

45 Radioaktivität

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand September 2012)

Entstehung und Arten der Radioaktivität

A1 Radioaktive Strahlung ist sehr unterschiedlich. Es gibt aber drei Gemeinsamkeiten! Welche?

A2 Warum sind manche Stoffe radioaktiv und manche nicht? Was ist quasi die Grundvoraussetzung dafür?

A3 ERNEST RUTHERFORD konnte 1902 mit Hilfe eines Magnetfeldes drei Arten von Strahlung unterscheiden. Er nannte sie nach den ersten Buchstaben des griechischen Alphabets **α**-, **β**- und **γ**-Strahlung. Beschrifte in Abb. 1 die drei Strahlungen richtig. Benutze dabei die Drei-Finger-Regel (Abb. 2).

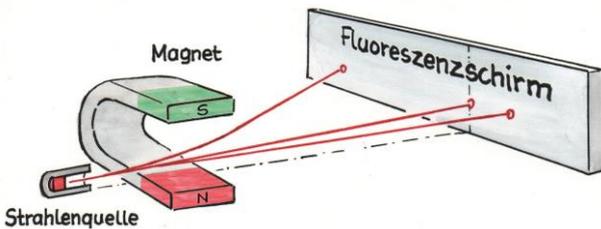


Abb. 1: Ablenkung der drei Arten von radioaktiver Strahlung (Grafik: Janosch Slama).

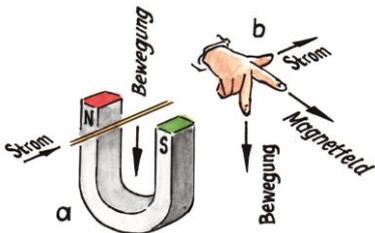


Abb. 2 (Grafik: Janosch Slama)

A4 a Warum kann man den α -Zerfall nur quantenmechanisch erklären? Verwende für deine Erklärung Abb. 3.

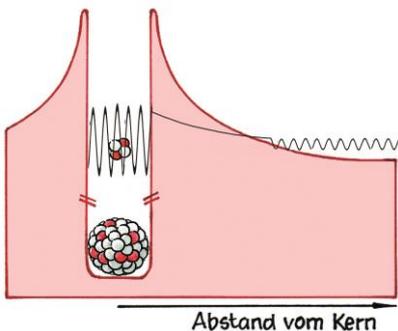


Abb. 3: Die Wellenfunktion eines α -Teilchens im Potenzialtopf des Kerns (Grafik: Janosch Slama und Martin Apolin).

A4 b Erkläre qualitativ, warum U-228 eine so viel geringere Halbwertszeit aufweist als U-238. Verwende für deine Erklärungen Abb. 4.

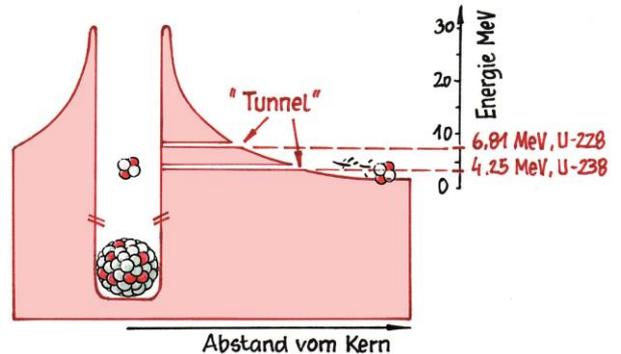


Abb. 4: Schematische Darstellung des Tunneleffekts beim α -Zerfall (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 45.4, S. 60).

A5 Die Gesteinsschichten der Erdkruste (Abb. 5) haben eine Wärmeleitfähigkeit um $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die Temperatur steigt um etwa $3 \text{ }^\circ\text{C}$ je 100 m Tiefe - das ist eigentlich ziemlich beachtlich. Diese Wärme stammt vor allem aus radioaktivem Zerfall in der Erde. Berechne die Wärmestromdichte, also die Watt pro Quadratmeter, zur Erdoberfläche. Benutze die Gleichung $I = \frac{\Delta Q}{t} = \lambda \frac{A}{d} \Delta T$. Ist die Wärmestromdichte groß genug, um sie irgendwie zu merken oder zu nutzen?

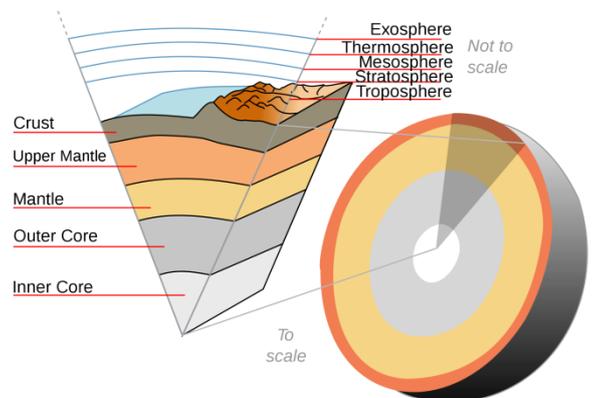


Abb. 5: Aufbau der Erde, links schematisch, rechts maßstabgetreu. Die Erdkruste ist mit 0 bis 40 km so dünn, dass sie rechts gar nicht zu sehen ist (Grafik: Surachit; Quelle: Wikipedia).

A6 Beim radioaktiven Zerfall eines bestimmten Isotops wird immer *exakt dieselbe Energiemenge* frei. Deshalb müssen die Bewegungsenergie und auch die Geschwindigkeit des ausgesendeten Teilchens immer gleich groß sein. Bei α -Teilchen ist das auch so (Abb. 6a nächste Seite). Bei β -Teilchen ist aber die gemessene Geschwindigkeit fast immer geringer als die erwartete (b). Aber wo gehen Impuls und somit auch Energie „verloren“? Hilf dir mit Tab. 1.

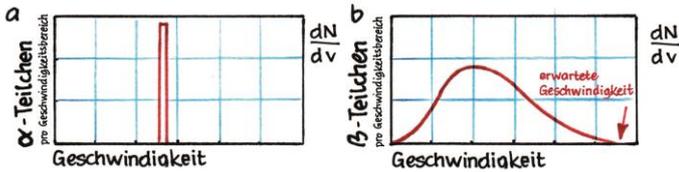
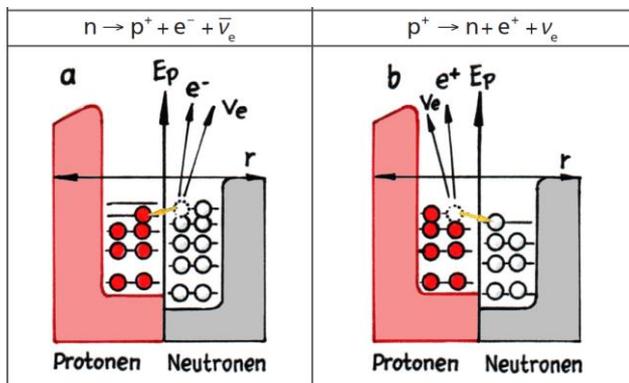


Abb. 6: Geschwindigkeit von α - und β -Teilchen. Die β -Teilchen verletzen scheinbar den Energiesatz (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.9, S. 77).

A7 Der Begriff γ -Zerfall ist historisch bedingt. Warum ist der Begriff aber nicht günstig gewählt?

A8 Wenn im Kern zu viele Neutronen oder Protonen sind, kommt es zum β -Zerfall. Dabei kann man zwei Fälle unterscheiden: Ein Neutron kann in ein Proton, ein Elektron und in ein Anti-Elektronneutrino zerfallen (siehe Tab. 1a). Ein Proton kann in ein Neutron, ein Positron (Anti-Elektron) und ein Elektronneutrino zerfallen (siehe Tab. 1b).

Ein einzelnes Neutron, also eines, das sich nicht in einem Kern befindet, kann ebenfalls so wie in Fall a zerfallen. Ein einzelnes Proton kann jedoch *nicht* so wie in Fall b zerfallen. Diesen Zerfall gibt es nur in Atomkernen. Warum? Hilf dir mit Tabelle 2. Die Neutrinomasse liegt im Bereich von 10^{-36} kg.



Tab. 1: Schematische Darstellung von β -Zerfall (a) und $\beta\beta^+$ -Zerfall (b). Die Kernenergie sinkt, weil das zerfallende Nukleon auf ein niedrigeres Niveau springt (siehe auch Abb. 45.7, S. 61).

Teilchen	Masse in kg	Ladung	relative Masse
Neutron (n)	$1,675 \cdot 10^{-27}$	neutral	1838,7
Proton (p ⁺)	$1,673 \cdot 10^{-27}$	plus	1836,2
Elektron (e ⁻)	$9,109 \cdot 10^{-31}$	minus	1

Tab. 2

A9 Wenn Protonen ein bisschen schwerer wären als Neutronen (also genau umgekehrt, als es tatsächlich ist), dann könntest du diese Zeilen nicht lesen. Warum? Die Antwort

ist etwas komplexer und hat mit dem gesamten Universum zu tun. Überlege mit Hilfe von A8.

A10 Was ist in dem Feynman-Diagramm in Abb. 7 dargestellt? Beschreibe die Reaktion genau, und hilf dir mit Abb. 8.

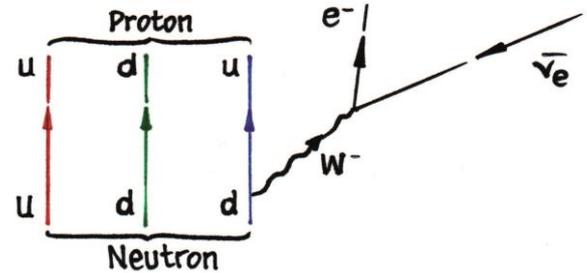


Abb. 7 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.19, S. 81).

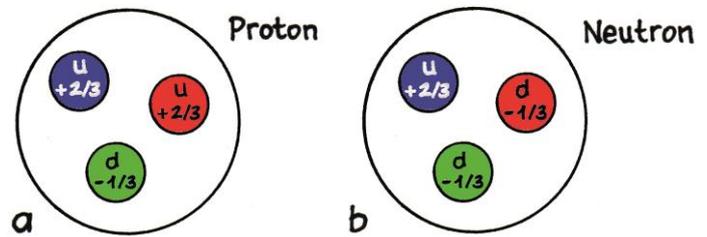


Abb. 8: Protonen und Neutronen sind keine Elementarteilchen, sondern setzen sich aus drei Quarks zusammen. Diese sind punktförmig, hier also übertrieben groß dargestellt. Quarks haben gedrittelte Ladungen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.12, S. 79)

A11 Welches Quark hat mehr Masse? Ein u-Quark oder ein d-Quark (siehe Abb. 8)? Hilf dir mit der Lösung zu A10.

Biologische Wirkung

A12 a Ein Liter Milch darf in Österreich mit maximal 380 Bq/h strahlen. Wie groß ist die Strahlenbelastung, wenn man Milch trinkt, die gerade diesen Grenzwert erreicht, und dieser 12 Stunden im Körper verweilt? Nimm an, dass die Verstrahlung durch die "Tschernobyl-Isotope" Cäsium-137 und Iod-131 hervorgerufen wird und schätze die Energie der β -Teilchen mit 1 MeV ab. Nimm an, dass die Verstrahlung ein Kind mit einer Masse von 20 kg betrifft.

A12 b Nimm an, ein Kind trinkt jeden Tag einen Liter Milch (siehe A12 a). Wie groß ist die gesamte zusätzliche Strahlungsbelastung in einem Jahr, wenn dieser genau den erlaubten Grenzwert besitzt? Vergleiche mit der durchschnittlichen jährlichen Äquivalentdosis der Österreicher (siehe Abb. 9).

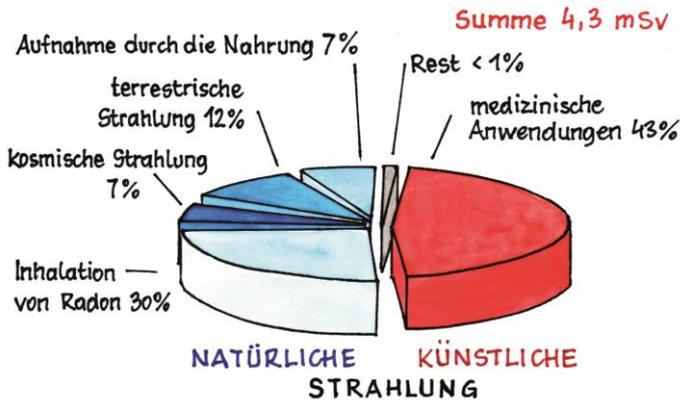


Abb. 9: Die durchschnittliche jährliche Äquivalentdosis der Österreicher (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 45.12, S. 62).

A13 Durch eine Kombination aus menschlichem Versagen und Konstruktionsfehlern kam es 1986 im ukrainischen Atomkraftwerk Tschernobyl (Abb. 10) zu einer unkontrollierten Kettenreaktion, und der Reaktor explodierte. Vor allem die flüchtigen Isotope Iod-131 und Cäsium-137 wurden in einer radioaktiven Wolke tausende Kilometer weit getragen, auch nach Europa. In der Süddeutschen Zeitung wurde folgende Empfehlung gegeben: "Von Milch sollte nicht mehr als 500 Becquerel Strahlung ausgehen, bei Gemüse sind es 250 Bq." Ist diese Angabe sinnvoll?



Abb. 10: Das Kraftwerk in Tschernobyl nach der Explosion (Quelle: Wikipedia).

A14 Eines der Argumente der Verschwörungstheoretiker, die behaupten, dass die Mondlandung niemals stattgefunden hat, ist jenes, dass die Astronauten im Van-Allen-Gürtel (Abb. 11) einer tödlichen Strahlendosis ausgesetzt gewesen wären. Sieh dir dazu Tab. 3, Tab. 4 und Abb. 11 an und ziehe daraus deine Schlüsse.

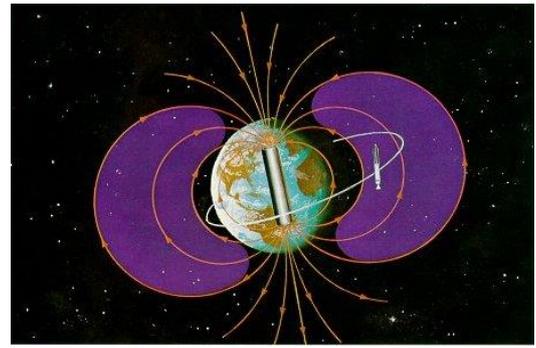


Abb. 11: Der Van-Allen-Strahlungsgürtel ist ein Ring energiereicher geladener Teilchen, die durch das magnetische Feld der Erde eingefangen werden. Diese Teilchen stammen überwiegend vom Sonnenwind und der kosmischen Strahlung. Sie führen zu einer Strahlungsbelastung, die zwar nicht von einer radioaktiven Strahlung ausgeht, aber mit dieser vergleichbar ist (Grafik: NASA).

Dosis	Beispiele zum Vergleich	Wirkungen der Strahlung
bis 1,5 mSv	Tägliche Dosis, die ein Astronaut frei im erdnahen All erhält	-
bis 4,3 mSv	Jährliche Strahlendosis der Österreicher	-
20 mSv	Erlaubte jährliche Grenzdosis in Österreich für medizinisch-technisches Personal über einen Durchrechnungszeitraum von fünf Jahren	tödliches Krebsrisiko: +1 je 1000 Menschen
bis 50 mSv	Spitzenwert der stündlichen Dosis im Zentrum des äußeren Strahlungsgürtels (Van-Allen)	tödliches Krebsrisiko: +2,5 je 1000 Menschen
bis 200 mSv	Spitzenwert der stündlichen Dosis im Zentrum des inneren Strahlungsgürtels (Van-Allen)	tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +10 je 1000 Menschen
bis 500 mSv	erhielten 30.000 mit Aufräumungsarbeiten Beschäftigte in Tschernobyl	kaum unmittelbar Wirkungen feststellbar, Schwächung des Immunsystems; tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +25 je 1000 Menschen
bis 1 Sv	Hiroshima-Atombombe in 2000 m Entfernung (In dieser Entfernung starben jedoch 70% aller Menschen an der direkten Wirkung der Bombe.)	verändertes Blutbild, Hautrötungen, vereinzelt Übelkeit, Erbrechen, sehr selten Todesfälle tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +50 je 1000 Menschen
bis 4 Sv	Jahresdosis der geringer belasteten Gebiete im 30 km Umkreis des Reaktors in Tschernobyl	sehr schlechtes Allgemeinbefinden, Blutbildung stark gestört, stark erhöhte Infektionsbereitschaft, 50%ige Sterblichkeit
ab 7 Sv	Hiroshima-Atombombe in 1000 m Entfernung (In dieser Entfernung starben jedoch fast alle Menschen an der direkten Wirkung der Bombe.)	fast 100%ige Sterblichkeit
> 100 Sv		sofortiger Tod

Tab. 3: Äquivalentdosis mit Beispiel und Wirkung

	Flugzeit in h	Dosis in mSv
Apollo 8 (1. Mondumkreisung)	147	5,7
Apollo 11 (1. Mondlandung)	195	6,1
Apollo 12 (2. Mondlandung)	244	7,6
Apollo 13 (misslungene Mondlandung)	143	4,4
Apollo 14 (3. Mondlandung)	216	7,2
Apollo 15 (4. Mondlandung)	295	8,5
Apollo 16 (5. Mondlandung)	266	7,6
Apollo 17 (6. und letzte Mondlandung)	302	9,2

Tab. 4: Strahlungsbelastung bei den Mondmissionen.

Zerfallsgesetz und Altersbestimmung

A15 Es gibt den - natürlich bildlich - gemeinten Spruch: „Das Wissen in der Medizin hat eine Halbwertszeit von 6 Jahren.“ Was ist damit gemeint?

A16 Zeichne die Zerfallskurve zweier hypothetischer Stoffe mit einer Halbwertszeit von einer bzw. zwei Sekunden in ein Diagramm für die ersten 10 Sekunden ein.

A17 Du willst eine Sonde, die du ins All schießt, mit einer radioaktiven Energieversorgung ausrüsten. Du hast die Wahl zwischen zwei Varianten mit gleicher Masse. **Variante a** verwendet ein Isotop mit einer Halbwertszeit von 1/2 Jahr. **Variante b** ist zu Beginn nur halb so radioaktiv (gibt also nur die halbe Leistung ab), hat dafür aber eine Halbwertszeit von 1 Jahr. Welche Variante solltest du für eine vieljährige Mission sinnvoller Weise wählen? Erstelle dazu eine Tabelle.

A18 Ötzi, der Mann aus dem Eis, ist eine Gletschermumie aus der späten Jungsteinzeit, die 1991 in den Ötztaler Alpen (Südtirol) gefunden wurde. Wie hat man das Alter von Ötzi bestimmt?



Abb. 12 (Quelle: Wikipedia)

a Aus dem organischen Material wird zunächst der reine Kohlenstoff extrahiert. Überlege mit Hilfe von Tab. 5 und Abb. 13, wie viele C-14-Atome sich in 1 g dieses Kohlenstoffs

finden. Ein Mol hat $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen. (Anm.: Dieses Beispiel muss mit einem sehr genauen Taschenrechner oder einem Tabellenkalkulationsprogramm gerechnet werden!)

	Masse in u	Kern- ladungs- zahl Z	Neutro- nenzahl N	Nukleo- nenzahl A	relative Häufigkeit
e	0,00055	-	-	-	-
n	1,00728	0	1	1	-
p	1,00867	1	0	1	-
^1_1H	1,00783	1	0	1	0,99985
^2_1H	2,01410	1	1	2	0,00015
^3_1H	3,01603	1	2	3	radioaktiv
$^{12}_6\text{C}$	12,00000	6	6	12	0,9889
$^{13}_6\text{C}$	13,00335	6	7	13	0,0111
$^{14}_6\text{C}$	14,00324	6	8	14	$1,3 \cdot 10^{-12}$

Tabelle 5: Einige Isotope und der Vergleich mit Elektron und Nukleonen. Die atomare Masseneinheit u wurde als 1/12 der Masse eines C-12-Atoms festgelegt und hat absolut $1,66054 \cdot 10^{-27}$ kg (siehe auch Tab. 44.2, S. 56)

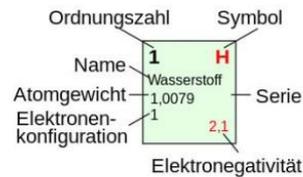


Abb. 13 (Quelle: Wikipedia)

5 Bor 10,811 2/3	6 Kohlenstoff 12,011 2/4	7 Stickstoff 14,007 2/5	8 Sauerstoff 15,999 2/6	9 Fluor 18,988 2/7
2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
13 Aluminium 26,982 2/8/3	14 Silicium 28,086 2/8/4	15 Phosphor 30,974 2/8/5	16 Schwefel 32,065 2/8/6	17 Chlor 35,453 2/8/7
1,5	1,8	2,1	2,5	3,0

b C-14 hat eine Halbwertszeit von 5730 Jahren. Berechne, wie viele Zerfälle pro Minute daher in einem Gramm Kohlenstoff auftreten. Verwende dazu die Gleichung $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, wobei für $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ gilt.

c Bei Ötzi konnte man rund 8 Zerfälle pro Minute feststellen. Auf welches Alter konnte man ihn daher schätzen?

A19 Es heißt, dass man mit der C-14-Methode das Alter von Stoffen auf etwa 55.000 Jahre rückdatieren kann. Für ältere Proben eignet sich die Methode nicht. Warum? Überlege mit Hilfe von A18.

Hilfe zu A1: 1) Der Ursprung liegt im Kern. 2) Durch die Strahlung verringert sich seine potenzielle Energie. 3) Der Zerfall tritt spontan auf, also ohne Einfluss von außen.

Hilfe zu A2: Nur Kerne, die durch Aussendung von Strahlung in einen niedrigeren Energiezustand übergehen können, sind radioaktiv.

Hilfe zu A3: α -Strahlung besteht aus Heliumkernen, also aus positiv geladenen Teilchen. In diesem Fall entspricht die Flugrichtung der technischen Stromrichtung. Die Teilchen werden daher nach außen, also in Flugrichtung nach rechts abgelenkt. β -Strahlung besteht aus Elektronen. In diesem Fall zeigt die technische Stromrichtung gegen die Flugrichtung. Die Teilchen werden daher nach innen, also in Flugrichtung nach links abgelenkt. γ -Strahlung besteht aus energiereichen Photonen. Diese sind ungeladen und werden daher nicht abgelenkt.

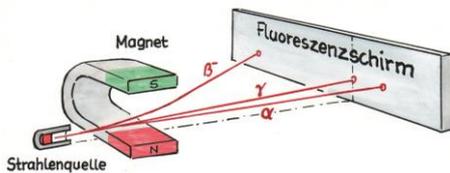


Abb. 14 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A4 a: Radioaktivität tritt ohne äußere Einwirkung auf. Aus klassischer Sicht ist es unmöglich, dass das α -Teilchen der Kernkraft entkommt, denn es kann nicht von selbst über die Potenzialbarriere gelangen (Abb. 3). Das wäre so, als würde ein Apfel von selbst aus einer tiefen Schale springen! Im Rahmen der Quantenmechanik ist die Erklärung aber über den Tunneleffekt mit Hilfe der Wellenfunktion möglich. Diese sinkt außerhalb der Potenzialbarriere nicht auf null ab. Daher gibt es auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen außerhalb befinden kann.

Hilfe zu A4 b: Beim Zerfall des U-228-Kerns wird mehr Energie freigesetzt als bei U-238. Das freie α -Teilchen aus dem U-228-Kern trägt diese Energiedifferenz mit sich und hat daher „im Freien“ mehr Energie als das α -Teilchen aus dem U-238-Kern. Es muss nur eine geringere Energiemenge „ausleihen“ und hat daher eine höhere Tunnelwahrscheinlichkeit.

Hilfe zu A5: Die Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, die Dicke $d = 100 \text{ m}$, der Temperaturunterschied $\Delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$. In der Gleichung sind alle Werte bis auf I und A bekannt. Weil wir die Watt pro m^2 haben wollen, müssen wir für die Fläche 1 m^2 nehmen. Wenn du die bekannten Werte einsetzt, er-

hältst du $I = \frac{\Delta Q}{t} = \lambda \frac{A}{d} \Delta T = 2 \cdot \frac{1}{100} \cdot 3 \approx 0,06 \text{ W}/\text{m}^2$. Das ist viel zu wenig, um es zu merken. Selbst wenn du eine Fläche von 100 m^2 hättest, wären das nur 6 W . Das reicht gerade für das Betreiben einer Energiesparlampe.

Hilfe zu A6: Die Sache mit dem β -Zerfall erschien lange Zeit so rätselhaft, dass der große Niels Bohr sogar am Energiesatz zu zweifeln begann. Wolfgang Pauli hatte aber 1930 eine Idee. Er sagte voraus, dass beim β -Zerfall ein unbekanntes Teilchen entstehen muss, das den fehlenden Impuls besitzt (siehe Tab. 1). Und so ist es auch! Dieses Teilchen nennt man heute Neutrino.

Hilfe zu A7: Im Gegensatz zu α - und β -Zerfall, bei denen Nukleonen zerfallen, zerfällt beim γ -Zerfall nichts. Dabei gibt ein Nukleon nur seine überschüssige Energie in Form eines energiereichen Photons ab. An der Position auf der Nuklidkarte ändert sich aber nichts.

Hilfe zu A8: Bei Reaktion a sind die Massen der Zerfallsprodukte in Summe kleiner als die des Neutrons. Ein Neutron hat $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die Zerfallsprodukte haben $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} + 10^{-33} \text{ kg} \approx 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die restlichen $0,001 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ werden über $E = mc^2$ als Energie frei. Bei Reaktion b sind die Massen der Zerfallsprodukte in Summe jedoch größer als die des Protons. Ein Proton hat $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die Zerfallsprodukte haben $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} + 10^{-33} \text{ kg} \approx 1,676 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Es fehlt also eine Masse von etwa $0,003 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Wenn sich das Proton im Atomkern befindet, kann es die fehlende Masse über $E = mc^2$ aus der überschüssigen Energie des Kerns bekommen.

Hilfe zu A9: Wenn die Masse der Protonen größer wäre als die der Neutronen, dann könnten freie Protonen spontan wie in Tab. 1b zu Neutronen zerfallen. Protonen sind aber nichts anderes als Wasserstoffkerne. Wenn alle Protonen zu Neutronen zerfallen, dann könnte auch kein Wasserstoff existieren, und die Sterne hätten keinen Brennstoff. Die Sterne würden nicht leuchten, und es könnten auch keine höheren Elemente entstehen. Schlechte Aussichten für Leben im Universum!

Hilfe zu A10: In Abb. 7 ist ein β -Zerfall dargestellt. Man kann diesen auch so sehen: Das d-Quark im Neutron wandelt sich in ein u-Quark um und sendet dabei ein W^- -Boson aus. Das Nukleon hat danach zwei u-Quarks und ein d-Quark und ist somit ein Proton. Das W^- -Boson zerfällt in ein Elektron (e^-) und ein Anti-Elektronneutrino ($\bar{\nu}_e$). Netto ergibt sich die Reaktion $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ (siehe Tab. 1 links).

Hilfe zu A11: Es ist eine ganz ähnliche Frage wie in A8. Damit das d-Quark in ein u-Quark und noch etwas anderes zerfallen kann, muss seine Masse größer sein als die des u-Quarks. Sonst wäre der Energiesatz verletzt.

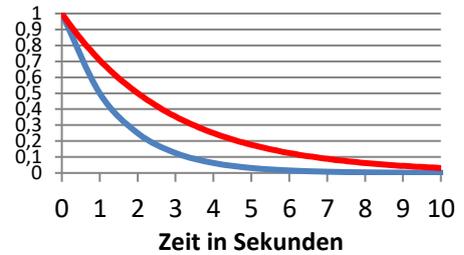
Hilfe zu A12 a: 12 Stunden entsprechen 43.200 Sekunden. Wenn ein Liter Milch mit 380 Bq strahlt, dann sind das in Summe $1,64 \cdot 10^7$ Zerfälle. Die Energie von 1 MeV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Die gesamte an den Körper abgegebene Energie beträgt daher in den 12 Stunden $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \cdot 1,64 \cdot 10^7 = 2,62 \cdot 10^{-6} \text{ J}$. Wenn das Kind 20 kg hat, dann wird es (gleichmäßige Verteilung vorausgesetzt) mit $1,31 \cdot 10^{-7} \text{ Gray (J/kg)}$ belastet. Die relative biologische Wirkung von β -Strahlung liegt bei 1. Daher ergibt sich für die zusätzliche Belastung rund 10^{-7} Sv .

Hilfe zu A12 b: Die jährliche Gesamtbelastung beträgt $365 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/Jahr} \approx 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/Jahr} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ mSv/Jahr}$. Das ist im Vergleich mit den rund 4,3 mSv an durchschnittlicher Strahlungsbelastung immer noch sehr wenig.

Hilfe zu A13: Diese Angabe ist unvollständig und daher nicht sinnvoll. Es muss auch immer die Menge angegeben werden, weil die doppelte Menge natürlich auch doppelt so stark strahlt.

Hilfe zu A14: In Tabelle 3 siehst du, dass die maximale Strahlendosis bei der Apollo 17-Mission auftrat. Diese entspricht ungefähr der zweifachen Äquivalentdosis der Österreicher (Abb. 9), liegt aber immer noch weit unter den erlaubten 20 mSv (Tab. 4) für medizinisch-technisches Personal. Wenn man also z. B. in einem Röntgenlabor arbeitet, bekommt man im Jahr eventuell eine höhere Dosis ab als bei einem Flug zum Mond.

Hilfe zu A15: Damit ist gemeint, dass nach 6 Jahren nur mehr die Hälfte des medizinischen Wissens gültig ist. Das ist wahrscheinlich übertrieben, hat aber einen wahren Kern: neue Techniken führen relativ rasch zu neuen Erkenntnissen. Würdest du gerne zu einem Arzt gehen, der vor 30 Jahren das Studium beendet und sich seitdem nicht mehr fortgebildet hat? Sicher nicht!



Hilfe zu A16:

Abb. 15 (Grafik: Martin Apolin)

Hilfe zu A17: Tabelle 6 zeigt die Leistungsabgabe beider Varianten. Variante b startet zwar mit halber Leistung, diese sinkt aber langsamer ab. Bereits nach zwei Jahren sind die Leistungen gleich, nach 6 Jahren ist sie bereits 16-mal so groß. Deshalb sollte man Variante b wählen.

Jahr	1	2	3	4	5	6
rel. Leistung Variante a	1	1/4	1/16	1/64	1/256	1/1024
rel. Leistung Variante b	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64

Tab. 6: Relative Leistungen bei den Varianten a und b.

Hilfe zu A18 a: Kohlenstoff hat ein Atomgewicht von 12,011 (siehe Abb. 13). Ein Mol Kohlenstoff ($6 \cdot 10^{23}$ Teilchen) hat daher 12,011 g und 1 g somit $6 \cdot 10^{23} / 12,011 = 4,995 \cdot 10^{22}$ Teilchen. C-14 hat eine relative Häufigkeit von $1,3 \cdot 10^{-12}$. In 1 g des extrahierten Kohlenstoffs befinden sich daher $4,995 \cdot 10^{22} \cdot 1,3 \cdot 10^{-12} = 6,49 \cdot 10^{10}$ C-14-Atome.

Hilfe zu A18 b: Berechnen wir zunächst $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$. Wenn man für $T_{1/2}$ 5730 Jahre einsetzt, bekommt man $\lambda = 3,836 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$. Wie viele C-14-Atome zerfallen pro Gramm Kohlenstoff in einer Minute?

$$N(60s) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = 6,49 \cdot 10^{10} \cdot e^{-3,836 \cdot 10^{-12} \cdot 60} = 6,48999999851 \cdot 10^{10}. \text{ Daraus folgt } N_0 - N(60s) = 6,49 \cdot 10^{10} - 6,48999999851 \cdot 10^{10} = 14,9.$$

Hilfe zu A18 c: Im Gewebe sind also nur mehr $(8/14,9) \cdot 100 = 53,7 \%$ des ursprünglichen C-14 vorhanden. Daher gilt $0,537 = 1 \cdot e^{-\lambda t}$, $\ln(0,537) = -\lambda t$ und schließlich $t = \frac{\ln(0,537)}{-\lambda} = 1,621 \cdot 10^{11} \text{ s}$, und das entspricht etwa 5140 Jahren.

Hilfe zu A19: 55.000 Jahre entsprechen rund 10 Halbwertszeiten. Es ist dann also nur mehr 1/1024 des Ausgangsstoffs vorhanden. Es ereignen sich somit pro Gramm Kohlenstoff nicht 14,9 Zerfälle pro Minute, sondern nur mehr rund 0,0146 Zerfälle in der Minute, also etwa 21 Zerfälle am ganzen Tag. Das ist so wenig, dass man die Bestimmung nicht mehr exakt durchführen kann.