

46 Energie aus den Atomkernen

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand September 2012)

Kernspaltung

A1 Versuche den Massendefekt (siehe Abb. 3) mit möglichst einfachen Worten zu beschreiben und auch zu begründen. Hilf dir mit Abb. 1!

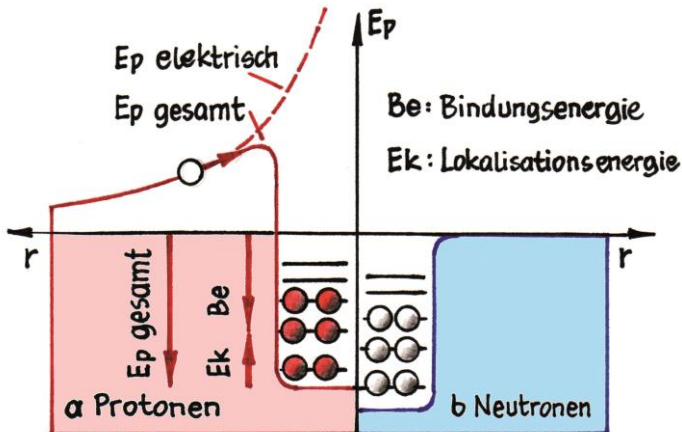


Abb. 1: Schematische Darstellung der Energien beim „Zusammenbau“ von Atomkernen am Beispiel von C-12 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 44.11, S. 57).

A2 Bei Kernspaltungen werden auch immer Neutronen frei (siehe Abb. 4). Überlege mit Hilfe von Abb. 2, warum das so ist.

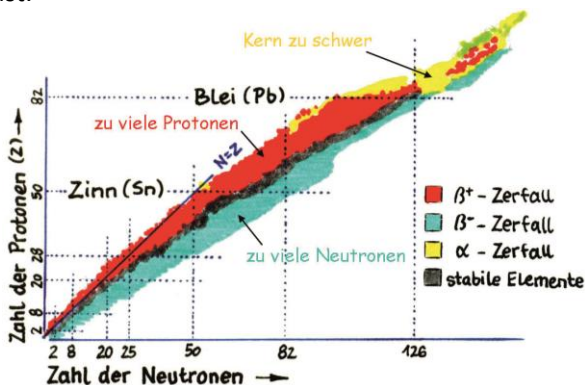


Abb. 2: Eine Nuklidkarte, also eine grafische Darstellung aller bekannten Atomkerne. Horizontal sind die Isotope eines Elements zu finden (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 45.3, S. 59).

A3 a Was versteht man unter einem Elektronvolt?

A3 b Rechne die Bindungsenergie eines Deuterons (also des Kerns eines Deuterium-Atoms) in Elektronvolt um. Hilf dir

dabei mit Tab. 1 und der Antwort auf A3 a. Verwende weiter die Gleichung $\Delta E = \Delta mc^2$.

	Masse in u	Kernladungszahl Z	Neutronenzahl N	Nukleonenzahl 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 1: 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)

A3 c Die Bindungsenergie von Molekülen liegt im Bereich von einigen Elektronvolt. Vergleiche diese Bindungsenergie mit der von Atomkernen. Verwende dazu das Ergebnis aus A3 b und Abb. 3. Welchen Schluss kannst du daraus ziehen?

A4 Ein kg Heizöl hat einen Brennwert von $4 \cdot 10^7$ J. Wie groß ist der "Brennwert" von 1 kg Uran? Wie kann man den Unterschied begründen? Überlege zur Berechnung folgendermaßen: Beim „Zusammenbau“ eines Uran-235-Kerns beträgt der Massendefekt der verwendeten "Bausteine" etwa 0,8 % (Abb. 3), bei mittelschweren Kernen wie Rubidium-96 oder Cäsium-137 aber etwa 0,9 %. Wenn also Urankerne in mittelschwere Kerne zerfallen (Abb. 4), wird Masse und somit auch Energie frei.

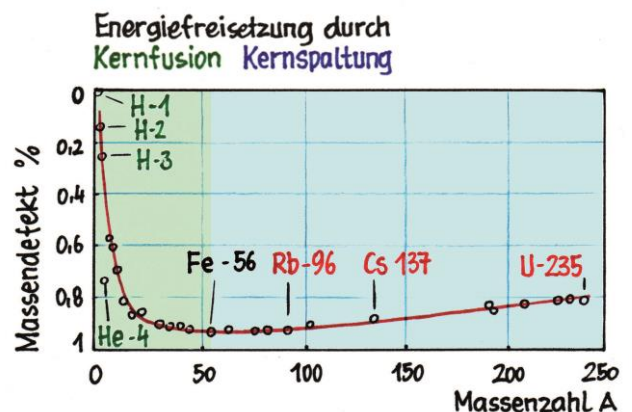


Abb. 3 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 44.13, S. 58)

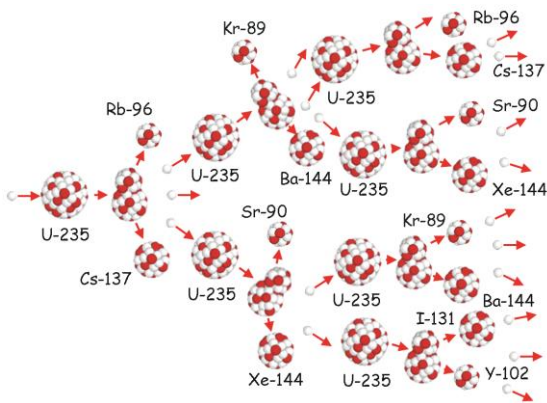


Abb. 4: Es gibt viele Möglichkeiten, welche Tochterkerne beim Zerfall eines Urankerns entstehen. Bei allen Zerfallsprodukten handelt es sich aber um mittelschwere Kerne (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 46.4, S. 67).

A5 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 diese 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.

A5 b Nimm an, ein Kind trinkt jeden Tag einen Liter Milch (siehe A5 a). Wie groß ist die gesamte zusätzliche Strahlungsbelastung in einem Jahr, wenn die Milch genau den erlaubten Grenzwert besitzt? Vergleiche mit der durchschnittlichen jährlichen Äquivalentdosis der Österreicher (siehe Abb. 5).

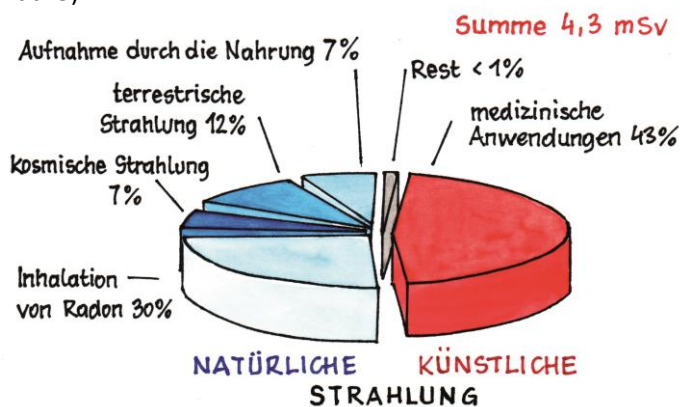


Abb. 5: Die durchschnittliche jährliche Äquivalentdosis der Österreicher (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 45.12, S. 62).

A6 Durch eine Kombination aus menschlichem Versagen und Konstruktionsfehlern kam es 1986 im ukrainischen Atomkraftwerk Tschernobyl (Abb. 6) zu einer unkontrollier-

ten 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." Sind diese Angaben sinnvoll?

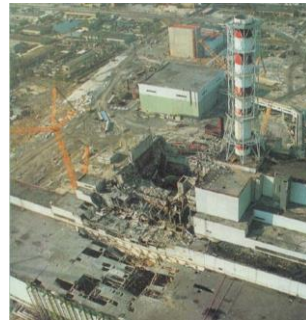


Abb. 6: Das Kraftwerk in Tschernobyl nach der Explosion (Quelle: Wikipedia).

A7 Beschreibe möglichst einfach die Funktionsweise eines Atomkraftwerks.

A8 Der "Erntefaktor" ist eine Kennziffer zur Beschreibung der Effizienz eines Kraftwerks oder einer Energiequelle. Er beschreibt das Verhältnis der genutzten Energie zur investierten Energie. Die "energetische Amortisationszeit" ist diejenige Zeit, nach der der kumulierte Energieaufwand beim Bau bzw. der Produktion gleich der genutzten Energie wird. Er gibt also die Zeit an, wie lange eine energieliefernde Anlage in Betrieb sein muss, bis sie unter dem Strich genauso viel Energie abgegeben hat, wie für ihre Produktion nötig war. Interpretiere die Daten in Tabelle 2.

Typ	Erntefaktor	Amortisationszeit
Atomkraftwerk (Druckwasserreaktor)	120	2 Monate
Gaskraftwerk (Erdgas)	28	9 Tage
Laufwasserkraftwerk	50	1 Jahr
Windkraftwerk (günstige Lage)	50	1 bis 6 Monate
Solarzellen (Dachinstallation, Süddeutschland)	3,0	7 Jahre

Tab. 2: Geschätzte Werte für den Erntefaktor und die energetische Amortisationszeit. Die Werte sind als Größenordnungen zu sehen, weil ihre Angaben in der Literatur sehr schwanken.

A9 Manchmal wird der Mythos von der CO₂-freien Atomkraft strapaziert. Was ist falsch daran?

A10 Auf gutefrage.net fragt ein User (Text aus dem Original übernommen): "Guten tag von meinem Fenster aus kann ich das Atomkraftwerk Grohnde betrachten. Es kommt grad unheimlich viel Rauch aus dem Akw muss ich mir sorgen machen? und ist der rauch schädlich? Viele Grüße". Was kommt aus dem Kraftwerk? Muss man sich unter normalen Umständen Sorgen machen? Verwende dazu die beiden Abbildungen unten.



Abb. 7: Das Atomkraftwerk Grohnde in Deutschland (Quelle: Wikipedia).

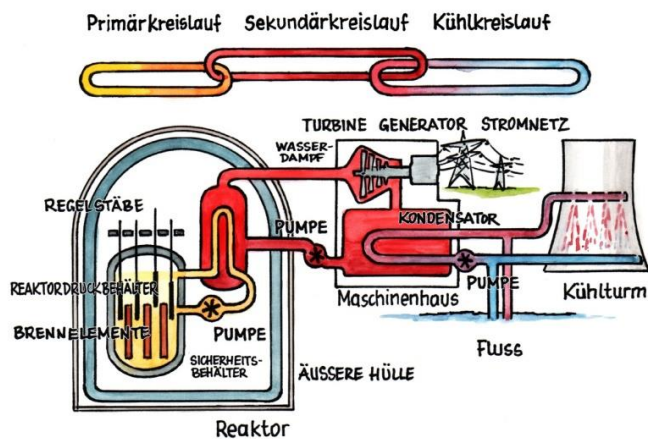


Abb. 8: Schematische Darstellung eines Druckwasserreaktors (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 46.6, S. 68).

A11 Vorinformation 1 (siehe auch Kap. 46.1, BB8): Die Energiedosis gibt an, wie viel der menschliche Körper von einer radioaktiven Strahlung absorbiert!

Einheit: J/kg = Gy (Gray)

Die biologische Wirkung wird aber auch von der Strahlungsart beeinflusst. Deshalb wurden experimentelle Werte für die relative biologische Wirkung (RBW) ermittelt. Für Röntgen-, β - und γ -Strahlung liegt die RBW bei 1, für α -Strahlung bei 20. Bei gleicher Energiedosis ist α -Strahlung 20-mal so schädlich wie β - und γ -Strahlung. Den im Körper angerichteten „Schaden“ gibt die Äquivalentdosis an.

Äquivalentdosis = Energiedosis · RBW

Einheit: J/kg = Sv (Sievert)

Vorinformation 2: Im März 2011 ereignete sich im japanischen Kernkraftwerk Fukushima eine Nuklearkatastrophe, die durch ein Erdbeben ausgelöst worden war. In drei der sechs Reaktorblöcke kam es zur Kernschmelze. Große Mengen an radioaktivem Material – rund 10 bis 20 Prozent der radioaktiven Emissionen von Tschernobyl – wurden freigesetzt und kontaminierten Luft, Böden, Wasser und Nahrungsmittel in der Umgebung.

a Jeder weiß, dass radioaktive Strahlung schädlich ist. Aber was passiert dabei eigentlich im Körper? Hilf dir mit den Abbildungen 9 und 10.

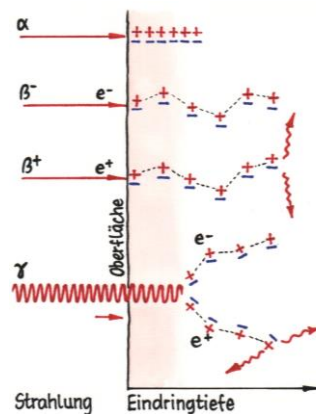


Abb. 9: Vereinfachte Wirkung radioaktiver Strahlung (siehe auch Abb. 45.10, S. 62)

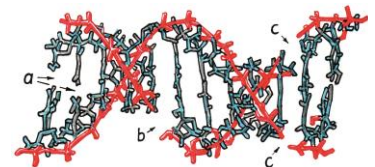


Abb. 10: Beschädigungen der Desoxyribonukleinsäure (siehe auch Abb. 45.11, S. 62; beide Grafiken: Janosch Slama).

b Beim Festlegen der Evakuierungszone am 12. März hatte die japanische Regierung eine maximale Strahlungsbelastung von 50 Millisievert pro Jahr (mSv/a) zugrunde gelegt. Bei erwarteten Werten zwischen 10 und 50 mSv/a sollen die Anwohner ihre Häuser nicht verlassen. Was ist zu diesen Werten zu sagen? Hilf dir mit Abb. 11 und Tab. 3!

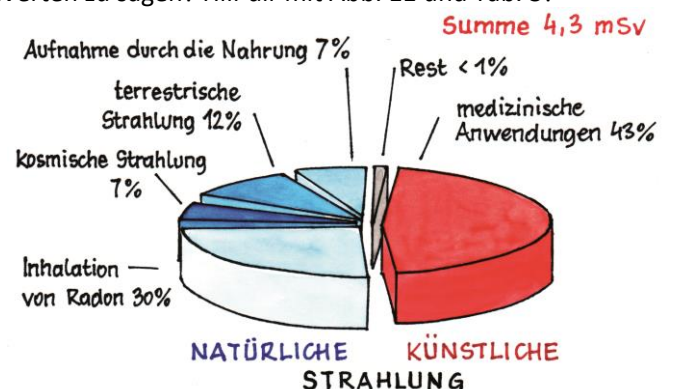


Abb. 11: Die durchschnittliche jährliche Äquivalentdosis der Österreicher (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 45.12, S. 62).

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
akute Dosis bis 50 mSv	Spitzenwert der stündlichen Dosis im Zentrum des äußeren Strahlungsgürtels (Van-Allen)	tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +2,5 je 1000 Menschen
akute Dosis bis 200 mSv	Spitzenwert der stündlichen Dosis im Zentrum des inneren Strahlungsgürtels (Van-Allen)	tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +10 je 1000 Menschen
akute Dosis 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
akute Dosis 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
akute Dosis 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
akute Dosis 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
akute Dosis > 100 Sv		sofortiger Tod

Tab. 3 Äquivalentdosis mit Beispiel und Wirkung

c Der Grenzwert für männliche Kraftwerksarbeiter in Notfallsituationen wurde am 15. März von 100 auf 250 mSv pro Jahr heraufgesetzt. Was ist zu diesem Wert zu sagen? Verwende dazu Tab. 3!

d Bei einem der hoch belasteten Arbeiter wurden Iod-131-Aktivitäten in der Schilddrüse festgestellt. Die daraus entstandene Gesamtdosis lag bei 678 mSv. Wie ist diese Dosis einzuschätzen? Der Arbeiter hatte keine Iodtabletten genommen. Warum war das sehr ungünstig?

Kernfusion

A12 Ohne Tunneleffekt könntest du nicht leben! Was ist damit gemeint?

A13 Begründe den Tunneleffekt einerseits mit Hilfe der Unschärferelation und andererseits mit Hilfe der Wellenfunktion. Verwende für den zweiten Fall Abb. 12. Was hat dieser Effekt mit Kernfusion zu tun? Hilf dir mit Abb. 13!

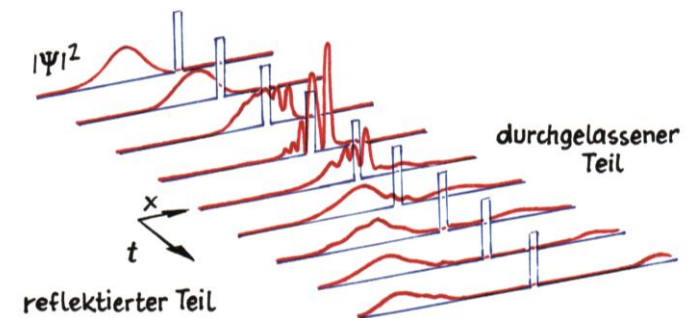


Abb. 12: Ein Quant läuft gegen eine Potenzialschwelle. Weil man dem Quant auf Grund der Unschärfe keine Bahn zuordnen kann, ist die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\Psi|^2$ eingezeichnet. Du siehst, dass ein Teil der Welle reflektiert und ein Teil durchgelassen wird. Was bedeutet das aus der Sicht des Quants?

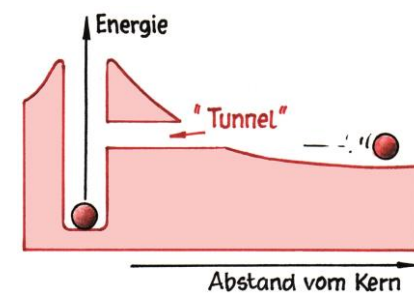


Abb. 13: Ein Proton tunnelt durch die Potenzialbarriere eines anderen Protons (Grafik: Janosch Slama).

A14 Wieso wären zur Kernfusion *ohne* Tunneleffekt extrem hohe Temperaturen notwendig? Was passiert überhaupt bei der Kernfusion und welche Grundkräfte spielen dabei eine Rolle? Hilf dir mit Tabelle 4.

Wechselwirkung	Austausch-Teilchen	Reichweite in m
starke	8 Gluonen	10^{-15}
elektromagnetische	Photon	∞
schwache	W^+, W^-, Z^0	10^{-18}
gravitative	Graviton	∞

Tab. 4: Die vier fundamentalen Wechselwirkungen bzw. Kräfte und ihre Reichweite.

A15 a Tabelle 5 zeigt die Tunnelwahrscheinlichkeit (letzte Spalte) für den Fall, dass sich zwei Protonen zentral bis auf

einen bestimmten Abstand annähern (erste Spalte). In der mittleren Spalte ist die Energie angegeben, die das aufprallende Proton benötigt, um auf den Abstand x an das andere Proton heranzukommen. Es wird hier angenommen, dass die Kernkraft bei 10^{-15} m zu wirken beginnt. Klassisch gesehen wäre für eine Fusion etwa 1 MeV nötig. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Tunnelwahrscheinlichkeit und der Energie des Protons?

Abstand x in 10^{-12} m	Energie in keV	Tunnelwahrscheinlichkeit
0,2	14	$9 \cdot 10^{-7}$
0,5	5,8	$1,6 \cdot 10^{-10}$
1	2,9	$9 \cdot 10^{-15}$
2	1,4	$9 \cdot 10^{-21}$

Tabelle 5: Tunnelwahrscheinlichkeit (letzte Spalte) in Abhängigkeit des Abstands der beiden Protonen (erste Spalte). (Quelle: Lehrstuhl für Didaktik der Physik der LMU München, milq.tu-bs.d).

A15 b Wie viele Protonen müssen sich statistisch gesehen auf einen Abstand von $0,2 \cdot 10^{-12}$ m einem anderen Proton nähern, damit eines den Potenzialberg durchtunneln kann? Sieh in Tabelle 5 nach!

A15 c Erstelle mit einem Tabellenkalkulationsprogramm ein Diagramm, in dem du auf der x-Achse den Abstand x der Protonen und auf der y-Achse die Tunnelwahrscheinlichkeit einträgst. Welche Skalierung sollte für die y-Achse sinnvoller Weise gewählt werden?

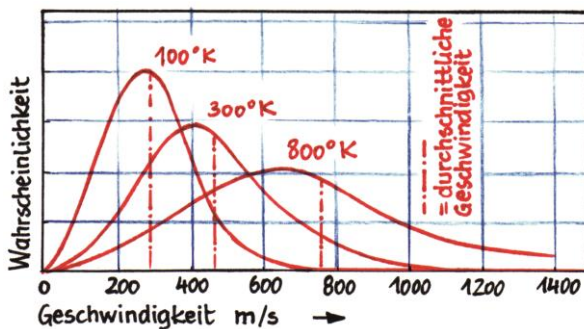


Abb. 14: Maxwell-Geschwindigkeitsverteilung der N_2 -Moleküle bei verschiedenen Temperaturen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 14.4, S. 135, BB7).

A16 a Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung oder auch Maxwell-Boltzmann-Verteilung (Abb. 14) ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung in der statistischen Physik. Sie beschreibt die Häufigkeit des Betrags der Teilchengeschwindigkeiten in einem idealen Gas. Welche qualitativen Aussagen kann man zur Abbildung treffen und wie kann man sie

begründen? Warum ist die durchschnittliche Geschwindigkeit der Teilchen nicht identisch mit dem Maximum der Geschwindigkeitsverteilung?

A16 b In Abb. 15 siehst du, bei welcher Protonen-Energie die größte Wahrscheinlichkeit für die Fusion von Protonen in der Sonne auftritt. Man nennt das den Gamow-Peak. Welcher Zusammenhang besteht zu Abb. 14? Wie kann man das Phänomen gemeinsam mit Tabelle 5 erklären?

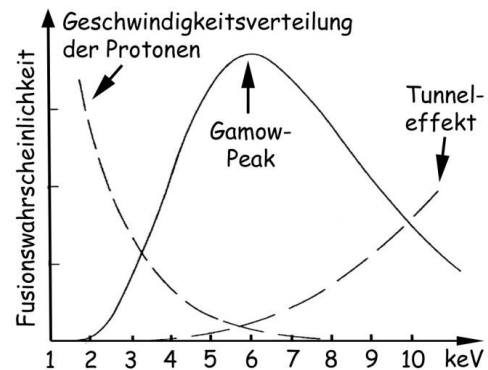


Abb. 15: Der Gamow-Peak bei der Fusion von Protonen in der Sonne (Grafik: Martin Apollin).

A17 a Was hat mehr "Brennwert"? Ein Kilogramm H-1 bei der Fusion zu He-4 oder ein Kilogramm U-235? Schätze mit Hilfe von Abb. 3 ab! Vergleich mit dem Brennwert von 1 kg Heizöl, der $4 \cdot 10^7$ J beträgt (siehe auch A4).

A18 In der ersten Auflage von Big Bang 8 war Abb. 16 zu sehen. Auf dem Bild ist eine "ungünstige" Beschriftung zu sehen, deshalb wurde es später ausgetauscht. Um welche Beschriftung handelt es sich?

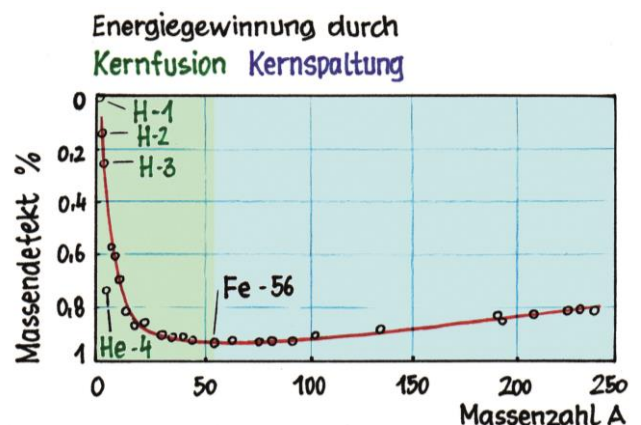


Abb. 16 (Grafik: Janosch Slama)

A19 Du stehst an einem wunderschönen Abend in der Natur und beobachtest den Sonnenuntergang. Du hast aber keine romantischen Gefühle und schätzt lieber ab, wie viele Sonnenneutrinos jede Sekunde pro cm^2 durch deinen Körper fliegen. Gehe dazu folgendermaßen vor:

a Die Sonne hat eine Leistung von $3,9 \cdot 10^{26}$ W. Die Proton-Proton-Reaktion in Abb. 17 macht rund 90 % der Fusionsvorgänge in der Sonne aus. Gehe vereinfacht von 100 % aus. Bei dieser Reaktion werden (inklusive der Zerstrahlung der Positronen e^+) in Summe $4,2 \cdot 10^{-12}$ J an Energie freigesetzt. Wie viele solcher Reaktionen müssen daher pro Sekunde in der Sonne ablaufen? Wie viele Neutrinos (ν_e) werden dabei freigesetzt?

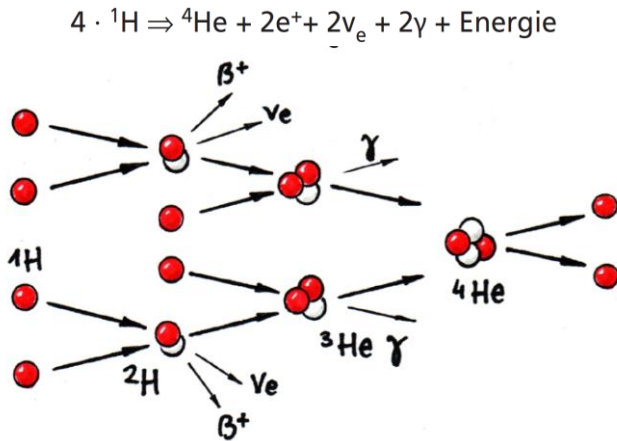


Abb. 17: Die Proton-Proton-Reaktion, die in unserer Sonne über 90 % der freigesetzten Energie ausmacht (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 46.15, S. 71, BB8).

b Der Abstand Erde-Sonne beträgt etwa 150 Milliarden Meter. Schätze ab, wie viele Neutrinos pro Sekunde auf der Erde durch einen Quadratzentimeter Fläche fliegen, der normal zur Achse Erde-Sonne steht. Diese Anzahl fliegt daher auch durch jeden Quadratzentimeter deines Körpers.

A20 a Wie viel Masse verliert die Sonne jede Sekunde auf Grund des Massendefekts? Verwende die Daten aus A19a.

A20 b Welche Seitenlänge hätte ein „Wasserwürfel“ mit dieser Masse?

A20 c Müsste die Sonne durch diesen extremen Massenverlust nicht dahinschwinden wie Butter in der Sonne? Schätze ab, welchen Teil ihrer Masse sie im Laufe ihres Lebens verliert. Die aktuelle Masse der Sonne liegt bei $2 \cdot 10^{30}$ kg. Verwende für die Abschätzung Tabelle 6 und das Ergebnis aus A20 a.

Phase	Dauer in 10^6 a	Dauer in %	relative Leuchtkraft	relativer Radius
Hauptreihenstern (2)	11.000	88,49	0,7–2,2	0,9–1,6
Übergangsphase (3)	700	5,63	2,3	1,6–2,3
Roter Riese (4)	600	4,83	2,3–2300	2,3–166
Beginn des He-Brennens (5)	130	1,04	44–2000	10–130
instabile Phase (6)	0,4	0,003	500–5000	50–200
Übergang zu Weißem Zwerg (7)	0,1	0,001	3500–0,1	100–0,08
Summe	12.430	100		

Tab. 6: Die Phasen der Sonne. Die relativen Werte sind auf die heutige Sonne bezogen (siehe auch Tab. 48.2, S. 94).

A21 a Berechne die Gesamtmasse der Meere. Nimm dazu an, dass diese $2/3$ der Erdoberfläche ausmachen und im Schnitt 4 km tief sind. Der Radius der Erde beträgt $6,37 \cdot 10^3$ km.

A21 b Schätze mit Hilfe des Ergebnisses aus A21 a ab, wie viele Wasserstoffatome sich in den Meeren befinden und wie viele davon Deuterium-Atome sind. Ein Mol hat $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Verwende Tabelle 1 und Abb. 18.

Ordnungszahl	Symbol
1	H
Name	Wasserstoff
Atomgewicht	1,0079
Elektronen-konfiguration	1
	Elektronegativität 2,1

Abb. 18
(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
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

A21 c Eine typische Nettoreaktion in einem Fusionsreaktor lautet $3 \cdot {}^2\text{H} = {}^4\text{He} + n + p + 21,6$ MeV. Wie lange würde der Vorrat an Deuterium aus dem Meerwasser reichen, um den derzeitigen Energiebedarf der Menschen (etwa 10^{13} J/s) durch Fusionsenergie zu decken? Ein eV entspricht der Energiemenge von $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Verwende das Ergebnis aus A21 b!

A22 Durch die Kernfusion in Sternen werden quasi schwere Elemente erbrütet. Bei Eisen ist allerdings Endstation (siehe Abb. 19). Warum entstehen nicht auch höhere Elemente? Erkläre mit Hilfe von Abb. 3!

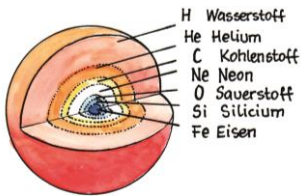


Abb. 19: Typische Schalenstruktur eines alten Sterns sehr großer Masse (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 48.14, S. 95)

Kernwaffen

A23 a Was versteht man unter der kritischen Masse? Warum muss es diese zwangsläufig geben, wenn du Abb. 4 betrachtest? Beim Zerfall von Uran-235 werden übrigens im Schnitt 2,4 Neutronen frei.

A23 b Wie viel Prozent der beim Zerfall von Uran-235 frei werdenden Neutronen müssen mindestens eine neue Spaltung auslösen, damit die kritische Masse überschritten ist?

Phase	Dauer in 10^6 a	Dauer in %	relative Leuchtkraft	relativer Radius
Hauptreihenstern (2)	11.000	88,49	0,7–2,2	0,9–1,6
Übergangsphase (3)	700	5,63	2,3	1,6–2,3
Roter Riese (4)	600	4,83	2,3–2300	2,3–166
Beginn des He-Brennens (5)	130	1,04	44–2000	10–130
instabile Phase (6)	0,4	0,003	500–5000	50–200
Übergang zu Weißem Zwerg (7)	0,1	0,001	3500–0,1	100–0,08
Summe	12.430	100		

Tab. 7 zu A23: Die Phasen der Sonne. Die relativen Werte sind auf die heutige Sonne bezogen (siehe auch Tab. 48.2, S. 94; die Zahlen beziehen sich auf Abb. 20 rechts oben).

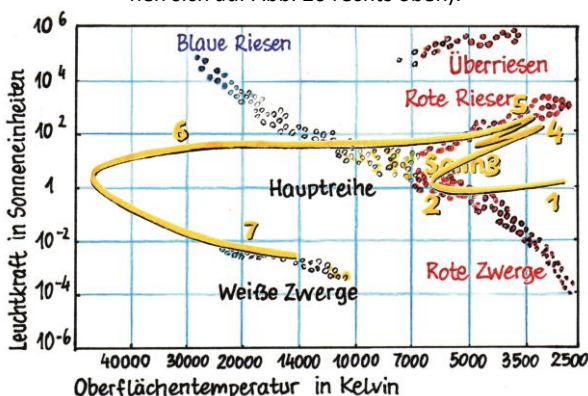


Abb. 20 zu A23: Vereinfachte Darstellung des Wegs, den die Sonne im Laufe ihres Lebens durch das Hertzsprung-Russel-Diagramm nimmt (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 48.10, S. 93).

A24 a Im Film „Sunshine“ (2007) ist die Sonne im Jahr 2057 im Begriff zu erlöschen. Es kommt zum solaren Winter, in Folge dessen die Erde langsam einfriert und mit ihr alles Leben und die Hoffnung auf ein Fortbestehen der Menschheit.

Könnte das tatsächlich passieren? Lies nach in Kap. 49 oder verwende für deine Antwort Tab. 7 und Abb. 20.

A24 b Ein Team von Wissenschaftlern versucht in diesem Film, die Fusion der Sonne durch eine Atombombe mit der Größe Manhattans (was immer das auch bedeuten soll) wieder anzufachen. Nimm an, dass Manhattan rund 22 km lang ist, etwa 3 km breit und nimm auch noch eine Tiefe von 1 km dazu. Nimm an, dass die Bombe voll mit Uran-235 ist. Ein Kilogramm Uran hat eine Dichte von 19160 kg/m^3 . Welche Uran-Masse ergibt sich dadurch? Wie realistisch ist der Bau einer solchen Bombe? Verwende für deine Überlegungen Tab. 8 und 9.

Rang	Land	Reserven	Anteil in %
1.	Australien	709.000	40,1
2.	Kanada	270.100	15,3
3.	Kasachstan	235.500	13,3
4.	Brasilien	139.600	7,9
5.	Südafrika	114.900	6,5
	Rest	297.300	16,9
	Welt	1.766.400	100,0

Tab. 8: Aufgeführt sind die Länder mit den größten Uranreserven 2008 (in Tonnen) und deren Anteil an den Weltreserven (in Prozent). Unter Reserven versteht man die zu gegenwärtigen Preisen und mit heutigen Fördertechnologien gewinnbare Menge an Rohstoffen.

Isotop	Vorkommen	Halbwertszeit
U-234	0,0055 %	$2,455 \cdot 10^5 \text{ a}$
U-235	0,72 %	$7,038 \cdot 10^8 \text{ a}$
U-236	in Spuren	$23,42 \cdot 10^6 \text{ a}$
U-238	99,27 %	$4,468 \cdot 10^9 \text{ a}$

Tab. 9: Liste der Isotope von Uran

Hilfe zu A1: Als Massendefekt bezeichnet man den Unterschied zwischen der Summe der Einzelmassen aller Nukleonen und der tatsächlich gemessenen Gesamtmasse des Atomkerns. Warum ist aber die Masse geringer? Weil das Nukleon nach dem "Einbau" eine geringere potenzielle Energie hat. Nach $\Delta m = \Delta E/c^2$ hat diese Energie aber eine Masse, und daher verliert das Nukleon gleichzeitig mit der Energie etwas Masse. Wie geht die Energie verloren? Sie wird in Form von elektromagnetischen Wellen abgestrahlt.

Hilfe zu A2: Trifft ein Neutron zum Beispiel auf U-235, wird der Kern instabil (siehe Abb. 4). Er beginnt zu schwingen und zerfällt in zwei mittelschwere Kerne. Schwere Atomkerne besitzen überproportional viele Neutronen, wie man in Abb. 2 erkennen kann. Dort ist die Linie $N = Z$ eingezeichnet, und du siehst, dass hohe Elemente deutlich unter dieser Linie liegen, also überproportional viele Neutronen besitzen. Diese wirken als zusätzlicher „Kitt“. Für die leichteren Tochterkerne werden nicht alle Neutronen benötigt. Deshalb werden bei der Kernspaltung auch immer Neutronen frei, die weitere Kerne spalten können.

Hilfe zu A3 a: Darunter versteht man die potenzielle Energie eines einzigen Elektrons, wenn dieses im Spannungsfeld von 1 V verschoben wird. Seine Energie beträgt dann $E_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$.

Hilfe zu A3 b: Deuterium (${}^2_1\text{H}$) hat eine Masse von 2,01410 u (siehe Tab. 1). Proton, Neutron und Elektron haben in Summe 1,00728 u + 1,00867 u + 0,00055 u = 2,0165 u. Beim "Zusammenbauen" wird also eine Masse von 0,0024 u bzw. $100 \cdot (0,0024 \text{ u} / 2,01410 \text{ u}) = 0,119 \%$ frei. Die atomare Masseneinheit u hat den Wert $1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (siehe Legende Tab. 1). Der Massendefekt beträgt absolut $0,0024 \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,985 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$. Er entspricht der Bindungsenergie des Deuterons, weil man diese aufwenden muss, wenn man die Nukleonen wieder trennen will. Somit ist $\Delta E = \Delta mc^2 = 3,985 \cdot 10^{-30} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J} \approx 3,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, und das entspricht umgerechnet $2,24 \cdot 10^6 \text{ eV}$ (siehe A3 a).

Hilfe zu A3 c: Der Massendefekt der schweren Kerne liegt bei etwa 0,8 bis 0,9 % und ist somit noch einmal um eine Größenordnung größer als der von Deuterium. Wenn die Bindungsenergie von Molekülen einige eV betragen kann, dann ist die Bindungsenergie von Kernen auf jeden Fall um den Faktor 10^6 größer. Daher sind

Kernumwandlungsprozesse auch wesentlich energiereicher als chemische Prozesse.

Hilfe zu A4: Beim „Zusammenbau“ eines U-235-Kerns beträgt der Massendefekt etwa 0,8 %, bei mittelschweren Kernen aber etwa 0,9 %. Wenn in 1 kg U-235 alle Kerne zerfallen sind, hat sich die Masse somit um etwa 0,1 % oder 1 g verringert. Die freigesetzte Energie beträgt daher $E = mc^2 = 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$.

Ein kg Heizöl hat einen Brennwert von $4 \cdot 10^7 \text{ J}$. Der "Brennwert" von einem kg Uran ist daher um den Faktor $9 \cdot 10^{13} \text{ J} / 4 \cdot 10^7 \text{ J} \approx 2 \cdot 10^6$ größer. Wie kann man das erklären? Die Bindungsenergie von Kernen ist um den Faktor 10^6 größer als die Bindungsenergie in Molekülen. Daher sind Kernumwandlungsprozesse auch wesentlich energiereicher als chemische Prozesse (siehe auch A3).

Hilfe zu A5 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 A5 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 A6: Diese Angabe ist unvollständig und daher nicht besonders sinnvoll. Es muss auch immer die Menge angegeben werden, weil die doppelte Menge natürlich auch doppelt so stark strahlt.

Hilfe zu A7: Die bei der Kernspaltung frei werdende Energie dient letztlich zur Erzeugung von Wasserdampf, der wiederum Turbinen zur Stromerzeugung antreibt. Kernkraftwerke sind Wärmekraftwerke.

Hilfe zu A8: Atomkraftwerke haben einen sehr hohen Erntefaktor. Das ist klarerweise Wasser auf den Mühlen der Atomkraftbefürworter. Natürlich sind die Probleme bei der Lagerung der alten Brennstäbe und die Gefahr von Atomunfällen aus dieser Tabelle nicht herauszulesen. Günstig sind auch Wasser- und Windkraftwerke. Zusätzlich sind diese

auch relativ umweltschonend. Schlecht steigen momentan noch die Solarzellen aus, weil sie einen relativ geringen Erntefaktor und zusätzlich eine relativ lange Amortisationszeit aufweisen.

Hilfe zu 9: Auch bei der „Atomstrom-Produktion“ entsteht CO_2 , und zwar deshalb, weil man während der gesamten Produktionskette Uranabbau, Urananreicherung, Brennelemente-Produktion, Transport usw. Energie benötigt. Die CO_2 -Emission ist zwar geringer als bei der Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken, jedoch höher als bei erneuerbaren Energieformen wie z. B. Wind.

Hilfe zu A10: Wenn wir einmal davon ausgehen, dass das Kraftwerk nicht tatsächlich gebrannt hat, dann hat der User Rauch mit Dampf verwechselt. Die charakteristischen Türme sind Kühltürme, und das, was aus ihnen herauskommt, ist daher ganz normaler Wasserdampf. Weil der Kühlkreislauf komplett unabhängig ist, kann das Wasser unter normalen Bedingungen auch nicht gefährlich sein. Das Atomkraftwerk erzeugt also quasi Wolken!

Hilfe zu A11 a: Das Eindringen der Strahlung führt zur Erzeugung von Ionen (Abb. 9), indem etwa Elektronen aus den Atomhüllen abgelöst werden. Deshalb spricht man auch von ionisierender Strahlung. Weiters kommt es zur Spaltung von Molekülen und zur Erzeugung von freien Radikalen. Das sind chemisch sehr aggressive Molekülteile mit ungepaarten Elektronen. Wird das Zellplasma von radioaktiver Strahlung getroffen, hat das meist keine Folgen. Wird aber die DNS im Zellkern getroffen, kann es zu bleibenden Schäden kommen (Abb. 10). Kann sich die Zelle nicht reparieren, stirbt sie oder mutiert gar zu einer Krebszelle. Befinden sich die Zellen gerade in Teilung, so ist eine Reparatur generell nicht möglich. Deshalb sind zellbildende Organe sehr strahlungsempfindlich, etwa Knochenmark oder Lymphknoten. Auch Embryos und Kinder im Wachstum sind deshalb besonders gefährdet.

Hilfe zu A11 b: Die durchschnittliche jährliche Äquivalentdosis der Österreicher beträgt etwa 4,3 mSv. Den Menschen rund um Fukushima wurde also eine Dosis zugemutet, die etwa 12-mal so hoch ist wie die in Österreich (Abb. 11). Diese Dosis ist 2,5-mal so hoch wie die erlaubte jährliche Grenzdosis in Österreich für medizinisch-technisches Personal (siehe Tab. 3). Das Krebsrisiko erscheint nicht so hoch zu sein, aber immerhin wächst es um 0,25 %. Anders gesagt: Von 2000 Menschen sterben immerhin 5 an Krebs.

Hilfe zu A11 c: Diese Dosis ist bereits 12,5-mal so hoch wie die erlaubte jährliche Grenzdosis in Österreich für medizinisch-technisches Personal (siehe Tab. 3). Das tödliche Krebsrisiko steigt bereits um mehr als 1 % an.

Hilfe zu A11 d: In diesem Fall steigt das tödliche Krebsrisiko bereits auf einen Wert zwischen 2,5 und 5 % an. Von 1009 Arbeitern mit dieser Verstrahlung würden also zwischen 25 und 50 später an Krebs versterben. Kaliumiodid (umgangssprachlich als „Iodtabletten“ bezeichnet) wird bei Unfällen in kerntechnischen Anlagen vorbeugend verabreicht. Das Kaliumiodid wird von der Schilddrüse aufgenommen und verhindert somit später die Aufnahme radioaktiven Iods.

Hilfe zu A12: Im Inneren der Sonne herrschen eine Temperatur von 16 Millionen Kelvin und ein Druck von einigen hundert Milliarden Atmosphären. Trotz der extremen Bedingungen ist die Sonne im Inneren zu kalt, die kinetische Energie der Kerne also zu gering, dass nach der klassischen Theorie eine Fusion ablaufen könnte. Den entscheidenden Beitrag liefert der Tunneleffekt. Du verdankst dein Leben also unter anderem einem quantenmechanischen Phänomen.

Hilfe zu A13: Der Tunneleffekt ist eine direkte Folge der Energieunschärfe. Das Quant kann sich für einen kurzen Zeitraum Δt die fehlende Energie ΔE ausleihen, um über den Energieberg zu kommen. Letztlich wirkt es aber so, als hätte das Quant den Berg durchtunnelt. Eine andere Argumentation erfolgt mit Hilfe der Wellenfunktion. Diese sinkt nämlich beim Hindernis nicht sofort auf null ab (siehe Abb. 12) und kann daher bis hinter das Hindernis reichen. Das bedeutet, dass es auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit gibt, dass das Quant durch das Hindernis tunnelt. Dieser Effekt liegt bei der Fusion in der Sonne vor (Abb. 13; siehe auch A12). Die Protonen in der Sonne nähern sich nur auf etwa 10^{-12} m an. Die Kernkraft wirkt aber erst ab 10^{-15} m. Trotzdem gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass das Proton den Energieberg durchtunnelt.

Hilfe zu A14: Wie ist es rein prinzipiell möglich, dass Atomkerne fusionieren? Diese sind ja positiv geladen und stoßen einander daher ab! Damit eine Fusion möglich ist, müssen die Kerne extrem hohe kinetische Energien aufweisen. Nur dann kommen sie bei Stößen nahe genug, dass sie von der Kernkraft eingefangen und fusioniert werden. Die Kernkraft wird aber durch die starke Wechselwirkung verursacht, und diese hat wiederum nur eine Reichweite von etwa 10^{-15} m.

So nahe müssen die Kerne kommen, damit die starke Wechselwirkung wirksam wird.

Hilfe zu A15 a: Je kleiner die Energie der Protonen, desto kleiner ist auch die Tunnelwahrscheinlichkeit. Warum? Weil sich dann die Teilchen auf Grund der abstoßenden elektrischen Kraft nicht so stark nähern können. Wenn die Energie etwa von 5,8 auf 2,9 keV absinkt, sich also halbiert, halbiert sich auch der Abstand x , auf den sich die Protonen nähern können. Die Tunnelwahrscheinlichkeit sinkt dabei aber nicht auch auf die Hälfte ab, sondern etwa um einen Faktor 10^{-5} . Die Tunnelwahrscheinlichkeit hängt also sehr sensibel vom erreichten Abstand der Protonen ab.

Hilfe zu A15 b: Die Tunnelwahrscheinlichkeit liegt dann bei $9 \cdot 10^{-7} \approx 10^{-6}$. Nur rund jedes millionste Proton kann daher durchtunneln. Oder umgekehrt gesagt: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Proton in diesem Abstand tunnelt, liegt bei einem Millionstel.

Hilfe zu A15 c: Weil die Tunnelwahrscheinlichkeit viele Größenordnungen umfasst, muss die y-Achse logarithmisch dargestellt werden.

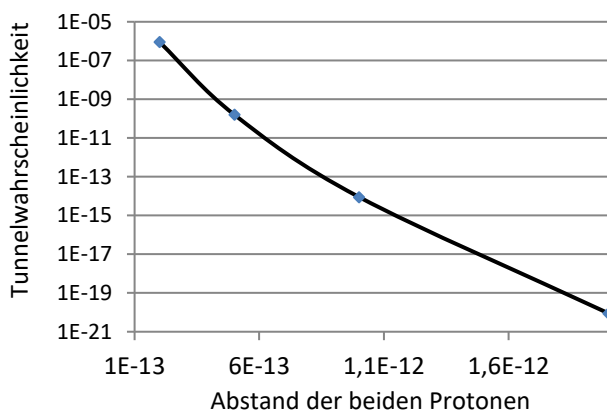


Abb. 21: Grafische Darstellung von Tabelle 5
(Grafik: Martin Apolin)

Hilfe zu A16 a: Erstens kann man aus dem Diagramm herauslesen, dass die Geschwindigkeit der Moleküle mit zunehmender Temperatur größer wird. Wärme bedeutet ja ungeordnete Bewegung der Teilchen. Je höher die Temperatur, desto größer die Wärme, desto heftiger wird die Teilchenbewegung. Zweitens sieht man, dass sich nicht alle Gasteilchen mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. Das ist durch nichtzentrale Zusammenstöße zu erklären, bei denen manche Teilchen abgebremst und manche beschleunigt werden, ähnlich wie beim Billardspiel. Die durchschnittliche Geschwindigkeit ist deshalb nicht beim Maximum der

Kurve, weil die Kurve nicht symmetrisch ist - es gibt etwas mehr schnellere Teilchen.

Hilfe zu A16 b: Die Geschwindigkeitsverteilung der Protonen entspricht dem rechten Teil der Kurve in Abb. 14. In Abb. 15 ist allerdings nicht die Geschwindigkeit aufgetragen, sondern die Energie in Elektronvolt. Tabelle 5 zeigt, dass mit zunehmender Energie die Fusionswahrscheinlichkeit sehr stark anwächst. Das entspricht der rechten strichlierten Kurve mit der Beschriftung Tunneleffekt.

Protonen mit geringerer Geschwindigkeit und somit Energie sind viel häufiger vorhanden, allerdings ist dann die Wahrscheinlichkeit auch geringer, dass sie tunnelt. Protonen mit höherer Geschwindigkeit und Energie sind viel weniger vorhanden, allerdings ist dann die Wahrscheinlichkeit wesentlich größer, dass sie tunnelt. Beim Gamow-Peak treffen beide Wahrscheinlichkeiten so zusammen, dass die Fusionsrate am größten ist.

Hilfe zu A17: Beim "Zusammenbau" eines U-235-Kerns beträgt der Massendefekt etwa 0,8 %, bei mittelschweren Kernen aber etwa 0,9 %. Wenn in 1 kg U-235 alle Kerne zerfallen sind, hat sich die Masse somit um etwa 0,1 % oder 1 g verringert. Die freigesetzte Energie beträgt daher $E = mc^2 = 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$.

Wird ein Kilogramm H-1 vollständig zu He-4 fusioniert, gehen etwa 0,75 % bzw. 7,5 g der Masse verloren. Daher wird auch etwa 7,5-mal so viel Energie freigesetzt wie bei der Spaltung von U-235. Absolut gesehen sind es $E = mc^2 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 = 6,75 \cdot 10^{14} \text{ J}$. Der "Brennwert" von einem kg H-1 ist daher um den Faktor $6,75 \cdot 10^{14} \text{ J} / 4 \cdot 10^7 \text{ J} \approx 1,7 \cdot 10^7$ größer als der von Heizöl.

Hilfe zu A18: In der Abbildung steht über dem Diagramm "Energiegewinnung". Nach dem Energieerhaltungssatz kann Energie jedoch niemals gewonnen oder vernichtet werden, sie kann nur in eine andere Form umgewandelt werden. Daher sollte man den Begriff "Energiegewinnung" auch nicht verwenden. In den späteren Auflagen war daher Energiefreisetzung zu lesen.

Hilfe zu A19 a: Die Sonne hat eine Leistung von $3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$ bzw. J/s. Es müssen daher pro Sekunde sagenhafte $3,9 \cdot 10^{26} \text{ J} / 4,2 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 9,3 \cdot 10^{37}$ Reaktionen wie in Abb. 17 dargestellt ablaufen. Deshalb entstehen pro Sekunde in der Sonne $1,86 \cdot 10^{38}$ Neutrinos.

Hilfe zu A19 b: Die Oberfläche einer Kugel berechnet man mit $O = 4r^2\pi$. Weil wir die Oberfläche in Quadratzentimetern haben wollen, rechnen wir die Entfernung gleich vorher um: 150 Milliarden Meter = $1,5 \cdot 10^{11}$ m = $1,5 \cdot 10^{13}$ cm. Das ergibt eine Kugeloberfläche von etwa $2,8 \cdot 10^{27}$ cm². In Summe fliegen $1,86 \cdot 10^{38}$ Neutrinos pro Sekunde durch die gesamte Kugeloberfläche und daher $1,86 \cdot 10^{38}$ Neutrinos / $2,8 \cdot 10^{27}$ cm² $\approx 6,6 \cdot 10^{10}$ Neutrinos/cm².

Hilfe zu A20 a: Die Sonne strahlt mit einer Leistung von $3,9 \cdot 10^{26}$ W bzw. J/s (siehe Angabe zu A19 a). Die pro Sekunde abgestrahlte Energie von $3,9 \cdot 10^{26}$ J entspricht nach $m = E/c^2$ $3,9 \cdot 10^{26}$ J / ($9 \cdot 10^{16}$ m²/s²) = $4,3 \cdot 10^9$ kg.

Hilfe zu A20 b: Wasser hat eine Dichte von rund 1000 kg/m³. Weiters gilt $\rho = m/V$ und daher $V = m/\rho$. Das Volumen des Wasserwürfels beträgt daher $4,3 \cdot 10^9$ kg / (1000 kg/m³) = $4,3 \cdot 10^6$ m³. Es gilt $V = a^3$ und daher $a = \sqrt[3]{V} \approx 163$ m. Die Seitenlänge des Wasserwürfels beträgt daher 163 m.

Hilfe zu A20 c: Nehmen wir vereinfacht an, dass die Sonne mit gleicher Leistung weiterbrennt. Sie befindet sich 11 Milliarden Jahre auf der Hauptreihe, ist also in dieser Zeit ein "normaler" Stern, bevor sie ein Roter Riese wird. 11 Milliarden Jahre entsprechen etwa $3,5 \cdot 10^{17}$ s. Der Massenverlust macht in Summe also $4,3 \cdot 10^9$ kg $\cdot 3,5 \cdot 10^{17}$ = $1,5 \cdot 10^{27}$ kg. Das entspricht über den Daumen trotzdem nur etwa 1/1000 der aktuellen Sonnenmasse, also 1 ‰. Die Sonne ist so massenreich, dass sie der enorme Massenverlust also wenig kitzelt.

Hilfe zu A21 a: Die Oberfläche einer Kugel kann man mit $O = 4r^2\pi$ berechnen. Der Radius der Erde beträgt $6,37 \cdot 10^3$ km oder $6,37 \cdot 10^6$ m. Die Erdoberfläche beträgt daher $5,1 \cdot 10^{14}$ m². Bei einer Tiefe von durchschnittlich 4000 m macht das ein gesamtes Wasservolumen $\frac{2}{3} \cdot 5,1 \cdot 10^{14}$ m² $\cdot 4 \cdot 10^3$ m $\approx 1,4 \cdot 10^{18}$ m³. Wasser hat eine Dichte von etwa 1000 kg/m³. Die Gesamtmasse beträgt daher $1,4 \cdot 10^{21}$ kg.

Hilfe zu A21 b: Wasserstoff hat die Massenzahl 1, Sauerstoff 8. Ein Wassermolekül (H₂O) hat daher eine Molmasse von 18 g. Im Meer befinden sich daher $1,4 \cdot 10^{21}$ kg / 0,018 kg $\approx 7,8 \cdot 10^{22}$ Mol Wasser oder $7,8 \cdot 10^{22} \cdot 6 \cdot 10^{23} \approx 4,7 \cdot 10^{46}$ Wassermoleküle und somit $9,4 \cdot 10^{46}$ Wasserstoffatome. Deuterium hat eine Häufigkeit

von 0,00015 = $1,5 \cdot 10^{-4}$. In den Meeren befinden sich also geschätzte $9,4 \cdot 10^{46} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 1,41 \cdot 10^{43}$ Deuteriumatome.

Hilfe zu A21 c: Die Fusion von 3 Deuteriumatomen liefert 21,6 MeV. Die theoretisch freisetzbare Energie aller im Meer befindlichen Deuteriumatome liefert daher $1,41 \cdot 10^{43} \cdot \frac{1}{3} \cdot 21,6$ MeV $\approx 10^{44}$ MeV = 10^{50} eV = $1,6 \cdot 10^{31}$ J. Die Energie reicht daher theoretisch für $1,6 \cdot 10^{31}$ J / (10^{13} J/s) = $1,6 \cdot 10^{18}$ s $\approx 51 \cdot 10^9$ Jahre. Das sollte reichen!

Hilfe zu A22: Damit die Fusion weiterlaufen kann, muss Energie freigesetzt werden. Eisen ist aber von allen Elementen am stärksten gebunden. Für die Fusion eines Elements über Eisen müsste man daher Energie aufwenden, und daher kann diese Reaktion nicht von selbst ablaufen.

Hilfe zu A23 a: Bei einer kleinen Uranmenge erreichen die meisten Neutronen die Außenflächen, bevor sie eine weitere Kernspaltung auslösen. Wenn man die Menge vergrößert, wird der Weg der Neutronen an die Oberfläche länger, und mehr Neutronen können eine neue Kernspaltung auslösen.

Hilfe zu A23 b: Der Multiplikationsfaktor k muss dazu größer als 1 werden. Es muss also gelten $k > 2,4 \cdot x = 1$. Daraus folgt $x = 1/2,4 = 0,4167$. Es müssen also mehr 41,67 % der freiwerdenden Neutronen eine neue Spaltung auslösen.

Hilfe zu A24 a: Die Sonne ist rund 4,6 Milliarden Jahre alt. Weil sie auf Grund ihrer Masse etwa 11 Milliarden Jahre auf der Hauptreihe verweilt (Tab. 7), wird sie also noch etwa 6,5 Milliarden Jahre weiterbrennen und sicher nicht bereits im Jahr 2057 verlöschen. Über das Leben und Sterben von Sternen weiß man sehr gut Bescheid, weil es in unserer Heimatgalaxis jede Menge davon zu sehen gibt (etwa 100 Milliarden), und man ihre jeweiligen Stadien sehr gut studieren kann (Abb. 20). Die Sonne bläht sich übrigens in den nächsten Milliarden Jahren auf. Dadurch wird es auf der Erde nicht kälter, sondern wärmer. In rund 1 Milliarde Jahren wird die durchschnittliche Temperatur auf der Erde auf 30 °C gestiegen sein und in 2 Milliarden Jahren auf 100 °C.

Hilfe zu A24 b: Das Volumen der Bombe würde $22.000 \cdot 3000 \cdot 1000$ m³ = $6,6 \cdot 10^{10}$ m³ betragen. Das würde eine Uran-Masse von $6,6 \cdot 10^{10}$ m³ $\cdot 19160$ kg/m³ $\approx 1,3 \cdot 10^{15}$ kg. Die Weltreserven von Uran liegen bei etwa $1,8 \cdot 10^6$ t oder $1,8 \cdot 10^9$ kg Uran. Weil man für den Bau der Bombe aber U-235 benötigt, wäre somit $1,8 \cdot 10^9 \cdot 0,0072$ kg = $1,3 \cdot 10^7$ kg davon vorrätig. Man liegt also um den Faktor 10^8

daneben - man bräuchte 100 Millionen mal mehr U-235 für diese Bombe, als auf der Erde vorhanden.