Physik * Jahrgangsstufe 9 * Massendefekt und Bindungsenergie

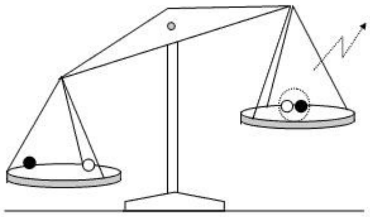
Die Masse von Atomen ist sehr klein. Daher verwendet man im atomaren Bereich gerne die so genannte atomare Masseneinheit $u = 1{,}660540 \cdot 10^{-27}$ kg.
Diese Einheit entspricht exakt 1/12 der Atommasse des Kohlenstoffisotops ^{12}C.

Genaue Messungen der Massen von Proton, Neutron und Elektron ergeben:
$m_{Proton} = 1{,}007276$ u $m_{Neutron} = 1{,}008665$ u und $m_{Elektron} = 0{,}000548580$ u

Aufgaben:

1. Wie ist ein Kohlenstoffatom ^{12}C aufgebaut?
   Wie groß ist seine Masse in der Einheit u angegeben?
   Welche Gesamt-Masse haben die Bausteine dieses Atoms? Was fällt auf?

2. Für die Masse eines Heliumatoms He 4 ermittelt man experimentell sehr genau den Wert $m_{Heliumatom} = 4{,}002603$ u, die Masse eines Heliumkerns beträgt 4,001506 u.
   Vergleiche mit der Gesamtmasse der Bausteine, die ein Helium 4 – Atom bzw. einen He 4 – Kern bilden!
   Was fällt auf?



Nach Albert Einsteins Relativitätstheorie sind Masse und Energie gleichwertige Größen; Masse kann also als bestimmte Form von Energie betrachtet werden.

Dies findet seinen Niederschlag in der bekannten Formel $\mathbf{E = m \cdot c^2}$.

Demzufolge ist jede Freisetzung von Energie mit einer Massenverringerung verbunden. Wird einem System hingegen Energie zugeführt, so erhöht sich seine Masse.

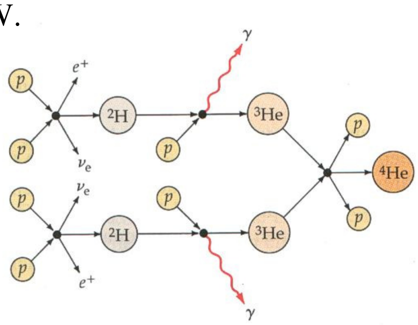
**Merke: Ein Atomkern ist leichter als seine Bausteine. Den Massenunterschied zwischen den Bausteinen und dem Kern nennt man Massendefekt Δm.
Die zugehörige Energie heißt auch Bindungsenergie $E = \Delta m \cdot c^2$.**

3. Wie viel Energie benötigt man, um 1,0 kg Heliumatome (bzw. 1,0 kg Heliumkerne) vollständig in die atomaren Bestandteile zu zerlegen?
   Gib die Energie sowohl in der Einheit J als auch in der Einheit kWh an!

4. Wie viel Energie wird frei, wenn man 1,0kg Heliumkerne aus den Bausteinen „zusammenbaut“?
   Gib die Energie auch in der Einheit kWh an!
   Warum ist dieser Vorgang nicht so einfach möglich?

5. Um wie viel erhöht sich die Energie eines Kilogramms Wasser, wenn man seine Temperatur von 20°C auf 100°C erhöht? Um wie viel nimmt dabei die Masse des Wassers zu?

6. Die Sonne hat eine Strahlungsleistung von etwa $3{,}6 \cdot 10^{26}$ W.
   Wie viel Masse „verliert“ die Sonne aufgrund dieser Strahlungsleistung pro Sekunde?
   Woher stammt (vermutlich) diese ungeheuer große Energie?



Physik * Jahrgangsstufe 9 * Massendefekt und Bindungsenergie * Lösungen

1. Das C12-Atom besteht aus 6 Protonen, 6 Neutronen und 6 Elektronen.
   Masse des C12-Atoms: $m_{C12-Atom} = 12{,}000000\,u$
   Masse der Bausteine:
   $6 \cdot m_p + 6 \cdot m_n + 6 \cdot m_e = 6 \cdot 1{,}007276\,u + 6 \cdot 1{,}008665\,u + 6 \cdot 0{,}000548580\,u \approx 12{,}098937\,u$
   Die Masse aller Bausteine des Atoms ist deutlich größer als die Masse des Atoms!
   Massendefekt: $\Delta m = 12{,}098937\,u - 12{,}000000\,u = 0{,}098937\,u$

2. Masse des He4-Atoms: $m_{He4-Atom} = 4{,}002603\,u$
   Masse der Bausteine des He4-Atoms:
   $2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n + 2 \cdot m_e = 2 \cdot 1{,}007276\,u + 2 \cdot 1{,}008665\,u + 2 \cdot 0{,}000548580\,u \approx 4{,}032979\,u$
   Massendefekt beim He4 – Atom: $\Delta m = 4{,}032979\,u - 4{,}002603\,u = 0{,}030376\,u$
   Masse des He4-Kerns: $m_{He4-Kern} = 4{,}001506\,u$
   Masse der Bausteine des He4-Kerns:
   $2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 2 \cdot 1{,}007276\,u + 2 \cdot 1{,}008665\,u \approx 4{,}031882\,u$
   Massendefekt beim He4 – Kern: $\Delta m \approx 4{,}031882\,u - 4{,}001506\,u = 0{,}030376\,u$

3. 4,0g He4-Atome (bzw. He4-Kerne) entsprechen einem Mol, d.h. $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Teilchen.
   1,0kg He4-Atome (bzw. Kerne) entsprechen demnach
   $\frac{1000g}{4{,}0g}\,mol = 250\,mol \mathrel{\hat{=}} 250 \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23} \approx 1{,}51 \cdot 10^{26}$ Teilchen.
   Der Massendefekt beträgt damit nach Aufgabe 2 für 1,0kg He4:
   $\Delta m = 1{,}51 \cdot 10^{26} \cdot 0{,}030376\,u = 1{,}51 \cdot 10^{26} \cdot 0{,}030376 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,kg \approx 0{,}00761\,kg = 7{,}61\,g$.
   Das entspricht einer Energie von
   $$E = 0{,}00761\,kg \cdot (3{,}00 \cdot 10^8\,\frac{m}{s})^2 = 6{,}85 \cdot 10^{14}\,J = \frac{6{,}85 \cdot 10^{14}}{1000 \cdot 3600}\,kWh = 190 \cdot 10^6\,kWh$$

4. Nach Aufgabe 3) wird bei der Fusion von 1,0 kg Helium 4 eine Energie von
   $6{,}85 \cdot 10^{14}\,J = 190 \cdot 10^6\,kWh$ frei.
   Die Fusion ist aber sehr schwierig, denn damit sich die Bausteine miteinander verbinden können, müssen sich diese erst ganz nahe kommen. Wegen der elektrischen Abstoßung der positiv geladenen Protonen ist das nur bei sehr, sehr hohen Temperaturen möglich!

5. $E = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta = 4{,}19\,\frac{J}{g \cdot {}^\circ C} \cdot 1000g \cdot (100^\circ C - 20^\circ C) = 335\,kJ$

   $$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \;\Rightarrow\; \Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{335 \cdot 10^3\,J}{(3{,}0 \cdot 10^8\,\frac{m}{s})^2} \approx 3{,}7 \cdot 10^{-9}\,kg = 3{,}7\,\mu g$$

6. $$3{,}6 \cdot 10^{26}\,W = \frac{3{,}6 \cdot 10^{26}\,J}{1s} = \frac{\Delta m \cdot c^2}{1s} \;\Rightarrow\; \Delta m = \frac{3{,}6 \cdot 10^{26}\,W \cdot 1s}{(3{,}0 \cdot 10^8\,m/s)^2} = 4{,}0 \cdot 10^9\,kg = 4{,}0 \cdot 10^6\,\text{Tonnen}$$
   Pro Sekunde verliert also unsere Sonne eine Masse von 40 Millionen Tonnen.
   Diese Masse wird in Strahlungsenergie umgewandelt.
   Die Energie stammt von der Fusion des Wasserstoff zu Helium (siehe Bild!).