Übungen zur Einführung des Energiebegriffs – Lösungen Serie 2

1. *Energieverbrauch im Alltag*

   Wir berechnen die in einer Stunde bezogenen Energiemengen direkt in kWh – was ziemlich einfach ist – und rechnen mittels Normaltarif in einen Preis um:

   TV: $\Delta E = P \cdot \Delta t = 100\,\mathrm{W} \cdot 1\,\mathrm{h} = 100\,\mathrm{Wh} = 0.1\,\mathrm{kWh} \quad \Rightarrow \quad \text{Preis} = 0.1\,\mathrm{kWh} \cdot \frac{20\,\mathrm{Rp.}}{1\,\mathrm{kWh}} = \underline{\underline{2\,\mathrm{Rp.}}}$

   Herd: $\Delta E = P \cdot \Delta t = 1200\,\mathrm{W} \cdot 1\,\mathrm{h} = 1200\,\mathrm{Wh} = 1.2\,\mathrm{kWh} \quad \Rightarrow \quad \text{Preis} = 1.2\,\mathrm{kWh} \cdot \frac{20\,\mathrm{Rp.}}{1\,\mathrm{kWh}} = \underline{\underline{24\,\mathrm{Rp.}}}$

   Fridge: $\Delta E = P \cdot \Delta t = 20\,\mathrm{W} \cdot 1\,\mathrm{h} = 20\,\mathrm{Wh} = 0.02\,\mathrm{kWh} \quad \Rightarrow \quad \text{Preis} = 0.02\,\mathrm{kWh} \cdot \frac{20\,\mathrm{Rp.}}{1\,\mathrm{kWh}} = \underline{\underline{0.4\,\mathrm{Rp.}}}$

2. *Beim Krafttraining*

   Die benötigte Energiemenge beträgt:

   $$\Delta E = 20 \cdot 12\,\mathrm{kg} \cdot 0.65\,\mathrm{m} \cdot 10\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}} = 1560\,\mathrm{J}$$

   Damit ergibt sich eine mittlere Leistung von:

   $$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1560\,\mathrm{J}}{165\,\mathrm{s}} = \underline{\underline{9.45\,\mathrm{W}}}$$

3. *Autobatterie und Standlicht*

   Die Leistung gibt an, wie rasch die in der Batterie gespeicherte Energie verbraucht wird. Wir finden für die Zeitspanne, bis die Batterie leer ist:

   $$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \Delta t = \frac{\Delta E}{P} = \frac{720\,\mathrm{Wh}}{18\,\mathrm{W}} = \underline{\underline{40\,\mathrm{h}}}$$

   Die Rechnung ist wegen der Energieeinheit Wh so einfach. Man braucht nur durch die Leistung in Watt zu dividieren und schon hat man die Zeit in Stunden.

4. *Energieumsatz beim Haarföhn*

   Im Skript finden wir für die spezifische Wärmekapazität von Luft einen Wert von $c = 1005\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot {}^\circ\mathrm{C}}$. Damit folgt für die zur Erwärmung von $16\,\mathrm{g}$ Luft um $64\,^\circ\mathrm{C}$ benötigte Energiemenge:

   $$\Delta E = m \cdot \Delta\vartheta \cdot c = 0.016\,\mathrm{kg} \cdot 64\,^\circ\mathrm{C} \cdot 1005\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot {}^\circ\,\mathrm{C}} = 1029\,\mathrm{J}$$

   Diese Energiemenge ist pro Sekunde erforderlich. Sie entspricht also gerade der Wattzahl:

   $$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1029\,\mathrm{J}}{1\,\mathrm{s}} = \underline{\underline{1029\,\mathrm{W}}}$$

   Die Wärmeproduktion benötigt also wesentlich mehr Energie als die Erzeugung des Luftstroms ($400\,\mathrm{W}$).

5. *Energiebilanz eines Kernkraftwerks*

(a) Die sekündlich im Wasser freigesetzte Energiemenge beträgt gemäss Wattzahl:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 3002\,\mathrm{MW} \cdot 1\,\mathrm{s} = 3002\,\mathrm{MJ} = 3002 \cdot 10^6\,\mathrm{J}$$

Mit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser ($4182\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot{}^\circ\mathrm{C}}$, Def. der Kilokalorie!) folgt für die sekündliche Wassermasse:

$$\Delta E = m \cdot \Delta\vartheta \cdot c \quad \Rightarrow \quad m = \frac{\Delta E}{c \cdot \vartheta} = \frac{3002 \cdot 10^6\,\mathrm{J}}{4182\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot{}^\circ\mathrm{C}} \cdot 33\,{}^\circ\mathrm{C}} = 21\,753\,\mathrm{kg} \approx 22\,\mathrm{t}$$

Das KKW Gösgen selber gibt den Wasserdurchsatz mit "nur" $16\,\mathrm{t}$ pro Sekunde an. Das mag auf mehrere Umstände zurückzuführen sein. Erstens gilt der oben benutzte Wert für die spezifische Wärmekapazität von Wasser nur bei normalem Druck ($1\,\mathrm{bar}$) und bei $20\,{}^\circ\mathrm{C}$. Bei höheren Drucken – im Reaktor herrschen $154\,\mathrm{bar}$! – und Temperaturen nimmt der Wert etwas zu. Und dann ist es auch so, dass die thermische Energie im Reaktor nicht nur das Wasser erwärmt, sondern auch noch den Reaktor resp. dessen Umgebung. Letzterer Punkt dürfte allerdings nicht sonderlich ins Gewicht fallen, denn sonst müsste die Anlage überhitzen.

Verglichen mit der Badewanne handelt es sich um eine riesige Wassermenge – etwa 100 Badewannen pro Sekunde!

(b) Im Skript finden wir für den gesamtschweizerischen Strombedarf im Jahr 2020 einen Wert von $55\,714\,\mathrm{GWh}$ oder $200\,570\,\mathrm{TJ}$. Der Vergleich mit der ersten Angabe fällt leichter, denn $1\,\mathrm{TWh}$ sind $1000\,\mathrm{GWh}$, also:

$$\frac{8.25\,\mathrm{TWh}}{55\,714\,\mathrm{GWh}} = \frac{8250\,\mathrm{GWh}}{55\,714\,\mathrm{GWh}} = 0.1481 = 14.81\,\% \approx \frac{1}{7}$$

Steht man in der Maschinenhalle des KKWs Gösgen, so weiss man, dass der dortige Generator – der knapp im Physikzimmer Platz hätte – ständig etwa einen Siebtel des Strombedarf der ganzen Schweiz erzeugt. Das ist ziemlich beeindruckend.

Selbstverständlich lässt sich dieselbe Antwort auch mit dem anderen Wert finden, indem man z.B. beide Werte in Joule umwandelt:

$$\frac{8.25\,\mathrm{TWh}}{200\,570\,\mathrm{TJ}} = \frac{8.25 \cdot 3600 \cdot 10^{12}\,\mathrm{J}}{200\,570 \cdot 10^{12}\,\mathrm{J}} = \frac{8.25 \cdot 3600}{200\,570} = 0.1481 = 14.81\,\% \approx \frac{1}{7}$$

Dabei habe ich verwendet, dass:

$$1\,\mathrm{TWh} = \underbrace{10^{12}}_{=\,\text{Tera}} \cdot \mathrm{W} \cdot \underbrace{3600\,\mathrm{s}}_{=1\,\mathrm{h}} = 3600 \cdot 10^{12}\,\underbrace{\mathrm{Ws}}_{=\,\mathrm{J}} = 3600 \cdot 10^{12}\,\mathrm{J}$$

(c) Vom Jahresenergiebetrag in TWh rechnen wir auf die Leistung herunter, indem wir durch die Anzahl Stunden teilen, die das KKW während einem Jahr läuft. Das sind ca.:

$$\Delta t = 11.25 \cdot 30 \cdot 24\,\mathrm{h} = 8100\,\mathrm{h}$$

Daraus folgt für die elektrische Leistung:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{8.25\,\mathrm{TWh}}{8100\,\mathrm{h}} = 0.001019\,\mathrm{TW} = \underline{\underline{1019\,\mathrm{MW}}} < 3002\,\mathrm{MW} \quad (!)$$

(d) Die Turbinen des KKWs machen aus der inneren Energie von Wasserdampf kinetische Energie. Diese Umwandlung funktioniert nicht sonderlich gut, wie uns die Thermodynamik lehrt. Tatsächlich gehen auf diese Weise zwei Drittel der freigesetzten Energie als Abwärme verloren. Beim KKW Gösgen sehen Sie diese Abwärme direkt vor sich, nämlich in Form der riesigen Wasserdampfwolke, die ständig aus dem Kühlturm aufsteigt.

6. *Warm duschen*

   Ich gehe für mich persönlich von $6\,\mathrm{min}$ Duschzeit aus. Dann ergeben sich für die benötigte Wassermenge $48\,\mathrm{lit.}$, was bei Wasser auch gerade einer Masse von $48\,\mathrm{kg}$ entspricht. Das unerwärmte Wasser ist Leitungswasser mit einer Temperatur von z.B. $18\,^\circ\mathrm{C}$. Folglich muss es um $17\,^\circ\mathrm{C}$ erwärmt werden.

   Für die zur Erwärmung benötigte Energiemenge folgt daraus:

   $$\Delta E = m \cdot \Delta\vartheta \cdot c = 48\,\mathrm{kg} \cdot 17\,^\circ\mathrm{C} \cdot 4182\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot {}^\circ\,\mathrm{C}} = 3\,412\,512\,\mathrm{J} \cdot \frac{1\,\mathrm{kWh}}{3\,600\,000\,\mathrm{J}} = \underline{\underline{0.95\,\mathrm{kWh}}}$$

   Ich brauche als gerade etwa $1\,\mathrm{kWh}$ Energie für einmal Duschen. Natürlich kommt es stark darauf an, wie gross die anfängliche Temperatur des Wassers ist, sowie wie heiss und wie lang man duscht...

   Zudem bin ich bei mir zuhause froh zu wissen, dass diese Wärme resp. Energie aus Sonnenkollektoren auf dem Dach unseres Hauses gewonnen wird. Das ist sozusagen Gratisenergie!

7. *Eine Abschätzung zur privaten Photovoltaik*

   Aufgrund des unterschiedlichen Sonnenstandes können wir bei idealer Dachschräge und -ausrichtung im Schnitt mit $45\,\%$ der Flächenstrahlungsleistung rechnen. Der Wirkungsgrad der Solarzellen verkleinert diesen Wert nochmals. Kombiniert erhalten wir:

   $$0.13 \cdot 0.45 \cdot 900\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} = 52.65\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$$

   Mit der Fläche von $45\,\mathrm{m}^2$ ergibt sich eine mittlere Leistung der Photovoltaikanlage von:

   $$P = 52.65\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} \cdot 45\,\mathrm{m}^2 = 2369\,\mathrm{W} \approx 2.37\,\mathrm{kW}$$

   Ich nehme an, mit den Wetter- und Jahreszeitenschwankungen scheint die Sonne im Mittel sechs Stunden pro Tag aufs Hausdach. Damit folgt für die jährliche Energiemenge:

   $$\Delta E = P \cdot \Delta t = 2.37\,\mathrm{kW} \cdot 365 \cdot 6\,\mathrm{h} \approx \underline{\underline{5200\,\mathrm{kWh}}}$$

   Die im Internet aufrufbaren Solarrechner der Verkäufer von Photovoltaikanlagen liefern fast dieselben Werte; sie sind sogar etwas optimistischer (gut $6000\,\mathrm{kWh}$ bei optimal ausgerichteten $45\,\mathrm{m}^2$ Dachfläche).

8. *Ausreden für den persönlichen Energieverbrauch*

   Bei mir zuhause sind es beispielsweise die elektrische Zahnbürste, der Ofen, der Geschirrspüler, die Spielkonsole und das Laptop-Ladegerät, die ständig am Strom hängen und wohl eine Standby-Leistung beziehen. Vielleicht habe ich etwas vergessen. Deshalb rechne ich grosszügig mit einer totalen Standby-Leistung von $P_{\mathrm{Standby}} = 5\,\mathrm{W}$.

   Die in einem Jahr bezogene Standby-Energiemenge beträgt folglich:

   $$\Delta E_{\mathrm{Standby}} = P_{\mathrm{Standby}} \cdot \Delta t = 5.0\,\mathrm{W} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\,\mathrm{s} = 157\,680\,000\,\mathrm{J} \approx 158\,\mathrm{MJ}$$

   Diese Energiemenge könnte Otto (oder ich) einsparen, indem er die Geräte konsequent ganz ausschaltet.

   Andererseits beträgt der Energieverbrauch für Ottos jährliche Flugreise:

   $$\Delta E_{\mathrm{Reise}} = 3000\,\mathrm{lit.} \cdot 34.5\,\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{lit.}} = 103\,500\,\mathrm{MJ} \approx 655 \cdot \Delta E_{\mathrm{Standby}}$$

   Wollte Otto wirklich durch seine Standby-Einsparung den Energieverbrauch des Fluges kompensieren, so müsste er dafür mehr als ein halbes Jahrtausend lang Standby-Energie sparen. Seine persönliche Ausrede fürs Fliegen ist also geradezu grotesk!

   Natürlich heisst dieses Resultat nicht, dass man Standby-Zustände nicht vermeiden sollte. Auch die $158\,\mathrm{MJ}$ sind eine ansehnliche Menge Energie. Aber das Resultat sagt umgekehrt ganz klar: Fliegen verbraucht extrem viel Energie. Wir sollten uns wirklich sehr genau überlegen, ob wir es uns erlauben dürfen in diesem Masse Energie zu verbrauchen – zumal dieser Energieverbrauch zusätzlich mit einem massiven Ausstoss von Treibhausgasen verbunden ist!