

Gymnasium Unterstrass Zürich
Promotion 153c

Der Begriff “Energie”

– eine Einführung

Alex Gertsch
23. August 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Eine Kurzgeschichte zum Verständnis des Energiebegriffs	4
3	Die Definition der Energie	6
4	Was braucht wie viel Energie? – nützliche Referenzwerte	7
5	Wo kann Energie überall stecken? – Energieformen	12
6	Die Definition der Leistung	14
7	Das Rechnen mit Joule, Watt, Kilowattstunden & Co.	15
8	Der Wirkungsgrad einer Maschine	16
9	Das Energieerhaltungsprinzip	17
10	Gedanken zu Effizienz und Suffizienz	18

1 Einleitung

Kein anderer physikalischer Begriff ist in der heutigen Gesellschaft so präsent und so prägend wie die **Energie**. Was brauchen Autos und Züge zum Fahren, Flugzeuge zum Fliegen, Kochherde zum Kochen, Lampen zum Leuchten, Handys zum Telefonieren, das Internet beim Surfen, Heizungen um warm zu geben, Pflanzen zum Wachsen, Tiere und Menschen zum Leben? Eine Antwort ist immer dieselbe: Energie! Und die begonnene Aufzählung könnte beliebig lange fortgesetzt werden. Alles braucht Energie, damit es "läuft". In diesem alltäglichen Sinne dürfte Ihnen der Energiebegriff schon sehr vertraut sein: *Energie ist das, was es braucht, um etwas anzutreiben*.

Natürlich ist Energie nicht gratis. Wir bezahlen für die Energie, beispielsweise zuhause mit der Strom- oder der Heizrechnung, oder aber beim Kauf eines Produktes, nämlich für die Energie, die zu dessen Herstellung nötig war. Energiemengen können beziffert werden, z.B. in Joule (J), Kilowattstunden (kWh) oder auch in Kalorien (kcal). Energielieferanten wie die Elektrizitätswerke oder Ölfirmen rechnen mit uns pro Energieeinheit ab. So steht auf der Stromrechnung der Kilowattstundenpreis und wenn ich an der Tankstelle so und so viele Liter Benzin kaufe, dann bezahle ich schliesslich auch für die Energie, denn jeder Liter Benzin setzt bei seiner Verbrennung im Motor etwa 30MJ (= Megajoule = Millionen Joule) Energie frei. Billige Energie ist für die Wirtschaft ein wichtiger Aspekt, denn davon abhängig ist mitunter eine billigere Produktion und damit – so argumentieren die Wirtschaftsvertreter in politischen Diskussionen stets – die Konkurrenzfähigkeit der Firmen und das Weiterbestehen von Arbeitsplätzen.

"Natürlich ist Energie nicht gratis"? – Doch! – Seit einigen Jahren kann man sich auch selber mit Energie versorgen, die uns die Sonne ins Haus liefert. Strom und Wärme vom Dach, das ist möglich mit Solarenergie – Solarzellen und Sonnenkollektoren – die in der Installation zwar unter Umständen nicht ganz billig, aber langfristig durchaus rentabel ist. Auch Erdwärme aus dem Boden ist praktisch unbeschränkt verfügbar, allerdings braucht man dafür immer noch ein bisschen Strom für den Betrieb einer Pumpe.

Energie unmittelbar am Verbrauchsort, also zuhause zu produzieren, das dürfte eine sinnvolle Sache sein. Tatsächlich ist es die jetzige und zukünftige Herausforderung eine nachhaltige Energieversorgung mit sogenannten erneuerbaren Energien wie Wasserkraft und Solarenergie sicherzustellen. Aber was ist denn an der Energie aus nicht-erneuerbaren Energien wie fossilen Brennstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle) nicht so gut? Die daraus gewonnene Wärme, das Tempo der Autos oder der damit erzeugte Strom sind ja nicht schlechter oder irgendwie anders?

Die Antwort liegt beim Energiehaushalt der Erde! Unser wunderbarer blauer Planet steht unter der ständigen (energiereichen) Beleuchtung der Sonne und würde überhitzen, wenn er nicht gleichzeitig selber Wärmestrahlung aussenden könnte. Es handelt sich um ein stabiles Gleichgewicht, denn wenn die Erde heisser wird, strahlt sie auch mehr Wärme ab, sodass die Temperatur nicht beliebig ansteigen kann. Allerdings wird die Abstrahlung der Erde durch Eigenschaften der Atmosphäre mehr oder weniger stark gehemmt. Hier kommen die Treibhausgase und insbesondere das Kohlendioxid (CO₂) ins Spiel. Je mehr es davon in der Atmosphäre gibt, desto schlechter schafft es die Erde Energie abzustrahlen. Und das ist genau der negative Punkt an den fossilen Brennstoffen. Ihre Verwendung bringt Kohlenstoff in die Atmosphäre, der ansonsten in tiefen Schichten der Erdkruste gebunden bleiben würde. Durch die Förderung und Nutzung der fossilen Brennstoffe verändert der Mensch also die Abstrahlungseigenschaften der Erde und verschiebt dadurch ihr energetisches Gleichgewicht zu etwas höheren Temperaturen.

Die Klimaforschung prognostiziert eine globale Erwärmung um 2°C bis 5°C bis Ende des Jahrhunderts. Das klingt nach wenig, aber für das Leben auf der Erde, egal ob für die Flora oder die Fauna (inkl. Menschen) werden diese paar Grad Temperaturanstieg drastische Folgen haben (Stichworte: Anstieg der Meeresspiegel, Auftauen des Permafrosts, Wasserknappheit in vielen Weltregionen, etc.). Es ist definitiv eine Angelegenheit, mit der nicht zu spassen ist.

Sie sehen: die Energie ist aktuell vermutlich der gesellschaftlich relevanteste physikalische Begriff. Aber auch innerhalb der Physik und in der Naturwissenschaft allgemein besitzt er eine grosse Bedeutung und Wichtigkeit, sodass es nur angebracht ist, wenn wir uns damit ausführlich auseinandersetzen. Am Ende des ersten Schuljahres sollen Sie fachlich präzise verstanden haben, wie Energie in der Physik definiert wird. – Ja, das braucht tatsächlich ein ganzes Schuljahr, denn um den Energiebegriff korrekt einzuführen, müssen wir uns zuerst mit der sogenannten klassischen Mechanik auseinandersetzen und verschiedene andere Grössen und Zusammenhänge einführen und betrachten. Dazu gehören beispielsweise die Beschleunigung, die Masse, die Kraft, die Trägheit, der Impuls und die Arbeit. Dabei werden wir natürlich schon ganz viel anderes über die Physik und somit über die grundlegendsten Gesetze der Natur lernen. Aber den Gedanken an die Energie behalten wir stets im Hinterkopf.

Obwohl uns die klassische Mechanik derzeit noch fehlt, wollen wir uns in dieser Einführung einen guten Monat lang mit dem Energiebegriff beschäftigen. Wir werden die Energie momentan einfach auffassen als “das, was es braucht, damit etwas passiert”. Mit dieser Idee lässt sich bereits viel anstellen. Insbesondere können wir über Energieformen, Energieverbrauch, Energiekosten, Energiebeschaffung, und Energieentwertung sprechen und nachvollziehen, welche Prozesse mit grossem Energieumsatz verbunden sind. Ausserdem lernen Sie mit dem **Energieerhaltungsprinzip** bereits ein ganz fundamentales, aber gleichzeitig recht abstraktes Naturgesetz kennen, das wohl verstanden sein will.

2 Eine Kurzgeschichte zum Verständnis des Energiebegriffs

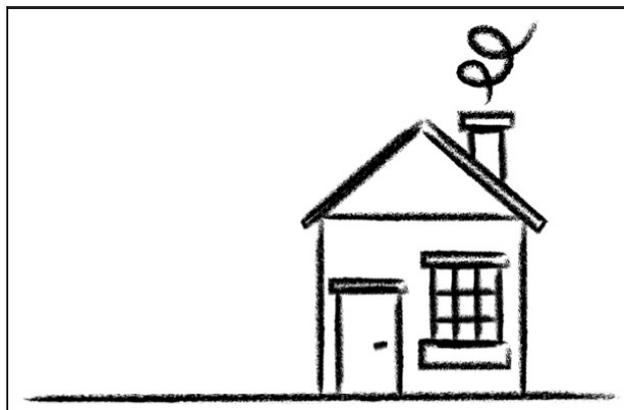
Zuerst möchte ich Ihnen mit einer Mini-Geschichte ein intuitives Verständnis vermitteln, was wir in der Physik unter dem Namen **Energie** verstehen:

Ein Dachdecker schleppt einen Ziegelstein mühsam auf das Dach eines Hauses. Dort bleibt der Stein liegen, ev. jahrelang, bis er sich vielleicht eines Tages löst und einem vorübergehenden Menschen auf den Kopf fällt.

Aus dieser kleinen Schilderung machen wir einen Fotoroman bestehend aus vier Bildern:

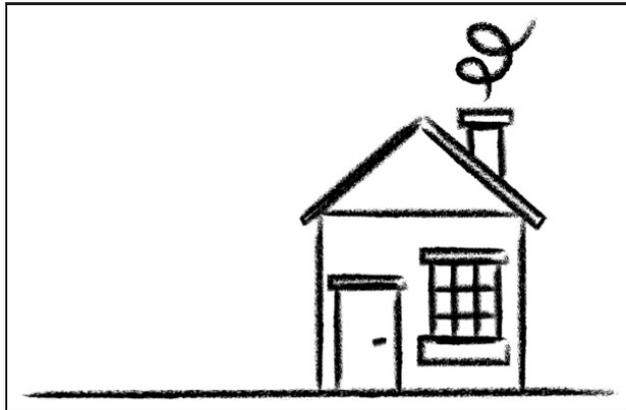
Erstes Bild: Der Ziegelstein liegt auf dem Erdboden (Zustand ①)

Der Dachdecker ist noch nicht auf der Bildfläche erschienen. Es handelt sich um eine statische Situation (d.h., nichts verändert sich) resp. eine Momentaufnahme, die ich als **Zustand ①** bezeichne.



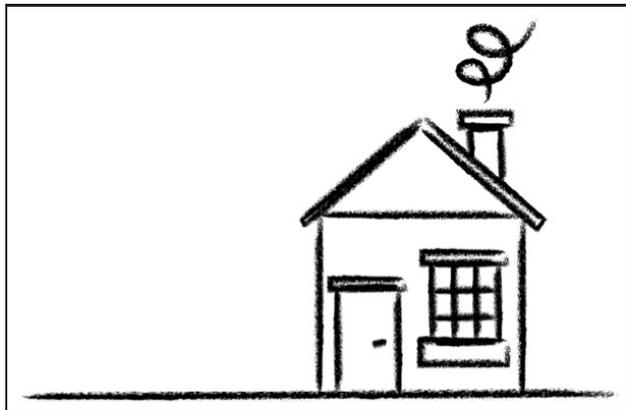
Zweites Bild: Der Dachdecker trägt den Ziegelstein auf das Dach

Hier wird ein **Vorgang** oder **Prozess** gezeigt. Der Dachdecker arbeitet und bewegt den Ziegelstein auf eine nicht unbeträchtliche Höhe.



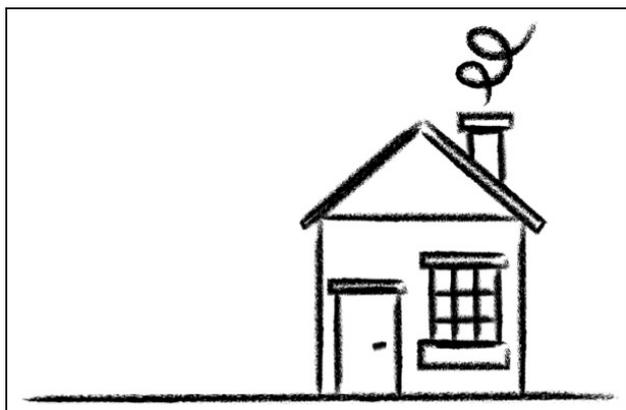
Drittes Bild: Der Ziegelstein liegt auf dem Dach (Zustand ②)

Diese wiederum statische Situation bezeichne ich als Zustand ②. Der Ziegelstein liegt – wie lange auch immer – auf dem Hausdach.



Viertes Bild: Der Ziegelstein hat sich vom Dach gelöst und fällt runter

Am Ende des Fallens landet der Ziegelstein auf dem Kopf eines Passanten. Während diesem zweiten Prozess verliert der Ziegelstein seine Höhe von Zustand ②.



Zwischen Zustand ① und Zustand ② gibt es einen wichtigen Unterschied: Solange der Ziegelstein auf dem Dach liegt, hat er die Möglichkeit herunterzufallen. Liegt er auf dem Boden, so hat er diese Möglichkeit definitiv nicht. Zustand ② beinhaltet also eine Gefahr, die es in Zustand ① nicht gibt. Das bekommen wir am Ende der Geschichte vorgeführt. Und auf genau diesen Unterschied beziehen wir uns, wenn wir sagen: "Zustand ② beinhaltet mehr Energie als Zustand ①."

3 Die Definition der Energie

Denken wir gleich nochmals über den Ziegelstein aus dem letzten Abschnitt nach...

- Der energiereiche Zustand ② des Steins auf dem Dach beinhaltet einerseits eine Gefahr – nämlich herunterzufallen und dabei jemanden zu verletzen – aber gleichzeitig gibt es eben auch die Möglichkeit diesen Zustand gezielt auszunutzen. Gibt es z.B. am Haus ein Seil, das über eine Umlenkrolle läuft, so könnte ich mehrere Ziegelsteine vom Dach in einen Eimer geben, diesen am einen Seilende befestigen und so durch das Absenken des Eimers auf der einen Seite der Umlenkrolle auf der anderen Seite (am anderen Ende des Seils) eine grössere Last auf das Dach hinaufziehen. D.h., ich kann Zustand ② ausnutzen um gezielt eine Arbeit verrichten zu lassen.
- Betrachten wir zum Vergleich den Zustand ①, in welchem der Ziegelstein auf dem Boden liegt. Dort gibt es keine Gefahr, aber mit diesem Zustand kann ich auch keine Arbeit verrichten lassen. Energiearme Zustände sind zwar gefahrlos, aber eben auch nicht "verwertbar".
- Und wie wurde der energiearme Zustand ① zum energiereichen Zustand ②? Ganz einfach: Der Dachdecker hat den Ziegelstein hochgetragen. Er hat Arbeit verrichtet. Und diese Arbeit ist nach dem Hochtragen nicht einfach verpufft, sondern wir finden sie wieder im energiereichen Zustand ② des Ziegelsteins auf dem Dach!

Diese Überlegungen führen uns auf die folgende Definition der Energie:

Die physikalische Definition der Energie E

Die Energie eines Zustandes ist das in diesem Zustand gespeicherte Arbeitsvermögen. Dabei ist der Ausdruck "gespeichert" im doppelten Sinn zu verstehen:

- 1. Bezogen auf die Vergangenheit: Es war Arbeit nötig, um diesen Zustand zu erreichen.*
- 2. Bezogen auf die Zukunft: Die im Zustand vorhandene Energie kann als Arbeit abgegeben werden.*

"Energie ist gespeichertes Arbeitsvermögen." Darin steckt sowohl der **Nutzen**, als auch die **Gefahr**. Den energiereichen Zustand eines Systems erkennen wir genau daran, dass er eben nützlich, aber genauso gefährlich sein kann. Denken Sie an energiereiche Zustände wie z.B. ein mit Benzin gefüllter Kanister, ein voller Stausee, eine heisse Herdplatte oder an eine Steckdose. Gefahr und Nutzen gehen Hand in Hand!

4 Was braucht wie viel Energie? – nützliche Referenzwerte

Ein energiereicher Zustand kann Arbeit verrichten. Aber wie viel Arbeit resp. Energie wird für einen bestimmten Prozess oder Vorgang denn eigentlich benötigt?

Um diese Frage von Grund auf zu beantworten, fehlt uns derzeit noch das physikalische Hintergrundwissen. Erst gegen Ende des ersten Schuljahres werden wir die dafür benötigte Mechanik hinreichend vertieft haben. Im Moment begnügen wir uns deshalb mit einer provisorischen Antwort, die auf einem Katalog von **Referenzwerten** resp. **-angaben** beruht. Damit können wir ebenso gut rechnen und vor allem fast noch besser ein Gespür dafür bekommen, welche Vorgänge wenig oder viel Energie brauchen.

Das SI-Einheitensystem und die SI-Energieeinheit Joule

Indem ich Ihnen nachfolgend diese Referenzwerte darlege, lernen Sie auch gerade verschiedene Einheiten kennen, in denen Energiewerte typischerweise angegeben werden. Zunächst werde ich Ihnen aber die "offizielle" Energieeinheit, das **Joule J**, vorstellen. Offiziell bedeutet, es gibt ein internationales Gremium von Wissenschaftler/-innen, das sich um die hochpräzise Definition aller naturwissenschaftlichen Einheiten Gedanken gemacht hat und auch weiterhin macht, sodass wir auf ein zuverlässiges und konsistentes¹ Einheitensystem zurückgreifen können. Man spricht vom **metrischen System**, vom **système internationale** oder einfach vom **SI**. Es zeigt sich, dass es für ein solches Einheitensystem lediglich sieben sogenannter **Basiseinheiten** bedarf und sich alle weiteren Einheiten aus diesen Basiseinheiten zusammensetzen lassen. Die sieben Basiseinheiten des SI sind die **Sekunde s** für die Grösse Zeit, der **Meter m** für die Strecke, das **Kilogramm kg** für die Masse, das **Kelvin K** für die absolute Temperatur, das **Ampere A** für die elektrische Stromstärke, das **Mol mol** für die Stoffmenge und schliesslich die **Candela cd** für die Lichtstärke.

Zu jeder anderen physikalischen Grösse gehört nun eine **SI-Grundeinheit**, die sich als Kombination der sieben Basiseinheiten ergibt. Als einfachstes Beispiel nenne ich die SI-Grundeinheit für die Geschwindigkeit v (= "Strecke pro Zeitspanne"):

$$[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{m}{s}$$

Bemerkung: Mit den eckigen Klammern zeigt man an, dass die SI-Grundeinheit angegeben werden soll. Beachten Sie zudem, dass Grössen kursiv und Einheiten normal gedruckt sind. So lassen sich in (fachlich guten) Texten Einheitensymbole leicht von Grössensymbolen unterscheiden. s steht also für eine Strecke, währenddem s eine Sekunde meint und m steht für einen Meter, wohingegen m typischerweise eine Masse meint.

Die SI-Grundeinheit der Energie

Die Einheitenkombination für die Geschwindigkeit ist offensichtlich eine ganz einfache. Für andere physikalische Grössen wird die Einheitenzusammensetzung wesentlich komplizierter, so z.B. für die Energie. Dann ist es sinnvoll, dieser Einheitenkombination einen eigenen Namen zu geben, sodass man nicht jedesmal die umfangreiche Einheitenzusammensetzung zu schreiben braucht. Der Energieeinheit hat das SI den Namen **Joule J** gegeben und es gilt:

$$[E] = \text{Joule} = J := \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Weshalb sich das Joule genau so aus den Basiseinheiten kg , m und s zusammensetzt, braucht uns momentan nicht zu interessieren. Wir werden dies erst im Rahmen der Mechanik näher betrachten.

¹Konsistent = in sich stimmig resp. widerspruchsfrei.

Ein kleiner “Energierferenzkatalog”

- Die Veranschaulichung des Joules

Veranschaulichung zur SI-Grundeinheit Joule J

Um eine Tafel Schokolade (Masse 100 g) um einen Meter anzuheben wird eine Energie von gerade etwa 1 J benötigt.

Ein Joule ist offenbar eine relativ kleine Einheit. Stellen Sie sich einfach kurz vor, wie wenig anstrengend es für Sie ist eine Tafel Schokolade um einen Meter anzuheben. . .

Von dieser Referenzangabe aus dürfen Sie proportional hochrechnen, wenn es darum geht andere Massen um andere Höhendifferenzen anzuheben. So braucht es z.B. etwa 10J, um 1 kg um einen Meter anzuheben, und ein Wagenheber, der ein Auto von 1800 kg Masse um 2.1 m anheben soll, braucht dazu eine Energie von:

$$E = 1800 \text{ kg} \cdot 2.1 \text{ m} \cdot 10 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{m}} = 37\,800 \text{ J} = 38 \text{ kJ} \quad (\text{Kilojoule})$$

Bemerkung: In dieser kleinen Rechnung sehen Sie, wie man korrekt mit physikalischen Einheiten umgeht! Im Satz vorher wird erläutert, dass es etwa 10J Energie braucht, um ein Kilogramm Masse um einen Meter anzuheben. Diese Aussage ist zusammengefasst in der Angabe $10 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{m}}$ (= “10 Joule pro Kilogramm und pro Meter”).

Folgebemerkung: In der Physik und in der Naturwissenschaft allgemein liest man Bruchstriche von Einheitenbrüchen in der Regel mit Vorteil als “pro”. So erhält man direkt Unterstützung für das Verständnis der jeweiligen Grösse!

Und gleich noch eine Bemerkung: Weil 1 J eben nicht besonders viel Energie ist, haben wir es in Rechnungen sehr oft mit mehreren Tausend, ja vielleicht sogar mit Millionen von Joules zu tun. Damit solche Angaben übersichtlich bleiben, verwenden wir vom SI vorgegebene Präfixe (= Vorsätze), die jeweils für die Multiplikation mit einer bestimmten Zehnerpotenz stehen. Auf diese Weise lassen sich sehr grosse, aber auch sehr kleine Werte bestens notieren:

Zeichen / Präfix	Vergrößerungs- / Verkleinerungsfaktor	Zehnerpotenz	Beispiel
E Exa	1 000 000 000 000 000 000	10^{18}	1 EJ = 1 Exajoule
P Peta	1 000 000 000 000 000	10^{15}	1 PJ = 1 Petajoule
T Tera	1 000 000 000 000	10^{12}	1 TB = 1 Terabyte
G Giga	1 000 000 000	10^9	1 GJ = 1 Gigajoule
M Mega	1 000 000	10^6	1 MV = 1 Megavolt
k Kilo	1 000	10^3	1 kN = 1 Kilonewton
d Dezi	0.1	10^{-1}	1 dl = 1 Deziliter
c Zenti	0.01	10^{-2}	1 cm = 1 Zentimeter
m Milli	0.001	10^{-3}	1 mW = 1 Milliwatt
μ Mikro	0.000 001	10^{-6}	1 μs = 1 Mikrosekunde
n Nano	0.000 000 001	10^{-9}	1 nm = 1 Nanometer
p Piko	0.000 000 000 001	10^{-12}	1 pg = 1 Pikogramm
f Femto	0.000 000 000 000 001	10^{-15}	1 fm = 1 Femtometer
a Atto	0.000 000 000 000 000 001	10^{-18}	1 am = 1 Attometer

- **Die Kalorie cal und die Kilokalorie kcal**

Ein gewisser **James Prescott Joule** stellte zwischen 1843 und 1847 Versuche an, mit denen er zeigen konnte, dass man für die Erwärmung eines Objektes einen Aufwand braucht, der direkt mit einem mechanischen Aufwand, wie z.B. demjenigen für das Anheben eines Gewichtes, verglichen werden kann. D.h., auch Wärme ist eine Form von Energie und kann in denselben physikalischen Einheiten angegeben werden.

Joule selber definierte in der Folge die Energieeinheit **Kalorie cal**: 1 cal sei die Energiemenge, die es braucht um 1 g Wasser um 1 °C zu erwärmen.

Auch heute sprechen wir, typischerweise im Zusammenhang mit dem Energieinhalt von Esswaren, von Kalorien. Allerdings meinen wir mit dieser "Esswarenkalorie" eigentlich eine Kilokalorie kcal, also das Tausendfache der von Joule definierten Kalorie.

Veranschaulichung zur (Kilo-)Kalorie kcal

Eine **Kilokalorie kcal** ist die zur Erwärmung von 1 kg Wasser um 1 °C benötigte Energiemenge. Es gilt:

$$1 \text{ kcal} = 4182 \text{ J}$$

Im Volksmund wird 1 kcal fälschlicherweise als Kalorie bezeichnet. Das Präfix "Kilo" wird weggelassen. Trotzdem sind damit 4182 J resp. 1 kcal gemeint. Immerhin sind die Anschriften in kcal auf den Esswarenverpackungen korrekt.

Mit diesem Verständnis der Kilokalorie können wir rasch Energiemengen berechnen, die für die Erwärmung anderer Temperaturunterschiede und Wassermengen benötigt werden. Z.B. wird für die Erwärmung des Wassers für eine Tasse Tee ($\approx 2.5 \text{ dl} \approx 0.25 \text{ kg}$) von 18 °C (Leitungswasser) auf 100 °C (Siedetemperatur) folgende Energiemenge benötigt:

$$E = 0.25 \text{ kg} \cdot 82 \text{ °C} \cdot 4182 \frac{\text{J}}{\text{°C} \cdot \text{kg}} = 85731 \text{ J} \approx 86 \text{ kJ}$$

Der Wert $4182 \frac{\text{J}}{\text{°C} \cdot \text{kg}}$ (= "4182 Joule pro Grad Celsius und pro Kilogramm") fasst direkt das Verständnis der Einheit Kilokalorie kcal zusammen. Man nennt ihn die **spezifische Wärmekapazität** c von Wasser, weil er etwas darüber aussagt, wie viel Energie Wasser bei einer Erwärmung in sich aufzunehmen vermag. Nach der Erwärmung ist diese Energie im heißen Zustand des Wassers gespeichert und das Wasser wird sie bei der allmählichen Abkühlung wieder abgeben (Bsp. Bettflasche).

Auch zu allen anderen Stoffen lassen sich spezifische Wärmekapazitäten c angeben. Z.B.:

Spezifische Wärmekapazitäten bei 20 °C und festem Druck			
Stoff	c in $\frac{\text{J}}{\text{°C} \cdot \text{kg}}$	Stoff	c in $\frac{\text{J}}{\text{°C} \cdot \text{kg}}$
Aluminium (Al) (s)	896	Platin (Pt) (s)	133
Blei (Pb) (s)	129	Quarzglas (SiO ₂) (s)	710
Eisen (Fe) (s)	450	Quecksilber (Hg) (l)	139
Gold (Au) (s)	129	Sauerstoff (O ₂) (g)	917
Kohlenstoffdioxid (CO ₂) (g)	837	Silber (Ag) (s)	235
Kupfer (Cu) (s)	383	Stickstoff (N ₂) (g)	1038
Luft (g)	1005	Wasser (H ₂ O) (l)	4182
Methan (CH ₄) (g)	2219	Eis (H ₂ O bei 0 °C) (s)	2100
Nickel (Ni) (s)	448	Wolfram (W) (s)	134

- **Die Kilowattstunde**

Wenn wir Geräte an der Steckdose betreiben, so beziehen wir Energie vom Elektrizitätswerk (EW). Mit der Stromrechnung müssen wir diese Energie dann auch bezahlen. Dabei rechnet das EW mit einer weiteren Energieeinheit, der sogenannten **Kilowattstunde kWh**:

Veranschaulichung zur Kilowattstunde kWh

Eine Kilowattstunde kWh ist die Energiemenge, die es braucht, um ein Gerät mit einem Leistungsbezug von 1000 Watt (= 1 kW) eine Stunde lang laufen zu lassen. Es gilt:

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3600 \text{ kJ} = 3.6 \text{ MJ}$$

Erläuterung: Das Watt W ist die Einheit der Leistung. Ein Leistungsbezug von 1 W bedeutet, dass das Gerät pro Sekunde 1 J Energie bezieht. Ein 1000 W-Gerät benötigt zum funktionieren also 1000 J Energie pro Sekunde. Rechnet man dies auf die Stunde hoch, so kommt man auf die 3 600 000 J.

Damit Sie gerade ein passendes Gerät im Kopf haben: Ein typischer Wasserkocher bezieht im Betrieb eine Leistung zwischen 1500 W und 2000 W. Mit einer Kilowattstunde könnte man ein solches Gerät ca. 20 bis 30 Minuten lang laufen lassen.

Wir kommen später in diesem Skript auf die Leistung und damit auch auf die Kilowattstunde zurück. Merken dürfen Sie sich aber bereits an dieser Stelle:

Ungefährer Strompreis

Im "Normaltarif" kostet eine Kilowattstunde Energie beim Elektrizitätswerk ungefähr 20 Rp. \Rightarrow Strompreis $\approx 20 \frac{\text{Rp.}}{\text{kWh}}$.

Das ist ein ziemlich günstiger Preis, wenn Sie sich mal klar machen, wie viel Masse man damit theoretisch um z.B. 100 m anheben könnte, nämlich ganze 3.6t!²

- **Typische Energiewerte aus dem Alltag**

Energie im geladenen Handy-Akku (je nach Modell):	20 – 50 kJ
Energiewert in einer 3 dl-Flasche Cola:	ca. 600 kJ
Brennwert von 1 lit. Benzin:	ca. 33 MJ
Eine Stunde fernsehen (je Gerät):	200 – 350 kJ
Einzelne Google-Suchanfrage total (je nach Quelle etwas verschieden):	ca. 400 J
Beschleunigung eines Intercitys auf $140 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (je nach Anz. Wagen):	300 – 500 MJ
Einen Kuchen backen (1 h mit einem 2000 W-Gerät):	ca. 7 MJ

²10 J pro kg und pro m; d.h. 1000 J pro kg und pro 100 m. Mit 1 kWh = 3 600 000 J also 3600 kg um 100 m.

• **Energiekennzahlen der Schweiz**

Vielleicht haben Sie sich ja gefragt, in welchen Zusammenhängen man die ganz grossen und die ganz kleinen SI-Präfixe überhaupt benutzen kann. . . Hier die Tabelle 1 aus der **Schweizerischen Gesamtenergiestatistik 2020** des **Bundesamtes für Energie (BFE)**:

Tab. 1 Gesamter Endverbrauch an Energieträgern
Consommation finale totale d'agents énergétiques

Energieträger	Endverbrauch in Originaleinheiten		Endverbrauch in TJ		Veränderung in %	Anteil in %		Agents énergétiques
	Consommation finale en unités originales		Consommation finale en TJ		Variation en %	Part en %		
	2019	2020	2019	2020	2019–2020	2019	2020	
Erdölprodukte	9 475 000 t	7 646 000 t	406 670	327 830	– 19,4	48,6	43,9	Produits pétroliers
davon:								dont:
Erdölbrennstoffe	2 617 000 t	2 358 000 t	112 310	101 110	– 10,0	13,4	13,5	Combustibles pétroliers
davon:								dont:
Heizöl extra-leicht	2 533 000 t	2 270 000 t	108 670	97 380	– 10,4	13,0	13,0	Huile extra-légère
Heizöl mittel und schwer	1 000 t	1 000 t	40	40	0,0	0,0	0,0	Huile moyenne et lourde
Petrolkoks	15 000 t	22 000 t	480	700	45,8	0,1	0,1	Coke de pétrole
Übrige	68 000 t	65 000 t	3 130	2 990	– 4,5	0,4	0,4	Autres
Treibstoffe	6 858 000 t	5 288 000 t	294 360	226 720	– 23,0	35,2	30,3	Carburants
davon:								dont:
Benzin	2 282 000 t	2 021 000 t	97 210	86 090	– 11,4	11,6	11,5	Essence
Flugtreibstoffe	1 877 000 t	709 000 t	81 090	30 630	– 62,2	9,7	4,1	Carburants d'aviation
Dieselloil	2 699 000 t	2 558 000 t	116 060	109 990	– 5,2	13,9	14,7	Carburant diesel
Elektrizität¹	57 198 GWh	55 714 GWh	205 910	200 570	– 2,6	24,6	26,8	Electricité¹
Gas²	31 998 GWh	31 351 GWh	115 190	112 860	– 2,0	13,8	15,1	Gaz²
Kohle	156 000 t	151 000 t	3 810	3 660	– 3,9	0,5	0,5	Charbon
Holzenergie	–	–	40 920	39 480	– 3,5	4,9	5,3	Energie du bois
Fernwärme	5 986 GWh	5 853 GWh	21 550	21 070	– 2,2	2,6	2,8	Chaleur à distance
Industrieabfälle	–	–	11 670	11 510	– 1,4	1,4	1,5	Déchets industriels
Übrige erneuerbare Energien	–	–	30 350	30 420	0,2	3,6	4,1	Autres énergies renouvelables
davon:								dont:
Biogene Treibstoffe	–	–	7 800	7 260	– 6,9	0,9	1,0	Carburants biogènes
Biogas ³	–	–	1 890	1 840	– 2,6	0,2	0,2	Biogaz ³
Sonne	–	–	2 640	2 660	0,8	0,3	0,4	Soleil
Umweltwärme	–	–	18 020	18 670	3,6	2,2	2,5	Chaleur ambiante
Total Endverbrauch	–	–	836 070	747 400	– 10,6	100,0	100,0	Total consommation finale

¹ Anteil der erneuerbaren Energien an der Elektrizitätsproduktion siehe Tab. 24

² unterer Heizwert (36,3 MJ/Norm m³); in der Gasindustrie wird als Rechnungseinheit der Brennwert (40,3 MJ/Norm m³) verwendet; unterer Heizwert = 0,9 * Brennwert

³ 2020 wurden zusätzlich 1330 TJ Biogas ins Erdgasnetz eingespeist und unter Gas verbucht (2019: 1300 TJ).

¹ Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité, voir tableau 24

² Pouvoir calorifique inférieur (36,3 MJ/Norm m³); dans l'industrie du gaz, on utilise comme facteur de conversion en vigueur le pouvoir calorifique supérieur (40,3 MJ/Norm m³); pouvoir calorifique inférieur = 0,9 * pouvoir calorifique supérieur

³ En 2020, 1330 TJ de biogaz ont en outre été injectés dans le réseau de gaz naturel et comptabilisés comme gaz (2019: 1300 TJ).

 BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2020 (Tab. 1)
OFEN, Statistique globale suisse de l'énergie 2020 (tabl. 1)

Zur Verdeutlichung: Der Schweizerische Endenergieverbrauch lag 2020 bei 836 070 TJ. Das ist knapp 1 EJ (Exajoule!).

Und schliesslich: Im Jahr 2017 betrug der Weltprimärenergieverbrauch etwa 588 EJ.

In diesem Zusammenhang wird übrigens sehr häufig nochmals eine andere Energieeinheit, die **Öleinheit** OE, verwendet. Sie beträgt:

$$1 \text{ OE} = 41.868 \text{ MJ}$$

Und weil diese Einheit zur Beschreibung globaler Energiedaten immer noch zu klein ist, spricht man von **Megatonnen Öleinheiten**, kurz MTOE:

$$1 \text{ MTOE} = 41.868 \text{ PJ} = 41.868 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

5 Wo kann Energie überall stecken? – Energieformen

Zustände beinhalten mehr oder weniger Energie. Das erkennen wir typischerweise an ihrer Gefährlichkeit, aber auch an ihrer Ausnutzbarkeit zur Verrichtung von Arbeit. Auf diese Weise entdecken wir ganz viele verschiedene Arten von energiereichen Zuständen. Wir sprechen von verschiedenen **Energieformen**. Hier ein Katalog (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- **Potentielle Energie E_{pot}**

Hat ein Gegenstand aufgrund seiner Lage die (theoretische) Möglichkeit zu fallen, befindet er sich also in einer erhöhten Lage, so sagen wir, er besitzt **potentielle Energie, Energie der Lage** oder auch einfach **Höhenenergie**.

Die potentielle Energie entsteht, weil sich Massen gegenseitig anziehen. So werden alle Gegenstände an der Erdoberfläche von der Erde resp. von der Erdmasse angezogen. Ohne diese Anziehungskraft würde ein Gegenstand nicht fallen. Der Ziegelstein wäre dann auch auf dem Hausdach ungefährlich.

- **Kinetische Energie E_{kin}**

Bewegt sich ein Gegenstand, so beinhaltet diese Bewegung Energie. Wir sprechen von **kinetischer Energie** oder einfach von **Bewegungsenergie**.

Die Gefahr sich bewegender Objekte erkennen Sie sofort, wenn Sie z.B. an den Strassenverkehr denken. In Crash-Tests wird das Vorhandensein von kinetischer Energie ganz offensichtlich.

- **Rotationsenergie E_{rot}**

Dreht sich ein Körper um eine Achse, so ist auch in dieser Art der Bewegung Energie enthalten. Es handelt sich um eine spezielle Form der kinetischen Energie.

Ein typisches Beispiel sind Schwungräder in Motoren und Schleifmaschinen. Die in der Drehbewegung enthaltene Energie wird bei Bedarf dazu eingesetzt, die Drehbewegung aufrecht zu erhalten. Das Schwungrad sorgt so für ein gleichmässiges Drehen. Auch in der Kreisbewegung von Planeten um die Sonne ist Rotationsenergie enthalten.

- **Elastische Energie E_{F}**

Dehnbare Gegenstände, z.B. eine Spiralfeder, enthalten in ihrem angespannten Zustand **elastische Energie**. Man sagt auch **Federenergie** (daher das F im Index).

Ein gespannter Pfeilbogen ist ein schönes Beispiel für elastische Energie.

E_{pot} , E_{kin} , E_{rot} und E_{F} werden auch als **mechanische Energieformen** bezeichnet.

- **Innere Energie E_{in}**

Alle Stoffe können Energie in sich aufnehmen. Sinngemäss sagen wir dieser Energieform **innere Energie**. Wir bemerken sie vor allem anhand der Temperatur eines Körpers. (Diese innere Energie ist übrigens nichts anderes als die kinetische und die potentielle Energie der Atome oder Moleküle, aus denen sich der Körper zusammensetzt.)

Niemand wird die Gefahren bestreiten, die in einer heissen Herdplatte oder in siedendem Wasser stecken. . .

- **Elektrische Energie E_{el}**

Unter elektrischen Ladungen herrschen anziehende und abstossende Kräfte. Wie bei der potentiellen Energie, die auf der Anziehung von Massen beruht, gibt es eine elektrische Energie,

die je nach gegenseitiger Lage der Ladungen grösser oder kleiner ist. Aufgrund von elektrischer Energie bewegen sich Ladungen, wird also Strom hervorgerufen.

Wir verwenden diese elektrische Energie, wenn wir ein Gerät an die Steckdose anschliessen. Dem Elektrizitätswerk bezahlen wir die gelieferte Menge an elektrischer Energie. Der Blitz ist das Paradebeispiel für das Freiwerden von elektrischer Energie. Der Zustand vor der Entladung der aufgeladenen Wolken ist offensichtlich sehr gefährlich.

- **Strahlungsenergie E_S**

Licht und andere Sorten von Strahlung tragen Energie. Dies merken Sie z.B. an einem schönen Tag. Trotz geschlossener Augen nehmen Sie die Richtung wahr, aus welcher die Strahlung kommt. Beim Auftreffen auf Ihre Haut wird ein Teil der Strahlungsenergie in innere Energie umgewandelt. Sie spüren eine Erwärmung. Die Strahlungsenergie der Sonne möchten wir in Zukunft technisch besser ausnutzen, da sie uns gratis zur Verfügung steht (→ Fotovoltaik (Solarzellen), Sonnenkollektoren, Solarkraftwerke).

Sehr energiereiche Strahlung ist für uns Menschen gefährlich. Denken Sie z.B. an ultraviolette Strahlung (UV ⇒ Sonnenbrand), an Röntgenstrahlung oder auch an radioaktive Strahlung (hohe Dosen ⇒ Krebs oder sogar direkte Verbrennungen).

- **Chemische Energie E_{chem}**

Viele chemische Reaktionen laufen spontan ab, weil dabei chemische Energie freigesetzt wird. D.h., die an der Reaktion beteiligten Atome besitzen vor der Reaktion mehr Energie als nachher. Diese überzählige Energie wird bei der Reaktion frei. Man nennt sie auch Bindungsenergie. Möchte man die entstandene Verbindung wieder auftrennen, so muss man ihr die Bindungsenergie wieder zuführen.

Typische Beispiele für die Freisetzung von chemischer Energie sind Verbrennungsvorgänge (Verbindung mit Sauerstoffatomen). Z.B. verbrennen wir Heizöl zur Beschaffung von Wärme (innere Energie) oder Benzin in einem Motor, damit ein Auto fährt, also mit kinetischer Energie versorgt wird. Ganz offensichtlich werden die mit der chemischen Energie verbundenen Gefahren bei sehr heftigen Reaktionen wie beispielweise Explosionen von Treibstoffen.

Ein paar Beispiele zur Veranschaulichung der Energieformen

Der Pfeilbogen: Es ist anstrengend einen Pfeilbogen zu spannen. Klar, das Spannen erfolgt gegen die Kraft des Bogens! Man muss Arbeit verrichten. Diese Arbeit speichert der Bogen in seiner "Gespanntheit", also als elastische Energie. Sobald man loslässt, wird die Energie frei. Durch sie kann der Pfeil auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt werden. Der Bogen verrichtet Arbeit am Pfeil, welche dieser anschliessend in Form von kinetischer Energie trägt.

Akkumulatoren: "Hey, ich mues ufhöre, han kei Akku me." So etwas ähnliches haben sie sicher auch schon mal gehört oder gesagt. Was macht man, wenn dem Handy die Energie fehlt?

Man muss es aufladen! D.h., man schliesst es an die Stromversorgung an, welche in der Folge Arbeit an der Batterie, eben am "Akku" verrichtet. Der Akkumulator ist so konstruiert, dass er elektrische Energie speichern und später wieder abgeben kann.

Bettflasche: Wasser wird erhitzt, d.h., ihm wird Energie zugeführt. Die innere Energie des Wassers nimmt zu. Geben wir das heisse Wasser in eine Bettflasche, so kann uns diese fast eine ganze Nacht als Wärmereservoir dienen, von welchem wir nach und nach die Energie beziehen, welche vorher bei der Erwärmung des Wassers hineingesteckt wurde.

Knallgas: Es gibt ein nicht besonders kompliziertes elektrochemisches Verfahren namens Elektrolyse, mit dem man Wasser (H_2O) in Wasserstoff-Gas (H_2) und Sauerstoff-Gas (O_2) auftrennen kann. Mittels elektrischem Strom, also durch den Einsatz von elektrischer Energie, werden die Wasserstoff- von den Sauerstoffatomen abgespaltet. D.h., es wird Arbeit am Wasser verrichtet.

Das Produkt dieser Trennungsreaktion nennt sich Knallgas – eine Mischung aus Wasserstoff- und Sauerstoff-Gas, welche beim kleinsten Funken explodiert.

Eine Explosion bedeutet immer, dass sehr viel Energie in kurzer Zeit freigesetzt wird! Woher stammt die Energie bei dieser Explosion? Es ist genau die Arbeit, welche vorher bei der Elektrolyse in die Trennung der Wasserstoff- und der Sauerstoff-Atome gesteckt wurde und in der Folge als chemische Energie gespeichert war. Sie wird nun auf einen Schlag wieder frei.

Solchen Knallgas-Explosionen sind schon diverse chemische Labors zum Opfer gefallen, aber auch das Luftschiff Hindenburg, welches mit Wasserstoff-Gas flog, explodierte im Jahre 1937 auf diese Weise. Damit war die Ära der grossen Zeppelin-Luftschiffe schlagartig beendet.

Es gibt noch zahlreiche weitere Energieformen, denn das Aufnehmen und Abgeben von Energie ist etwas ganz Fundamentales bei sämtlichen Vorgängen im Universum.

6 Die Definition der Leistung

In Prozessen wird Energie umgesetzt. Arbeit muss verrichtet werden oder es wird Arbeit frei, Energie wird von einem Körper auf einen anderen übertragen oder von einer Form in eine andere umgewandelt, etc. Alle Vorgänge sind mit **Energieumsätzen** ΔE verbunden.

Die **Leistung** P (engl. *power*) gibt nun an, wie rasch der Energieumsatz abläuft.

Die Definition der Leistung P

Ist ΔE der Energieumsatz während der Zeitspanne Δt , so definieren wir die Leistung P durch:

$$P := \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

“Leistung = Energieumsatz pro Zeitspanne.”

Anmerkungen zur Definition der Leistung

- Zur Leistung gehört eine eigene SI-Einheit, das **Watt**:

$$[P] = \frac{[E]}{[t]} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} =: \text{Watt} = \text{W}$$

Die Zusammensetzung des Watts aus SI-Basiseinheiten ist in der Anwendung nicht besonders wichtig ($\text{W} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$), dafür umso mehr der Zusammenhang mit der Energieeinheit Joule:

$$\text{J} = \text{W} \cdot \text{s} \quad \text{“Ein Joule ist eine Wattsekunde.”}$$

- Mit der Leistungseinheit Watt wird gerade eine sehr gebräuchliche und grosse Energieeinheit eingeführt, die **Kilowattstunde** kWh. Wie bereits früher erwähnt wurde, gilt:

$$\text{Kilowattstunde} = \text{kWh} = \text{k} \cdot \text{W} \cdot \text{h} = 1000 \cdot \text{W} \cdot 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$$

Bitte merken Sie sich: Es sind immer **Kilowattstunden kWh**, niemals “Kilowatt pro Stunde” (kW/h). Diese Einheit gibt es nicht. Sie ist einfach falsch.

7 Das Rechnen mit Joule, Watt, Kilowattstunden & Co.

Weshalb rechnet das Elektrizitätswerk eigentlich in Kilowattstunden und nicht in Joule? Darauf gibt es mehrere Antworten:

- Wir erinnern uns: Das Joule ist eine ziemlich kleine Energieeinheit. Mit ihr ergeben sich rasch sehr grosse und deswegen unübersichtliche Werte. Lasse ich beispielsweise einen Backofen bei einem Leistungsbezug von $P = 2200 \text{ W}$ über eine Zeitspanne von $\Delta t = 1 \text{ h } 12 \text{ min} = 4320 \text{ s}$ laufen, so folgt, angegeben in J, ein Energieverbrauch von:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 2200 \text{ W} \cdot 4320 \text{ s} = 9\,504\,000 \text{ J}$$

Natürlich könnte man diese Energiemenge in Kilo- oder Megajoule angeben und dann wäre die Zahl nicht mehr so gross, aber...

- Die meisten Betriebszeiten von Geräten sind in Sekunden ja eher mühsam anzugeben, weil man sie in der Regel mehrere Minuten, wenn nicht sogar Stunden lang benutzt; denken Sie z.B. an Fernseher, Computer, Aufladegeräte, Kochherde, Backofen, Haarföhn, Hellraumprojektoren, etc. Möchte ich also rasch überschlagen, wie viel mich der Betrieb eines Gerätes kostet, so ist es bestimmt praktischer die Zeit in Stunden angeben zu können. Im obigen Beispiel des Backofens sieht das folgendermassen aus ($1 \text{ h } 12 \text{ min} = \frac{6}{5} \text{ h}$):

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 2200 \text{ W} \cdot \frac{6}{5} \text{ h} = 2\,640 \text{ Wh}$$

- Das ist immer noch eine grosse Zahl, weil der Leistungsbezug des Backofens halt auch ziemlich gross ist. Deshalb notieren wir ihn in Kilowatt ($2200 \text{ W} = 2.2 \text{ kW}$):

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 2.2 \text{ kW} \cdot \frac{6}{5} \text{ h} \approx 2.6 \text{ kWh}$$

Wie von selbst ergeben sich die **Kilowattstunden kWh**. Wir brauchen nur die Leistung in kW und die Zeit in Stunden h einzusetzen. Damit lässt sich oftmals sehr rasch überschlagen, wie viel Energie ein Gerät benötigt – ohne grosse Einheitenumrechnung!

Bsp.: Mein Kühlschrank bezieht eine mittlere Leistung von ca. 20 W. Das sind $\frac{1}{50}$ kW. Innert zwei Tagen ($\approx 48 \text{ h}$) beträgt die bezogene Energie also ungefähr 1 kWh:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = \frac{1}{50} \text{ kW} \cdot 48 \text{ h} \approx \frac{50}{50} \text{ kWh} = 1 \text{ kWh}$$

Hochgerechnet auf den Monat sind das etwa 15 kWh resp. auf das Jahr etwa 180 kWh. Und das war im Wesentlichen eine einfache Kopfrechnung.

- Umgekehrt wird z.B. die Energiekapazität einer Batterie in **Wattstunden Wh** angegeben. Eine typische 9 V-Batterie beinhaltet neu beispielsweise eine Energiemenge von ca. 4.5 Wh. Mit dieser Angabe lässt sich sehr leicht überschlagen, wie lange ich damit eine LED-Taschenlampe betreiben kann, die eine Leistung von $\frac{1}{10}$ W bezieht:

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{P} = \frac{4.5 \text{ Wh}}{\frac{1}{10} \text{ W}} = 45 \text{ h}$$

Auch dies war dank der Einheiten – das Watt kürzt sich raus, die Stunde bleibt – eine einfache Kopfrechnung. Wh und kWh sind fürs Rechnen sehr umgängliche Einheiten.

Natürlich sollten wir in der Lage sein, bei Bedarf Einheitenumrechnungen vorzunehmen. Dabei ist es zumindest anfänglich lehrreich, mathematisch ganz sauber mit Umrechnungsbrüchen zu arbeiten, die den Wert 1 aufweisen und die Information über den Einheitenwechsel enthalten, z.B.:

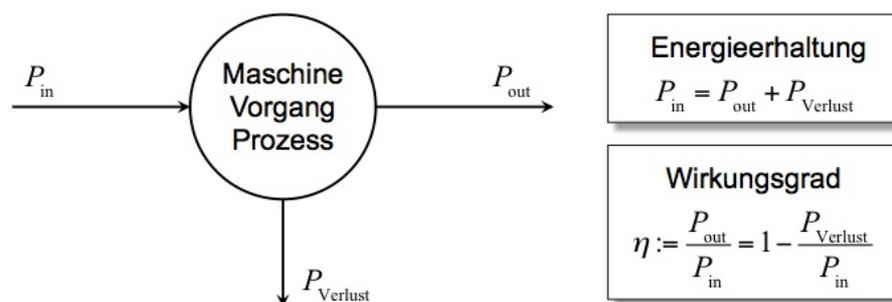
$$\Delta E = 9\,504\,000\text{ J} \cdot \underbrace{\frac{1\text{ kWh}}{3\,600\,000\text{ J}}}_{=1} = 2.64\text{ kWh}$$

Der Umrechnungsbruch hat den Wert 1 und beschreibt ganz anschaulich, wie die Einheiten umzurechnen sind: $\frac{1\text{ kWh}}{3\,600\,000\text{ J}}$, also "1 Kilowattstunde pro 3 600 000 J". In obiger Rechnung kürzen sich so die Joule raus und die Kilowattstunde bleibt stehen.

8 Der Wirkungsgrad einer Maschine

Jeder Prozess / jeder Vorgang / jede Maschine wandelt Energie einer ersten Form in Energie einer zweiten Form um. D.h., es wird eine erste Art von Leistung eingespiesen ($\rightarrow P_{\text{in}}$) und es entsteht eine ausgehende Art von Leistung ($\rightarrow P_{\text{out}}$).

In der Regel wird allerdings nicht nur die "beabsichtigte" Art von Energie ausgegeben, sondern es entstehen **Verluste**. Man spricht von einer Verlustleistung P_{Verlust} . Dies wird im **Maschinenschema** des Prozesses, des Vorgangs oder der Maschine verdeutlicht:



Der **Wirkungsgrad** η (gr. *eta*) gibt an, wie gut eine Maschine, ein Prozess oder ein Vorgang darin ist, eine erste Energieform in eine bestimmte andere umzuwandeln:

Die Definition des Wirkungsgrades η

Wird bei einem laufenden Prozess die Leistung P_{out} abgegeben, währenddem die Leistung P_{in} zugeführt wird, so ist der **Wirkungsgrad** η des Prozesses gegeben durch:

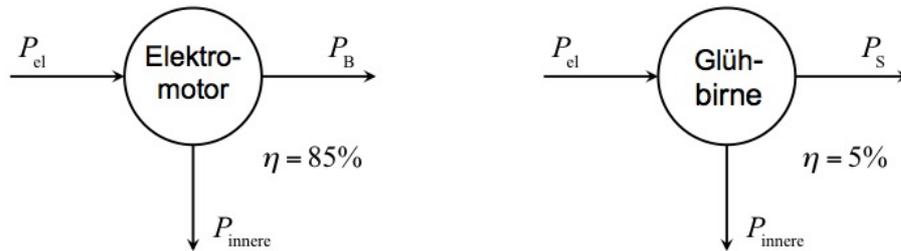
$$\eta := \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

"Wirkungsgrad = abgegebene Leistung pro zugeführte Leistung."

Anmerkungen zum Wirkungsgrad

- Je höher der Wirkungsgrad, desto besser vermag die Maschine aus der ihr zugeführten Leistung die beabsichtigte Leistung zu erzeugen.
- Die Verlustleistung hat sehr häufig mit der Abgabe von Wärme (innere Energie) zu tun. Es kommt allerdings darauf an, was man denn als Output-Energieform beabsichtigt hat. Bei einem Wasserkocher ist z.B. die ans Wasser abgegebene Wärme beabsichtigt. Nur die Erwärmung des Kochers selber und der Umgebung sind nicht gewollt.

- Hier zwei Beispiele – ein eher gutes und ein eher schlechtes elektrisches Gerät:



9 Das Energieerhaltungsprinzip

Im Prinzip lässt sich zu jeder Energieform (vgl. Abschnitt 5) eine Formel zu deren Berechnung aufstellen. Kennen wir den Zustand eines Systems, so können wir die darin auftretenden Energien mit solchen Formeln berechnen.³

Kommen in einem System mehrere Energieformen vor, so verstehen wir unter der **Gesamtenergie** E_{tot} des Systems die Summe über alle darin enthaltenen Energieformen. Sie lässt sich in jedem Zustand genau berechnen:

$$\text{Gesamtenergie} = E_{tot} = \text{Summe über alle vorhandenen Energieformen}$$

Wichtig dabei ist die genaue Abgrenzung des **Systems**: Welche Körper gehören zum betrachteten System und welche nicht? Erst wenn das klar ist, kann man die im System auftretenden Energieformen studieren.

Ist das System so beschaffen, dass es mit Körpern ausserhalb des Systems keine Energie austauscht, so bezeichnen wir es als **abgeschlossenes System**. D.h., wenn dem System keine Energie zugeführt wird und es selber auch keine Energie abgibt, so ist es abgeschlossen.

Der allgemeine Energieerhaltungssatz (Mayer, Joule, Helmholtz)

In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie erhalten:

$$E_{tot} = \text{konstant}$$

Alternative Formulierung: Die Summe über die Energien aller an einem Vorgang beteiligten Körper (= bezüglich diesem Vorgang abgeschlossenes System) bleibt konstant. Egal, welcher Vorgang abläuft, die Gesamtenergie bleibt dadurch unverändert! Sie hat vor, während und nach dem Vorgang den genau gleichen Wert.

Energie kann weder erzeugt, noch vernichtet, sondern lediglich von einer Energieform in eine andere Energieform umgewandelt werden!

Bisher wurde kein Vorgang beobachtet, welcher dem Prinzip der Energieerhaltung widersprechen würde. Es ist offenbar eines der fundamentalsten Naturgesetze.

³Diese Formeln für die verschiedenen Energieformen basieren allesamt auf der Definition der Arbeit (= "**Goldene Regel der Mechanik**"), die wir aber erst im Laufe unserer ausführlichen Betrachtung der Mechanik kennen lernen werden. Energie ist ja per Definition das in einem Zustand gespeicherte Arbeitsvermögen (vgl. Abschnitt 3).

10 Gedanken zu Effizienz und Suffizienz

Die Energieerhaltung besagt, dass Energie weder erzeugt, noch vernichtet werden kann. Daraus könnte man fälschlicherweise folgern, dass stets genügend Energie vorhanden ist und wir uns keine Sorgen um unsere Energieversorgung zu machen brauchen. Das ist so allerdings nicht richtig. Der Grund dafür liegt in den Eigenschaften der inneren Energie:

- **In der Regel ist innere Energie das energetische Endprodukt aller Prozesse.**

Hat z.B. ein konventionelles Auto seine Fahrt beendet, so ist praktisch die gesamte chemische Energie des ursprünglichen Benzins in innere Energie übergegangen. (Allenfalls hat das Auto während der Fahrt seine Autobatterie aufgeladen oder es hat etwas an Höhe gewonnen, sodass ein Teil der Energie in elektrische resp. potentielle Energie übergegangen ist.)

- **Innere Energie ist nicht gut für die Umwandlung in andere Energieformen geeignet. Sie kann nur sehr bedingt zum Betrieb von Maschinen verwendet werden. Innere Energie ist in diesem Sinne als "entwertete" Energie zu begreifen.**

Soll innere Energie dazu genutzt werden eine Maschine anzutreiben, so sind dafür grosse Temperaturunterschiede nötig. Diese sind aber nicht einfach so vorhanden. Im Gegenteil: Die innere Energie verteilt sich von selbst über alle Körper gleichmässig. Deshalb können Sie sich z.B. an einer Heizung wärmen. Die Heizung besitzt eine höhere Temperatur als Sie, weshalb sie beim Kontakt Wärme und damit innere Energie an Sie abgibt – und zwar im Prinzip so lange, bis Sie dieselbe Temperatur wie die Heizung haben.

Das Wort **Energieverbrauch** muss also so verstanden werden, dass hochwertige Energieformen beim Gebrauch von Maschinen in innere Energie umgewandelt werden. In dieser Form ist die Energie nicht mehr weiter verwertbar. Daraus ergeben sich zwei Folgerungen für das **Sparen von Energie**:

- **Effizienz = grösstmögliche Ausnutzung der Energie**

Wir sollten – wo immer möglich und sinnvoll – möglichst effiziente Maschinen (mit hohen Wirkungsgraden) zu verwenden. So kann Energie eingespart resp. besser ausgenutzt werden.

- **Suffizienz = genügsame Nutzung der Energiereserven**

Wir sollten uns überlegen, ob wir wirklich so viel Energie benötigen, wie das heute der Fall ist. Einschränkungen wären an vielen Orten denkbar und sinnvoll.

Aus ökologischen Gründen möchte die Schweiz möglichst rasch die **2000 Watt-Gesellschaft** realisieren. Das hiesse, die Schweiz würde insgesamt so viel Energie verbrauchen, dass heruntergerechnet auf einen einzelnen Menschen eine andauernde Bezugsleistung von 2000 W herauskäme. Im Moment pflegen wir ungefähr eine 4000 Watt-Gesellschaft (Schweizerische Energiestatistik 2019: 1 125 550 TJ Primärenergieverbrauch für etwa 8 570 000 Einwohner/-innen)!