Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Experimentalphysik
Modul PH-EP4 / PH-DP-EP4

Script für Vorlesung 29. Juni 2009

10 Kernphysik

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Moleküle und Atome als eine Einheit aus Elektronen und Kernen betrachtet wurden, wird nun auf die Kernbausteine, Protonen und Neutronen, eingegangen. Nur durch den Aufbau der Kerne aus mehreren einzelnen Partikeln ist die Kernspaltung und Kernfusion möglich. Hieraus ergeben sich ungeahnte Chancen für die Zukunft der Energiegewinnung und Stromversorgung.

10.1 Eigenschaften der Kerne

- Atomkerne (auch Nuklide genannt) bestehen aus zwei Arten von Elementarteilchen: Dem einfach positiv geladenem Proton und dem nur 0,2% schwererem Neutron, das neutral geladen ist. Beide Teilchen nennt man **Nukleonen**.
- Der leichteste Atomkern ist der des Wasserstoffatoms. Er besteht nur aus einem Proton.
- Die Anzahl der Protonen im Kern Z heißt **Kernladungszahl** oder Ordnungszahl und entspricht der Zahl der Elektronen im Atom (nicht Ion!).
- Die **Massenzahl** ist die Summe von Protonen und Neutronen: $A = N + Z$.
- Atomkerne mit unterschiedlicher Anzahl von Neutronen aber gleich vielen Protonen bezeichnet man als **Isotope**.
- Ein Nuklid ist bezeichnet durch seine Elementsymbol, z.B. H für Wasserstoff, und der Massenzahl links oben neben dem Elementsymbol, ^1H.
- Innerhalb des Kerns wirkt eine stark anziehende Kraft zwischen den Nukleonen, die die Teilchen zusammenhält. Sie heißt **starke Kernkraft** oder **hardronische Kraft**. Sie ist viel stärker als elektrostatische Abstoßung und Gravitationskraft (über 40 Größenordnungen), so dass die Gravitation bei der Kernphysik keine Rolle spielt. Die starke Kernkraft ist nur bei sehr kurzen Abständen von Bedeutung. Bereits bei einem Protonenabstand von einigen Femtometern kann sie vernachlässigt werden, da hier die elektrostatische Abstoßung überwiegt.
- Die Zahl der Neutronen im Kern N ist für leichte Kerne ungefähr so groß wie Z, für schwere Kerne wesentlich größer. Kleine Kerne: größte Stabilität bei $Z \approx N$, z.B. $^{16}_{8}O$. Große Kerne: $N > Z$ wegen der elektrostatischen Abstoßung, z.B. $^{238}_{92}U$ ($N = 146$, $Z = 92$). Abb. 1 verdeutlicht für die bekannten stabilen Kerne den Verlauf der Neutronenzahl gegenüber der Kernladungszahl.

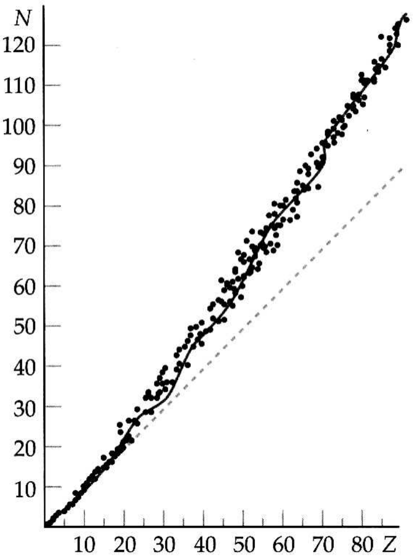

Abbildung 1: Auftragung der Nukleonenzahl N gegen die Kernladungszahl Z für stabile Nuklide. Die gestrichelte Linie entspricht der Geraden $Z = N$.

10.1.1 Größe und Form der Kerne

- Größe und Form von Atomkernen kann man durch Streuexperimente mit hochenergetischen Teilchen untersuchen.
- Die meisten Kerne sind annähernd kugelförmig und haben einen Radius $r_K = r_0\, A^{1/3}$, wobei $r_0 \approx 1,2\,\mathrm{fm}$. Dadurch ergibt sich, dass das Kernvolumen proportional ist zu A. Da aber auch die Kernmasse proportional zu A ist, ergibt sich, dass alle Kerne ungefähr die gleiche Dichte haben (analog zu einer Flüssigkeit, so dass man hier vom **Tröpfchenmodell** spricht).

10.1.2 Masse und Bindungsenergie

- Die Kernmasse setzt sich zusammen aus der Masse der Kernbausteine abzüglich der Bindungsenergie E_b der Nukleonen (c ist die Lichtgeschwindigkeit): $m_K = E_b/c$. Somit sind zwei freie Protonen schwerer als zwei gebundene im Kern. Zur Trennung dieser Kernbausteine muss dann die Bindung durch Energiezufuhr überwunden werden, was zu einer Massenzunahme führt.
- u ist die atomare Masseneinheit, die 1/12 der Masse des neutralen ^{12}C-Atoms entspricht. Die zugehörige Ruheenergie ist: $(1\,u)c^2 = 931,5\,\mathrm{MeV}$.
- Die Bindungsenergie des Kerns eines Atoms mit der atomaren Masse m_A, Z Protonen und N Neutronen ist die Differenz der Gesamtmasse aller Bestandteile und der Kernmasse, multipliziert mit c^2: $E_b = (Z\,m_H + N\,m_n - m_A)c^2$. Hier ist m_H die Masse des ^1H-Atoms und m_N die Neutronenmasse.

BEISPIEL 40.1: Bindungsenergie des zweiten Neutrons im ^{4}He-Kern

Berechnen Sie die Bindungsenergie des zweiten Neutrons in einem ^{4}He-Kern.

Problembeschreibung: Die Bindungsenergie erhält man, indem man die Massendifferenz zwischen einem ^{3}He-Kern und einem Neutron einerseits und einem ^{4}He-Kern andererseits bildet und diese mit c^2 multipliziert. Wir entnehmen die Atommassen aus Tabelle 40.1 und berechnen die Bindungsenergie mit Hilfe von Gleichung 40.3.

Lösung:

1. Addieren Sie die Masse des Neutrons zur Masse des ^{3}He-Kerns:

$$m_{^3\mathrm{He}} + m_\mathrm{n} = 3{,}016\,029\ \mathrm{u} + 1{,}008\,665\ \mathrm{u} = 4{,}024\,694\ \mathrm{u}$$

2. Subtrahieren Sie davon die Masse des ^{4}He-Kerns:

$$\Delta m = (m_{^3\mathrm{He}} + m_\mathrm{n}) - m_{^4\mathrm{He}} = 4{,}024\,694\ \mathrm{u} - 4{,}002\,603\ \mathrm{u} = 0{,}022\,091\ \mathrm{u}$$

3. Multiplizieren Sie diese Massendifferenz mit c^2 und rechnen Sie das Ergebnis in MeV um:

$$E_\mathrm{b} = (\Delta m)\,c^2 = (0{,}022\,091\ \mathrm{u})\,c^2\,\frac{931{,}5\ \mathrm{MeV}/c^2}{1\ \mathrm{u}} = \boxed{20{,}58\ \mathrm{MeV}}$$

10.2 Radioaktivität

Viele Kerne können unter Aussendung von radioaktiver Strahlung verfallen. Hierbei unterscheidet man drei verschiedene Zerfallsarten:

1. α-Zerfall: Aussendung eines α-Teilchens (^{4}He-Kerne).
2. β-Zerfall: Aussendung von Elektronen oder Positronen.
3. γ-Zefall: Aussendung hoch-energetischer elektromagnetische γ-Strahlung.

Die Zerfallsrate der Kerne fällt exponentiell mit der Zeit ab, wobei der Zerfall ein statistischer Prozess ist. Sei n die Anzahl der Kerne, so ist die Anzahl der zerfallenen Atome im Intervall $\mathrm{d}t$ proportional zu n und $\mathrm{d}t$. Die Änderung der Kernanzahl ergibt sich zu

$$\mathrm{d}n = -\lambda\, n\ \mathrm{d}t, \tag{1}$$

wobei λ die Zerfallskonstante ist und vom Material abhängt. Durch Umstellen und Integration ergibt sich das Zerfallsgesetz:

$$n = n_0\, e^{-\lambda t}. \tag{2}$$

n_0 sind die Anzahl der Teilchen zur Zeit $t = 0$. Die Anzahl der radioaktiven Zerfälle pro Zeiteinheit heißt Zerfallsrate oder Aktivität R:

$$R = -\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = \lambda\, n = \lambda\, n_0\, e^{-\lambda t} = R_0\, e^{-\lambda t}. \tag{3}$$

$R_0 = \lambda\, n_0$ ist die Aktivität zum Zeitpunkt $t = 0$. Die mittlere Lebensdauer ist definiert als $\tau = 1/\lambda$.
Nicht zu verwechseln ist die **Halbwertszeit** $t_{1/2}$. Sie gibt an, wie lange es dauert bis 50% aller Kerne verfallen sind. Setze $n = n_0/2$ in das Zerfallsgesetz ein, so ergibt sich durch Ausrechnen:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0{,}693\,\tau. \tag{4}$$

Für die Zerfallsrate ergibt sich nach i Halbwertszeiten: $R = (1/2)^i R_0$.
Die Einheit des radioaktiven Zerfalls ist das **Becquerel** (Bq): $1\,Bq = 1$ Zerfall/s.

10.2.1 Der β-Zerfall

- Besitzt ein Kern zu viele oder zu wenig Neutronen, so kann es zum β-Zerfall kommen. Hierbei ist die Massenzahl A konstant, Z wird um eins erhöht (β^--Zerfall) oder um eins erniedrigt (β^+-Zerfall).
- Der einfachste β-Zerfall ist der des Neutrons in ein Proton und ein Elektron. Die Halbwertszeit für solch einen Prozess ist ca. 10,8 min. Die freiwerdende Energie ist die Differenz aus der Neutronenruhemasse und der Einzelmassen aus Proton und Elektron, die beträgt 0,782 MeV.
- Experimentell beobachtet man bei β-Zerfällen von ganzen Atomkernen jedoch eine Energiedifferenz, die nicht durch die Bindungsenergie kompensiert werden kann. So hat sich herausgestellt, dass beim β^--Zerfall noch ein Elektronen-Antineutrino $\overline{\nu}_e$ emittiert wird. Die Reaktionsgleichung lautet:

  $$n \rightarrow p + \beta^- + \overline{\nu}_e, \tag{5}$$

  wobei auch $\beta^- = e^-$ geschrieben werden kann.
- Beim β^+-Zerfall geht ein Proton unter Emission eines Positrons und eines Elektron-Neutrinos in ein Neutron über. Dies ist wegen Energieerhaltung für ein freies Proton nicht möglich. Ein typisches Beispiel ist

  $$^{13}_{7}N \rightarrow^{13}_{6} C + \beta^+ + \nu_e. \tag{6}$$

- Der β-Zerfall kann auch dazu benutzt werden archäologische Datierungen von organischen Stoffen durchzuführen. Hierbei zerfällt Kohlenstoff nach dem Absterben der organischen Substanz (C-14-Methode). Anhand der Zerfallsrate kann dann das Alter ermittelt werden:

  $$^{14}C \rightarrow^{14} N + \beta^- + \overline{\nu}_e. \tag{7}$$

  Die Halbwertszeit beträgt 5730 Jahre.

10.2.2 Der γ-Zerfall

- Bei dieser Zerfallsart geht ein Kern aus einem angeregten Zustand unter Emission eines Photons in einen Zustand niedrigerer Energie über. Massenzahl und Kernladungszahl bleiben konstant. Die Wellenlänge des emittierten Photons liegt im Pikometer Bereich.
- Der γ-Zerfall läuft sehr schnell ab, so dass er oft nur beobachtet werden kann, weil eine anderen Zerfallsart (α oder β) folgt.
- Einige γ-Strahler besitzen eine Lebensdauer von Stunden (*metastabile Zustände*) im Gegensatz zu den meisten Strahlern, deren Lebensdauer im Bereich von 10^{-11} s liegt.

10.2.3 Der α-Zerfall

- Alle schweren Kerne ($Z > 83$) sind theoretischen Überlegungen zufolge instabil gegenüber dem α-Zerfall. Solch ein Prozess kann wie folgt ablaufen:

  $$^{232}Th \rightarrow^{228} Ra +^{4} He. \tag{8}$$

  Ein Teil der Energie geht in die kinetische Energie des α-Teilchens und dem zurückgestoßenen ^{228}Ra-Kern.

BEISPIEL 40.4: Wie alt ist das Artefakt?

Sie haben einen Ferienjob in einem archäologischen Forschungslabor angenommen. Ihr Betreuer überreicht Ihnen einen Knochen, der bei den jüngsten Ausgrabungen gefunden wurde, und bittet Sie, das Alter des Knochens zu bestimmen. Sie entnehmen eine Probe, die 200 g Kohlenstoff enthält, und messen eine β-Zerfallsrate von 400 Zerfällen/min.

IM KONTEXT

Problembeschreibung: Wir nehmen zunächst eine grobe Schätzung zum Alter des Knochens vor. Gehörte der Knochen zu einem heute noch lebenden Organismus, würden wir in der Probe eine Zerfallsrate von (15 Zerfällen$/(min \cdot g)) \cdot 200$ g = 3000 Zerfällen/min erwarten. Da 400/3000 grob $\frac{1}{8}$ ist (exakt $\frac{1}{7{,}5}$), muss die Probe etwa drei Halbwertszeiten, also etwa $3 \cdot 5730 =$ 17 190 Jahre alt sein. Um das Alter des Knochens genauer zu berechnen, müssen wir die Zahl der Halbwertszeiten exakter bestimmen. Dies kann mit der Formel $R_n = (1/2)^n R_0$ geschehen, in der R_n die gegenwärtige Zerfallsrate und R_0 die ursprüngliche Zerfallsrate bezeichnet und n die Zahl der Halbwertszeiten ist. Die ursprüngliche Zerfallsrate ergibt sich, indem man die Zerfallsrate pro Gramm mit der Masse des in der Probe enthaltenen Kohlenstoffs multipliziert.

Lösung:

1. Notieren Sie die Zerfallsrate nach n Halbwertszeiten in Abhängigkeit von der ursprünglichen Zerfallsrate:

$$R_n = \left(\tfrac{1}{2}\right)^n R_0$$

2. Berechnen Sie die ursprüngliche Zerfallsrate (für 200 g Kohlenstoff zu dem Zeitpunkt, da der Organismus zu atmen aufhörte):

$$R_0 = (15\ \text{Zerfälle}/(\text{min} \cdot \text{g})) \cdot 200\ \text{g} = 3000\ \text{Zerfälle/min}$$

3. Setzen Sie R_0 und R_n in die Gleichung aus Schritt 1 ein und lösen Sie nach 2^n auf:

$$R_n = \left(\tfrac{1}{2}\right)^n R_0$$

$$400\ \frac{\text{Zerfälle}}{\text{min}} = \left(\tfrac{1}{2}\right)^n \cdot 3000\ \frac{\text{Zerfälle}}{\text{min}}$$

$$\left(\tfrac{1}{2}\right)^n = \frac{400}{3000}$$

$$2^n = \frac{3000}{400} = 7{,}5$$

4. Logarithmieren Sie beide Seiten und lösen Sie nach n auf:

$$n \ln 2 = \ln 7{,}5$$

$$n = \frac{\ln 7{,}5}{\ln 2} = 2{,}91$$

5. Das Alter des Knochens beträgt $n t_{1/2}$:

$$t = n t_{1/2} = 2{,}91 \cdot 5730\ \text{Jahre} = \boxed{1{,}67 \cdot 10^4\ \text{Jahre}}$$

ÜBUNG: In der Problembeschreibung zu Beispiel 40.4 heißt es: „Da 400/3000 grob $\frac{1}{8}$ (exakt $\frac{1}{7{,}5}$) ist, muss die Probe etwa drei Halbwertszeiten alt sein." Erklären Sie, wie man auf die drei Halbwertszeiten kommt. (*Lösung:* Weil $\frac{1}{7{,}5} \approx \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3$, also $n = 3$ ist.)

- Der entstehende Kern kann auch weiter durch α- und β-Zerfall in andere Produkte übergehen.

- Die Energien der α-Teilchen variieren zwischen 4 und 7 MeV, die Halbwertszeiten zwischen 10^{-5} s und 10^{10} Jahren. Grund für die extrem unterschiedlichen Halbwertzeiten ist folgendes: Das α-Teilchen wird im kern gebildet. Seine Energie reicht aber nicht aus das Atom zu verlassen. Hierzu muss es die Coulomb-Potenzialbarriere des Atoms durchtunneln. Diese Wahrscheinlichkeit für solch einen Tunnelprozess hängt extrem stark von der Energie des α-Teilchens ab (hohe Energie führt zu hoher Tunnelwahrscheinlichkeit), was die unterschiedlichen Halbwertszeiten bewirkt.

10.3 Kernreaktionen

- Genau wie Elektronen können auch Kerne mit anderen Teilchen stoßen, wobei man elastische und inelastische Streuung unterscheidet. Außerdem ist es möglich, dass das einfallende Teilchen vom Kern absorbiert wird, wobei ein oder mehrere Teilchen emittiert werden können.

- Die Energiemenge, die bei solch einer Reaktion freigesetzt oder absorbiert wird, heißt **Q-Wert** der Reaktion (=Ruhemassendifferenz multipliziert mit c^2).

- Wird Energie freigesetzt, ist die Reaktion **exotherm**, für den umgekehrten Fall **endotherm**. Der Q-Wert der endothermen Reaktion ist negativ. Sei Δm der Massenzuwachs der

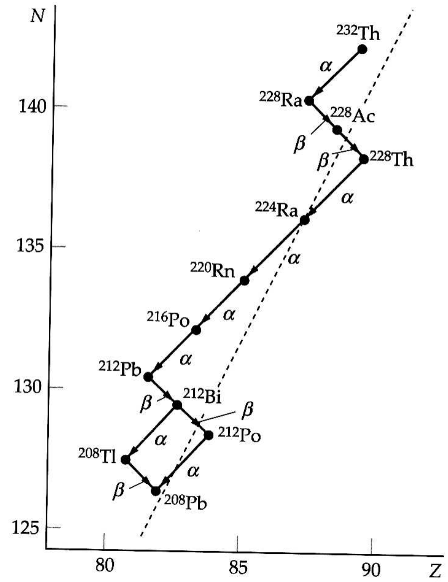

Abbildung 2: Die Thorium-Zerfallsreihe, für die $A = 4n$ gilt. Die gestrichelte Linie entspricht der Stabilitätskurve.

Reaktion, so ist der Q-Wert:

$$Q = -(\Delta m)c^2. \tag{9}$$

- Ein Maß für die effektive Größe des Kerns in einer Reaktion zwischen Kern und einfallendem Teilchen ist der **Wirkungsquerschnitt** σ. Sei I die Intensität der einfallenden Teilchen und R die Anzahl der stattfindenden Reaktionen pro Zeiteinheit und Kern, so ist der Wirkungsquerschnitt: $\sigma = R/I$ (σ hat Dimension einer Fläche). Häufig verwendete Einheit ist Barn: 1 barn $= 10^{-28}m^2$.

10.3.1 Keaktionen mit Neutronen

- Kernreaktionen mit Neutronen sind insbesondere in Kernreaktoren von Bedeutung. Trifft ein Neutron auf einen Kern, so wird selbst bei elastischer Streuung ein Teil der Energie auf den Kern übertragen, weil dieser einen Rückstoß erfährt. Bei mehrmaliger Streuung und Energieübertragung ist die Neutronenenergie schließlich im Bereich von $k_B T$ (thermische Energie). Bei dieser Energie kann beim Stoß mit einem Kern auch wiederum Energie auf das Neutron übertragen werden.

- Bei niedrigen Energien ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Kern unter Abstrahlung eines γ-Quants das Neutron einfängt. Je größer die kinetische Energie des Neutrons, desto kleiner der Wirkungsquerschnitt für diese Reaktion.

10.4 Kernspaltung und Kernfusion

In Abb. 3 ist der sogenannte Kernmassendefekt pro Nukleon, $(m_K - Zm_p - Nm_n)/A$ gegen die Massenzahl A aufgetragen. Der Kernmassendefekt entspricht genau dem Negativen der Bindungsenergie. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die (effektive) Masse pro Nukleon für sehr schwere ($A > 200$) und sehr leichte ($A \leq 20$) Nuklide größer ist als für mittelschwere

Nuklide. Daher wird Energie frei, wenn ein sehr schwerer Kern in zwei leichtere Kerne zerfällt (**Kernspaltung**). Gleiches gilt für die Fusion zweier leichter Kerne zu einem schweren (**Kernfusion**).

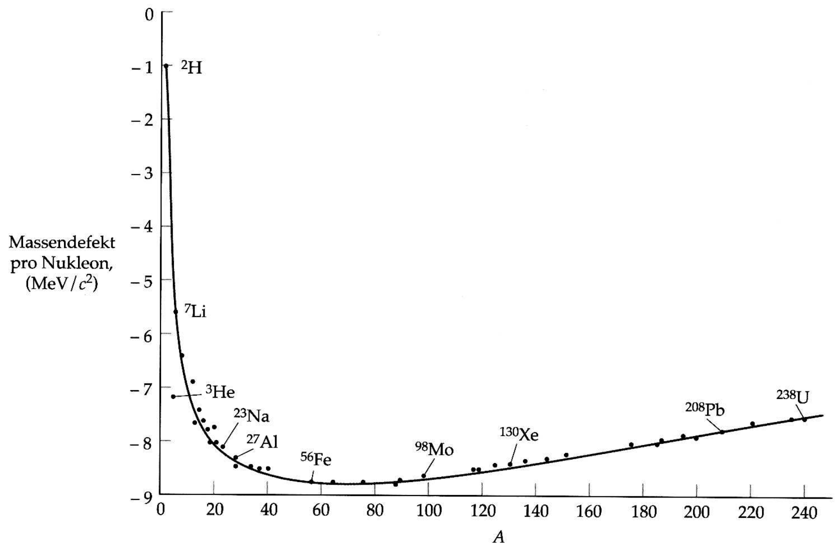

Abbildung 3: Der Massendefekt pro Nukleon, $(m_k - Z\,m_p - N\,m_n)/A$, in Einheiten von MeV/$c^2$ in Abhängigkeit von der Massenzahl A. Die Ruhemasse pro Nukleon ist für mittelschwere Kerne geringer als für sehr leichte und sehr schwere Kerne.

10.4.1 Kernspaltung

- Kerne mit $Z > 92$ können spontan zerfallen, was mit dem Ströpfchenmodell beschrieben wird: Ist das geladene Tröpfchen nicht zu groß, so wird es aufgrund seiner Oberflächenspannung zusammen gehalten. Für große Tropfen überwiegt die Abstoßung der geladenen Teilchen im Tropfen und Zerfall tritt auf.
- Einige Kerne wie Uran oder Plutonium können durch Neutroneneinfang zur Kernspaltung angeregt werden.
- Beispiel: Betrachte Kern mit $A = 200$, der in zwei Kerne mit jeweils $A = 100$ zerfällt. Da die Ruheenergie pro Nukleon für Kerne mit $A = 200$ um etwa 1 MeV größer ist als für die Kerne mit $A = 100$, werden bei dieser Spaltung ca. 200 MeV pro gespaltenem Kern frei.

10.4.2 Kernreaktoren

- Um in einem Kernreaktor eine Kettenreaktion aufrecht zu erhalten, muss bei der Kernspaltung eines ^{235}U-Kerns das emittierte Neutron wieder eine Kernspaltung eines anderen Atoms hervorrufen.
- Der Vermehrungsfaktor k beschreibt die mittlere Zahl der Neutronen, die pro Kernspaltung entstehen und wiederum Kernspaltungen bewirken. Der maximal mögliche Wert für ^{235}U ist 2,5. Meistens ist der Wert aber viel kleiner, da Neutronen entkommen können oder eingefangen werden durch nicht-spaltbare Kerne.

BEISPIEL 40.6: Energie, die bei der Spaltung von ^{235}U freigesetzt wird

Berechnen Sie die Energie in kWh, die bei der Spaltung von 1 g ^{235}U freigesetzt wird, wenn pro gepaltenem Kern 200 MeV frei werden.

Problembeschreibung: Wir benötigen die Zahl der Urankerne in 1 g ^{235}U. Diese ergibt sich aus der Tatsache, dass sich in 235 g Uran gerade n_A Kerne befinden, wobei $n_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ die Avogadro-Zahl ist.

Lösung:

1. Die Gesamtenergie ergibt sich als Zahl n der Kerne multipliziert mit der Energie pro Kern:
$$E = n \cdot 200\ \text{MeV/Kern}$$

2. Berechnen Sie n:
$$n = \frac{6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{Kerne/mol}}{235\ \text{g/mol}} \cdot 1\ \text{g} = 2{,}56 \cdot 10^{21}\ \text{Kerne}$$

3. Berechnen Sie die Energie pro Gramm in eV und wandeln Sie das Ergebnis dann in kWh um:
$$E = \frac{200 \cdot 10^{6}\ \text{eV}}{\text{Kern}} \cdot 2{,}56 \cdot 10^{21}\ \text{Kerne} = 5{,}12 \cdot 10^{29}\ \text{eV} = 8{,}19 \cdot 10^{10}\ \text{J} = 8{,}19 \cdot 10^{7}\ \text{kWs} = \boxed{2{,}28 \cdot 10^{4}\ \text{kWh}}$$

- Bei $k = 1$ ist die Reaktion selbsterhaltend. Für kleinere Werte kommt die Reaktion zum Erliegen, darüber verselbständigt sich die Reaktion, wie es z.B. bei Kernwaffen erwünscht ist. Im Reaktor ist $k \approx 1$.
- Problem ist, dass die Neutronen Energien im Bereich von 1 MeV haben und daher schlecht eingefangen werden können. Daher wird im Reaktor zusätzlich Wasser oder Kohlenstoff als Moderatormaterial eingesetzt, das durch elastische Stöße Energie von den Neutronen aufnimmt und sie abbremst. Es stellt sich schließlich zwischen Neutronen und Moderator ein thermisches Gleichgewicht ein. Hierbei kann allerdings nur für teilweise angereichertes Uran $k \approx 1$ erreicht werden, da Wasserstoff im Wasser einen hohen Wirkungsquerschnitt hat und die Neutronen zu stark abbremsen würde. Alternativ zur Anreicherung kann auch schweres Wasser benutzt werden, bei dem Wasserstoff durch Deuterium ersetzt wurde. Dies ist aber sehr teuer. Ein Bespiel für einen Druckwasserreaktor ist in der Abbildung gezeigt.
- Um ein Ansteigen des Vermehrungsfaktor zu verhindern, kann man z.B. Cadmium-Stäbe in den Reaktor fahren, die einen großen Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang haben.

10.4.3 Kernfusion

- Eine typische Kernfusionsreaktion ist $^2H +^3 H \rightarrow^4 He + n + 17{,}6\,\text{MeV}$.
- Obwohl absolut gesehen weniger Energie freigesetzt wird als bei der Kernspaltung, ist der Energiebeitrag pro Masseneinheit bei der Fusion größer. Obwohl genügend fusionsfähige Materialen vorhanden sind, konnte ein Fusionsreaktor noch nicht realisiert werden, wie im Folgenden am Beispiel von Wasserstoff-Fusion erklärt werden soll.
- Die Coulomb-Abstoßung zwischen den Kernen ist sehr hoch und muss erstmal überwunden werden bei der Fusion. Die hierzu benötigte Energie von 1 MeV ist zwar leicht zu realisieren, dennoch kommt es zu elastische und inelastischen Stößen zwischen den Kernen und nicht zur Fusion. Hierfür sind extreme Temperaturen notwendig, die durch bloße thermische Bewegungen und Stöße zur Fusion führen. Die notwendige Temperatur liegt bei 100 Millionen Kelvin, was im Plasma realisiert werden kann, wie man es z.B. in Sternen findet. Probleme ergeben sich im Aufrechterhalten und den Einschluss des Plasmas im Labor.

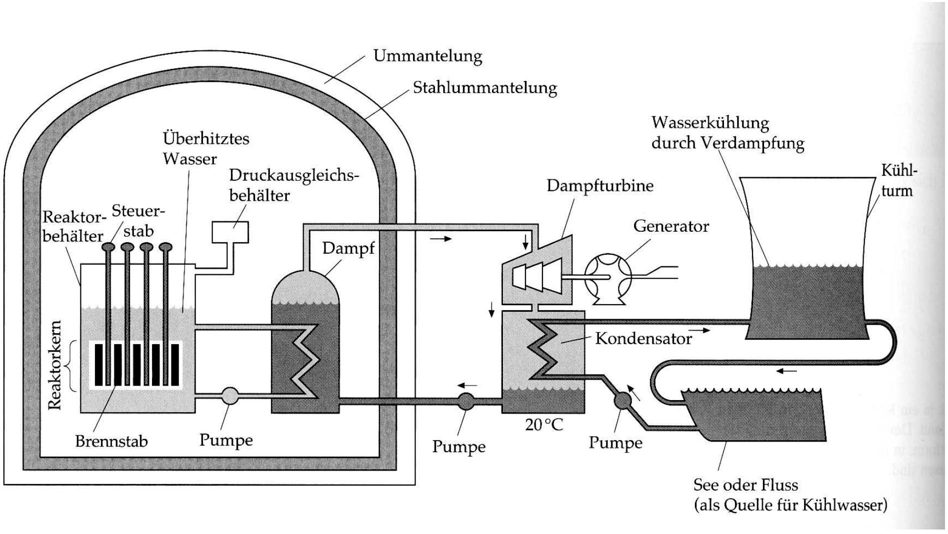

Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung eines Druckwasserreaktors. Das Wasser im Primärkreislauf dient sowohl als Moderator als auch als Wärmeübertrager. Es ist vom Wasser des Sekundärkreislaufs, dessen Dampf die Turbinen antreibt, streng getrennt.

- Ist τ die Einschlusszeit des Plasmas und n/V die Dichte, so besagt das Lawson-Kriterium:

$$\frac{n}{V}\tau > 10^{20} s \cdot \text{Teilchen/m}^3. \tag{10}$$

  Ist die kinetische Energie der Ionen im Plasma groß genug ($k_B T \approx 10\,\text{keV}$), und das Lawson-Kriterium erfüllt, so ist die vom Fusionsreaktor erzeugte Energie gerade so groß wie die hineingesteckte Energie. Hierbei ist aber noch keine Energie erzeugt worden!