	4	5	6	7	8	9	10
	N(t)	134,99	149,18	164,87	182,21	201,38	222,55	245,96	271,83

B2	t	5	6	7	8	9	10	11	12
	N(t)	141,78	162,14	182,49	202,85	223,2	243,56	263,92	284,27

B3	t	0	1	2	3	4	5	6	7
	N(t)	100	81,873	67,032	54,881	44,933	36,788	30,119	24,66

B4	t	1	2	3	4	5	6	7	8
	N(t)	60,356	80,712	101,07	121,42	141,78	162,14	182,49	202,85

B5 **exponentielles Gesetz liegt vor. Vervollständige die Tab:**

t	1	2	3	4	7	8	12	20
N(t)		49,124		40,219				

B6	t	1	2	3	4	7	8	12	20
	N(t)		37,296		55,639				

B7	t	1	2	3	4	7	8	12	20
	N(t)		37,041		27,441				

B8	t	1	2	3	4	7	8	12	20
	N(t)		13,499		18,221				