

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

4960



Gemäß der Darstellung des an Einfachheit und Verständlichkeit interessierten Physiklehrers ist Energie die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Andererseits ist dies auch wieder eine Tautologie (»Regen ist, wenn's regnet«), denn Arbeit und Energie sind physikalisch das Gleiche.

Für die orthodoxen Physiker ist Arbeit eher eine *Erscheinungsform* der Energie. Korrekt wäre die Formulierung, dass man Energie benötigt, um Arbeit zu verrichten. Der Begriff »Arbeit« wird also meistens benutzt, wenn Energie umgewandelt wird, denn es gibt verschiedene Formen von Energie, aber die Anzahl »Sorten« ist überschaubar. Es handelt sich um

1. mechanische Energie,
2. Licht,
3. Wärme,
4. chemische Energie,
5. Kernenergie,
6. magnetische Energie,
7. elektrische Energie.

Um Letztere soll es hier gehen, wenn wir allgemein von Energie sprechen, doch zu deren Verständnis sind auch gewisse Grundkenntnisse der anderen Formen notwendig, denn Elektrizität kommt in der Natur nicht vor – einmal abgesehen von der sehr unhandlichen, weit-aus mehr Schaden als Nutzen anrichtenden Darreichungsform eines gelegentlichen Gewitters.

Drehstromzähler
7CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

1 Mechanische Energie

Elektrizität muss daher stets mehr oder weniger künstlich durch Umwandlung aus einer anderen Energieform gewonnen werden. Als Ausgangsform hierzu dient zumeist die mechanische Energie. Diese tritt in zwei unterschiedlichen Varianten auf:

1.1 Kinetische Energie

Hier handelt es sich um Bewegungsenergie: Wenn eine Masse sich bewegt, enthält sie kinetische Energie. Um die Masse in diesen Zustand zu versetzen, also zu beschleunigen, muss Energie aufgewendet werden. Auf dieser Eigenschaft basiert auch die Definition der Einheit Newton [N] für die Kraft: Um eine Masse von einem Kilogramm jede Sekunde um einen Meter pro Sekunde schneller oder langsamer werden zu lassen, muss eine Kraft von einem Newton auf die Masse einwirken. Der Zahlenwert von 1 N entspricht ungefähr dem Gewicht einer Masse von 102 g. Jedenfalls an der Erdoberfläche ist das so. Auf dem Mond bräuchte man schon eine Masse von rund 600 g, um ein Gewicht von 1 N zusammen zu bekommen. Da aber an der Erdoberfläche eine Masse von 1 kg immer mit bester Näherung ein Gewicht von 9,81 N aufweist, werden die Größen Masse und Gewicht sowie ihre Einheiten [kg] bzw. [N] gern alternativ verwendet – gefördert dadurch, dass Kräfte früher in Pond [p] gemessen wurden. 1 p war definiert als das Gewicht einer Masse von 1 g auf Meereshöhe. Im Alltag funktioniert die Gleichsetzung von Masse und Gewicht zwar, aber in der Technik und vor allem in der Physik muss man zumeist genauer hinsehen.

Wird die Masse wieder abgebremst, so tritt die kinetische Energie in der Form wieder in Erscheinung, dass nun die gleiche Kraft in Gegenrichtung wirkt, wenn die Abbremsung ebenso schnell erfolgen soll wie zuvor die Beschleunigung. Die Richtung der Bewegung bleibt gleich, die Richtung der Kraftwirkung jedoch kehrt sich um. So landet man beim gleichen Zahlenwert, aber mit einem Minuszeichen davor. Man sagt, die (kinetisch »gebundene«) Energie wird wieder »frei«.

Der Energie-Inhalt hängt dabei linear von der Masse ab, d. h. doppelte Masse enthält auch doppelte Energie. Die Geschwindigkeit dagegen geht sogar mit dem Quadrat ein: Doppelte Geschwindigkeit bedeutet vierfache kinetische Energie! Unabhängig ist dies jedoch vom Ausmaß der Beschleunigung / Verzögerung: Verdoppelt man die Kraft, hat man die gleiche Geschwindigkeit und somit den gleichen Energie-Inhalt schon nach der halben Zeit erreicht. Halbiert man die Zeit aber nicht, sondern lässt die doppelte Kraft über die gleiche Zeit wirken, so hat man am Ende die doppelte Geschwindigkeit und damit, wie gesagt, die vierfache kinetische Energie.

Letztlich ist übrigens auch z. B. Wind kinetische Energie. Indem man den Wind stellenweise etwas abbremsst, lässt sich diese kinetische Energie zu gewissen Teilen in elektrische umwandeln.

1.2 Potenzielle Energie

Diese nennt sich auch Lageenergie. Sie ist in Körpern enthalten, die einem Kraftfeld ausgesetzt sind, so etwa elektrisch geladene Teilchen in einem elektrischen Feld (siehe Abschnitt 7) oder Körper aus ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Nickel, Kobalt) in einem magnetischen Feld. Zumeist jedoch handelt es sich um irgendwelche Massen innerhalb des Gravitationsfeldes der Erde, die sich oberhalb der Erdoberfläche aufhalten und *potenziell* herunter fallen, rollen, fließen oder fliegen könnten. Voraussetzung ist dabei immer, dass noch ein Weg frei ist, den der betreffende Körper – der Kraft nachgebend – zurücklegen kann. Dann wird die

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

Masse dabei beschleunigt und mit kinetischer Energie aufgeladen. Die potenzielle würde so in kinetische Energie umgewandelt. Solange wir unter »oberhalb« nicht mehr verstehen als den Mount Everest und von Bohrlöchern bis in die Nähe des Erdmittelpunkts absehen, können wir das Gravitationsfeld und somit die Schwerkraft als konstant (nur proportional zur angezogenen Masse) ansehen. Wenn die Physiker auf 13 Stellen nach dem Komma messen können und noch viel genauer rechnen, lassen die Techniker sie dabei in Ruhe gewähren und freuen sich, wenn auf ihrem technischen Messgerät, das schon teuer genug war, die dritte Stelle noch kein Schätzwert ist.

Gemessen wird die mechanische Energie in Newtonmetern [Nm], also wird die Kraft mit der Strecke multipliziert: Wenn eine Kraft von z. B. 1000 N (1 kN) erforderlich ist, um ein Auto zu schieben, und das Auto 1000 m (1 km) weit geschoben werden soll, so erfordert das eine Energie von $1000 \text{ N} \cdot 1000 \text{ m} = 1\,000\,000 \text{ Nm}$. Daran, dass etwa zwei Menschen diese Energie notfalls innerhalb nicht allzu langer Zeit aufbrächten, sieht man schon, dass ein Newtonmeter eine recht kleine Einheit ist.

2 Licht

Beim [Licht](#)¹ handelt es sich um sichtbare elektromagnetische Strahlung. Sichtbar ist nur ein ganz kleiner Ausschnitt aus einem enorm weiten Strahlungsspektrum, das vom Langwellen-Rundfunk bis zur Gammastrahlung reicht. Mehr oder weniger dieses gesamte Spektrum strahlt ständig von der Sonne ab und trifft somit natürlich auch die Erde. Nichtsdestoweniger umfasst das Licht fast die Hälfte der Strahlungsintensität, also der gesamten Energie; die Bereiche darüber und darunter sind weniger intensiv. Auf jeden Quadratmeter Erde trifft um Mittag eine Strahlungsleistung von etwa 2 kW; davon $\approx 47\%$ Licht. Insgesamt kommt auf diese Weise auf der Erde 6800 Mal so viel Energie von der Sonne an wie die Menschheit verbraucht!

Und zum Glück gibt es heute eine Technik, aus Licht direkt elektrische Energie zu erzeugen, also ohne das Licht zunächst in Wärme umzuwandeln, hiermit Dampf und daraus dann mechanische Energie zu erzeugen. Die Wirkungsgrade sind zwar niedrig; nur etwa 10% des einstrahlenden Lichts wandeln so genannte Solarzellen in elektrischen Strom um. Bei besonderen Zellen sind es 20%. Das ist weniger als ein Dampfkraftwerk erreicht. Dies ist jedoch nicht sonderlich relevant, solange es noch »ungenutzte« Dachflächen gibt – also solche ohne Solarpaneele – und seit die Preise für Solarpaneele recht bezahlbar geworden sind. Ein Quadratmeter Solarzellen kann also bei direktem Sonnenschein 100 W bis 200 W elektrischer Leistung erzeugen. Mithin ist es völlig offensichtlich, dass es prinzipiell möglich wäre, die ganze Welt allein aus Sonnenlicht mit Energie zu versorgen – wenn man das Licht nur lagern und möglichst auch transportieren könnte. Leider konzentriert sich die Einstrahlung auf die Mittagsstunden und in unseren Breiten auch noch stark auf den Sommer; im Winter sind die Tage kurz, und überdies kommt oft über Wochen fast nichts unten an. Es reicht gerade mal zum Sehen, aber nicht zur Gewinnung elektrischer Energie in nennenswertem Ausmaß.

3 Wärme

Die verschiedenen Formen von Energie lassen sich in Kategorien von »wertvoll« und »weniger wertvoll« einteilen, je nach dem, was man damit anfangen kann und was nicht, bzw. ob sie sich weitgehend bis vollständig oder nur sehr unvollständig oder gar nicht in andere Energieformen umwandeln lassen; nur bei der Wärme ist dies etwas differenzierter zu betrachten. Hier kommt es in entscheidender Weise auf die Temperatur-Differenz an. Diese ist immer erforderlich; eine »Temperatur« allein – und sei sie noch so hoch – stellt zwar Energie dar,

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

lässt sich aber nicht nutzen, also umwandeln. Wie Wasser, so fließt auch Wärme »von selbst« nur von oben nach unten; anders herum bräuchte man eine »Wärmepumpe« – und damit die Zufuhr einer anderen Form von Energie.

3.1 Wärme und Temperatur

So muss z. B. in einer Dampfmaschine, also auch in jedem Dampfkraftwerk, Wasser an verschiedenen Stellen des Prozesses in flüssiger Form und als Dampf vorliegen, sonst läuft keine Umwandlung von Wärme in mechanische Energie ab. Der maximal mögliche Wirkungsgrad dieser Umwandlung, also der Anteil an der vorhandenen Wärme, der tatsächlich in mechanische Energie umgewandelt wird, ist durch das physikalische Gesetz von Carnot »gedeckelt«. Der Deckel liegt umso höher, je höher die obere und je niedriger die untere Temperatur des Prozesses liegt, gemessen in Kelvin [K]. Die Umrechnung fällt leicht:

- $0^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$;
- $0\text{ K} = -273^{\circ}\text{C}$ (absoluter Nullpunkt).

Hätte man ein »kaltes Ende« in der Nähe des absoluten Nullpunkts für den Prozess zur Verfügung, ließe sich die Wärme – wenigstens theoretisch – nahezu vollständig in mechanische Energie umwandeln. Steigt die Restwärme aber (z. B. im Winter) mit immer noch $27^{\circ}\text{C} = 300\text{ K}$ aus dem Kühlturm, und tritt der Dampf dagegen mit z. B. $627^{\circ}\text{C} = 900\text{ K}$ in die Turbine, so würde dies theoretisch einen Umwandlungsgrad (Wirkungsgrad) von $\frac{2}{3}$ – knapp 67% – ermöglichen. Praktisch liegt er aus diversen Gründen der technischen Machbarkeit noch deutlich darunter.

Dass es einen absoluten Nullpunkt gibt und geben muss, lässt sich leicht vorstellen, wenn man sich veranschaulicht, was Wärme eigentlich ist: Es handelt sich um die Bewegungsenergie der Atome bzw. Moleküle im Verbund eines Stoffes. Diese schwingen ständig; je höher die Temperatur, desto schneller, und je niedriger die Temperatur, desto langsamer. Wenn sie aber vollkommen still stehen, geht es nicht mehr langsamer; der absolute Nullpunkt ist erreicht. Dies hat nichts mit Gefrieren bzw. Erstarren zu tun! Auch in festen Stoffen schwingen die Atome noch – solange die Temperatur über 0 K liegt.

Damit sind den Wirkungsgraden thermischer Kraftwerke enge Grenzen gesetzt – sofern nicht die Abwärme, die normalerweise als Verlustwärme aus dem Kühlturm steigt, noch genutzt wird, um z. B. Gebäude zu beheizen. Hierzu aber müsste die Temperatur der Abwärme noch mindestens $\approx 80^{\circ}\text{C}$ betragen. Sie liegt aber nur um 50°C – gerade eben etwas höher als die Umgebung (z. B. im Sommer), so dass es noch zu einem »Abfluss« der Abfallwärme kommen kann. Setzt man die Temperatur des Abwärmestroms herauf, um die Abwärme nutzen zu können, nagt dies gleich wieder am elektrischen Wirkungsgrad, also an der Stromausbeute – und das auch im Sommer, wenn niemand den »Wärmemüll« haben möchte.² Ist das Kraftwerk einmal für diese Abdampf-Temperatur ausgelegt, dann ist das eben so, und dann läuft es eben auf diesem »Betriebspunkt«.

3.2 Wärme und kinetische Energie

Bemerkenswert ist hierbei noch, dass im Prinzip auch der Wind thermisch erzeugt wird, weil das Sonnenlicht, das auf dunklen Flächen in Wärme umgewandelt wird, von hellen aber reflektiert wird, zu Thermik führt. Der »Wirkungsgrad«, sofern man hier davon sprechen kann, ist zwar grausig, da die Temperatur-Differenzen zwischen warmen und kalten Luftmassen im Wettergeschehen wesentlich geringer sind als in einem Kraftwerk, aber da von der Sonne auf die Erde rund 6800 Mal so viel Energie gestrahlt wird wie die Menschheit verbraucht, ist es offensichtlich, dass es prinzipiell möglich wäre, die ganze Welt allein aus Windkraft mit Energie

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

4960

EH
20

zu versorgen – wenn man den Wind nur steuern, lenken, möglichst auch transportieren und vor allem lagern könnte. Leider fehlen dazu wieder die nötigen technischen Mittel.

3.3 Alte und neue Wärme

Früher wurde Wärmeenergie in Kalorien [cal] gemessen. Per Definition ist 1 cal die Wärmemenge, die notwendig ist, um 1 g Wasser um 1 K zu erwärmen. Wie die Celsius-Skala für die Temperatur, orientiert sich diese Einheit an dem in der Natur allgegenwärtigen Wasser. Um 1 g Eis von 0°C in 1 g Wasser von 0°C zu verwandeln, ist aber schon eine Energie von 80 cal \approx 335 J notwendig. Diese Energiemenge könnte also z. B. 1 g Wasser um 80 K oder 80 g Wasser um 1 K erwärmen. Und umgekehrt: Gefriert das Wasser, so wird diese Menge an Wärme »frei«. 539 cal oder 2256 J sind notwendig, um ein Gramm Wasser zu verdampfen. Kondensiert der Dampf wieder, so wird auch diese Menge an Wärme wieder »frei«.

4 Chemische Energie

Atome verbinden sich gern zu Molekülen. Auf diese Art können sie einige Elektronen »gemeinsam nutzen«. Manche Atome und Moleküle geben auch gern ein, zwei, drei oder vier Elektronen ab und enthalten dann entsprechend mehr Protonen als Elektronen.³ So werden sie zu positiv geladenen Ionen (Kationen). Andere nehmen diese überschüssigen Elektronen gern auf und enthalten dann entsprechend weniger Protonen als Elektronen.³ So werden sie zu negativ geladenen Ionen (Anionen).

Insbesondere das Sauerstoffatom verbindet sich nur zu gerne mit anderen Elementen – allerdings mit einigen lieber als mit anderen. So bestehen z. B. Erdöl und Erdgas im Prinzip aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffen, also verschiedenartigen Verbindungen von Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen. Noch lieber aber verbinden sich diese Elemente mit Sauerstoff (und bilden dabei Kohlendioxid bzw. Wasser). Diese Reaktion nennt sich Oxidation oder Verbrennung und setzt bekanntlich Wärme frei. In Wärmekraftmaschinen (Ottomotoren, Dieselmotoren, Gasturbinen und Dampfmaschinen) lässt sich damit mechanische Energie erzeugen.

Die Eigenart mancher Atome und Moleküle, Elektronen »leihweise« abzugeben oder aufzunehmen, ist ebenfalls mit der Abgabe oder Aufnahme von Energie verbunden – allerdings nicht so viel wie bei der Verbrennung. Die dabei auftretende Bewegung freier Elektronen lässt sich jedoch direkt als elektrischer Strom nutzen. Deswegen bilden diese Vorgänge die Basis für Batterien und Akkumulatoren. Mit »chemischen Energiespeichern« meint man daher in der Regel die wieder aufladbaren Akkumulatoren. Die Öl-, Gas- und Kohlevorräte unserer Erde könnte man auch so benennen, doch entspricht dies – zum Glück – nicht dem üblichen Sprachgebrauch. Hierbei wird zur besseren Unterscheidbarkeit von »fossilen Brennstoffen« gesprochen. Die unten »durchgekauten« Nahrungsmittel (Abschnitt 8) sind in diesem Sinne zwar nicht fossil, stellen aber auch chemische Brennstoffe dar.

5 Kernenergie

Während an chemischen Reaktionen nur die Elektronenhülle der Atome beteiligt ist und der Kern keine Rolle spielt, spielen sich Kernreaktionen, wie der Name sagt, im Kern ab. Zu den meisten Atomen gibt es *Isotope*, die im Periodensystem der chemischen Elemente am selben Ort stehen, weil sie sich ausschließlich durch die Anzahl an Neutronen im Kern unterscheiden, d. h. chemisch verhalten sie sich völlig gleich. Nicht jedes Atom kann aber mit einer erhöhten oder verminderten Anzahl Neutronen auf Dauer bestehen und zerfällt irgendwann, d. h. es ist

Drehstromzähler
7CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

radioaktiv. Betrachtet man das einzelne Atom, steht es in den Sternen, *wann* das geschieht, ist also reiner Zufall. Sicher ist nur, *dass dies irgendwann* geschehen wird. In einer großen Vielzahl gleicher Isotope jedoch lässt sich sehr genau bestimmen, nach welcher Zeit die Hälfte davon zerfallen ist. Dies ist die charakteristische Halbwertszeit des Isotops. Von der übrig gebliebenen Hälfte zerfällt in der gleichen Zeit wieder die Hälfte und so fort. Der Kern zerfällt in zwei oder manchmal drei kleinere Atome von ähnlicher, aber unter Umständen auch schon mal recht unterschiedlicher Größe. Welche chemischen Elemente hierbei entstehen, ist also im Einzelfall wieder Zufall. Die Anzahl Protonen, die der einzelne neue Kern mitbekommt, bestimmt, welches Element hier neu entstanden ist. Dem entspricht auch die Anzahl Elektronen, die der neu entstehende Kern mitnimmt. Er kann seinerseits wieder instabil, also radioaktiv sein. In diesem Fall zerfällt das Spaltprodukt erneut nach einer neuen Halbwertszeit und so fort, bis irgendwann nur noch stabile Elemente übrig bleiben («Zerfallsreihen»). Es wird also immer weniger, hört aber niemals ganz auf. Dies liefert »Futter« für zwei sich diametral gegenüber stehende, widerstreitende und polarisierende Tendenzen der öffentlichen Wahrnehmung:

- Es lässt sich ein Szenario entwerfen, in dem Altlasten Millionen, ja sogar Milliarden Jahre als solche bestehen bleiben.
- Ebenso gut lässt sich der Umstand des fortschreitenden Zerfalls jedoch zur Verharmlosung tatsächlich bestehender Gefahren der Radioaktivität nutzen.

Nach der absoluten Wahrheit dazwischen wird noch gesucht. Was ist es denn nun, das den radioaktiven Zerfall so attraktiv und zugleich so gefährlich macht? Entscheidend ist beide Male:

- Bei der Spaltung z. B. eines Atoms Uran (^{235}U) entsteht eine Energie von 210 MeV (Mega-Elektronvolt, also Millionen Elektronvolt – siehe Abschnitt 7).
- Bei der (chemischen) Verbindung eines Atoms Kohlenstoff (C) mit zwei Atomen Sauerstoff (O) zu CO_2 entsteht eine Energie von nur 4 eV, und bei der Verbindung eines Atoms Sauerstoff mit zwei Atomen Wasserstoff (H) zu Wasser (H_2O) entstehen gerade mal 2,5 eV. Davon ist dann noch die Energie abzuziehen, die notwendig ist, um die C-H-Verbindungen in den Brennstoffen (Kohlenwasserstoffe: Erdgas, Erdöl) aufzubrechen.

Somit liefert die Kernspaltung größenordnungsmäßig knapp 100 Millionen Mal so viel Energie wie die klassische Verbrennung. Dabei ist dann noch zu berücksichtigen, dass ein Atom ^{235}U grob 5 Mal so schwer wie ein Molekül CO_2 und grob 7 Mal so schwer wie ein Molekül H_2O ist. Unter dem Strich liefert also die Kernspaltung immer noch gut **10 Millionen Mal** so viel Energie (pro »Verbrauchsstoff«) wie die Verbrennung! Die Spaltung nur eines Gramms ^{235}U könnte eine Wohnung 3 Jahre lang beheizen und so 2400 m³ Erdgas ersetzen!

Ein Gramm ^{235}U steht also in einem Kernkraftwerk ganz grob für 10 t Kohle in einem Kohlekraftwerk. Für die Mengen unliebsamer Überbleibsel – radioaktiver Müll bzw. Kohlendioxid – gilt jeweils Entsprechendes. Dies gilt leider auch für die schädlichen Wirkungen der Radioaktivität: Da man für Kernwaffen mindestens ein paar Kilogramm ^{235}U benötigt, weil eine kleinere Menge nicht explodiert, misst man die Sprengkraft in »Megatonnen«, also Millionen Tonnen herkömmlichen Sprengstoffs. Die Auswirkung auf den Menschen (der so genannten »ionisierende Strahlung«) ist entsprechend: Der Zerfall eines einzigen Atoms kann 10 Millionen Moleküle im Organismus »zerschießen« – und was dabei entsteht, ist ungewiss! In einem begrenzten Ausmaß ist dies normal, denn die Natur ist voll von Radioaktivität: In jedem Kubikmeter Raumluft ereignen sich jede Sekunde 10 bis 100 Zerfälle. Der Organismus hat sich darauf eingestellt, die entstehenden Schäden laufend zu reparieren. Erst um 1000 Zerfälle pro Sekunde in einem Kubikmeter Luft droht über die Jahre Krebs. Hier ungefähr liegt die [Latte](#);⁴ genau kann das aber niemand sagen.

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

6 Magnetische Energie

Zum Aufbau eines Magnetfeldes ist Energie erforderlich. Magnetfelder entstehen immer dort, wo elektrische Ströme fließen, also Elektronen sich fortbewegen (nicht nur um den Atomkern kreisen, sondern von einem Atom zum nächsten wechseln). Das Magnetfeld verläuft kreisförmig um den Leiter. Die in dem Feld enthaltene Energie ist sehr gering, wird aber deutlich größer, wenn dieselbe Leiterlänge aufgewickelt als Spule statt in gestreckter Form vorliegt, weil sich die Magnetfelder der einzelnen Windungen innerhalb der Spule überlagern und addieren. Füllt man die Spule mit einem »weichmagnetischen« Werkstoff (meist Eisen), so lässt sich dieser Effekt noch einmal um einen Faktor von etwa 300 steigern. Viel ist das dann aber immer noch nicht. Der Effekt ist zwar in der Elektrotechnik von großer Bedeutung – aber nur, weil die Spule mit der kleinen Energiemenge z. B. bei der Frequenz von 50 Hz unseres Wechselstromnetzes in einer Sekunde 100 Mal geladen und wieder entladen wird. Im landläufigen Sinn von »Energiespeicherung« taugt diese Methode für gar nichts.

Die Freisetzung der im Magnetfeld enthaltenen Energie äußert sich darin, dass bei Entfall der elektrischen Spannung, die den Strom treibt, der Strom noch eine Weile weiter fließt und den Draht – eventuell nicht messbar, aber theoretisch immer – erwärmt. Der Strom fließt weiter wie ein Auto, das mit abgestelltem Motor noch weiter rollt, bis die Reibungswiderstände seine kinetische Energie – auch nicht unbedingt messbar – in Form von Wärme absorbiert haben. Wird der Stromfluss z. B. durch einen Schalter abrupt unterbrochen, dann tritt die Energie in Form eines starken Funkens auf. Das ist dann so, als führe das Auto gegen eine Mauer. Wenn der Schalter nicht angemessen (für »induktive Lasten«) ausgelegt ist, sieht er nachher aus wie das Auto auch. Bei der Eisenbahn gibt es Puffer, die bis zu einer gewissen (sehr geringen) Geschwindigkeit Reste kinetischer Energie absorbieren können, ohne dass Schäden entstehen. Entsprechend arbeiten auch »ordentliche« Schalter.

Elektromotoren sind streng physikalisch eigentlich »Magnetmotoren«, denn sie nutzen die sich anziehenden bzw. abstoßenden Kräfte ungleichnamiger bzw. gleichnamiger Magnetpole. Mit der im Magnetfeld gespeicherten Energie hat dies jedoch nichts zu tun. Wäre diese Energie 10 Mal so groß oder nur $\frac{1}{10}$ so groß wie sie tatsächlich ist, würde dies weder am Prinzip noch an der Praxis des Elektromotors viel ändern.

Man kann in die Spule auch einen »hartmagnetischen« Werkstoff einfüllen. Fließt dann (ein Mal kurz ein sehr starker) Strom durch die Spule, so behält dieser Kern seinen Magnetismus, und ein »Permanentmagnet« ist entstanden. Auch diese gewinnen in der Elektrotechnik in letzter Zeit zusehends an Bedeutung – aber auch diese Verwendung hat im Grunde nichts damit zu tun, dass in dem Magnetismus ein klein wenig Energie enthalten ist. Diese verweilt eben darin wie die Verbrennungsenergie (hoffentlich) in einem Holzhaus; ansonsten wäre der Magnet »verbrannt« (ohne dass dies jedoch in der Praxis so bezeichnet würde).

7 Die vielseitigste: Elektrische Energie

Zum Aufbau eines elektrischen Feldes ist ebenfalls Energie erforderlich. Elektrische Felder bestehen immer zwischen zwei unterschiedlichen elektrischen Potenzialen. Finden die Elektronen einen Weg, vom Minuspol mit Elektronen-Überschuss zum Pluspol mit Elektronenmangel zu wechseln, so entlädt sich die Energie – unter Umständen (bei Gewitter) mit Donnergetöse. Auch der Blitz stellt einen [elektrischen Strom](#)³ dar; einen sehr starken noch dazu, der aber nur Mikrosekunden andauert und deswegen – seinen zerstörerischen Fähigkeiten zum Trotz – wieder nicht gar so viel Energie repräsentiert.

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

Das elektrische Feld ist aber wiederum nicht gemeint, wenn hier von elektrischer Energie die Rede ist, sondern vom alltäglichen Gebrauch derselben. Diese »Alltags-Energie« messen Physiker wie Techniker in Wattsekunden [Ws]. Das ist die Energie, die umgesetzt wird, wenn eine Sekunde lang eine Leistung von einem Watt erzeugt oder verbraucht wird. Leistung ist Energie pro Zeit. Der Bezug *pro Zeit* ist in der Größe [Strom](#),³ gemessen in Ampere [A], schon enthalten, denn ein Ampere bedeutet, dass an einer beliebigen Stelle des Drahtes $6,24 \cdot 10^{18}$ Elektronen *pro Sekunde* vorbei fließen. Multipliziert mit der elektrischen Spannung wird hieraus die elektrische Leistung. Deswegen muss die Leistung in Watt wieder mit der Zeit in Sekunden multipliziert werden, um von der Leistung auf die Energie in Wattsekunden zu kommen. Ein Watt entspricht beispielsweise dem Leistungsbedarf einer modernen LED-Fahrradlampe, und ob der Dynamo uns dieses eine Watt (plus Verluste) auch noch von der mühsam selbst erstrampelten Leistung abzieht, merken wir nicht einmal – und das lässt tief blicken (Abschnitt 8)!. Das Lämpchen verbraucht mithin in einer Sekunde nur eine Wattsekunde an Energie – und das ist wahrlich recht wenig. Der Pfiff an der Sache ist nun aber, dass ein Newtonmeter, ein Joule und eine Wattsekunde das Gleiche sind:

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws.}$$

Fazit: Wenn man [SI-Einheiten](#)⁵ benutzt, kann man Energie theoretisch direkt 1:1 gleich Energie setzen. Was praktisch bei der Umwandlung übrig bleibt, ist eine andere Frage, der man in jedem Einzelfall nachgehen muss, da die Bilanz sehr unterschiedlich ausfallen kann – bei thermischen Kraftwerken also in der Regel schlecht (Abschnitt 3.1). Sicher, »ein bisschen Schwund ist immer«, sagt man, aber muss es gleich so viel sein?

Im Prinzip leider ja, doch gerade deswegen gilt die elektrische als die wertvollste Form von Energie. In diesem Sinne steht »wertvoll« hier einerseits schlicht und ergreifend für »teuer«, aber elektrische Energie lässt sich auch mit beispielloser Leichtigkeit in jede andere Form umwandeln. Die (Rück-)Umwandlung des eben erst thermisch erzeugten Stroms in Wärme (elektrische Direkt- oder Nachtspeicherheizung) ist natürlich im Prinzip unwirtschaftlich, von ökologischen Aspekten ganz zu schweigen. Die Umwandlung in Bewegungsenergie, Licht und auch Schall, wo erforderlich (und sei es Ultraschall), ist sehr wirtschaftlich oder sogar einzig und allein aus elektrischer Energie möglich. Auch gibt es Anwendungen, in denen Wärme sehr punktuell auf kleinsten Raum begrenzt oder bei extrem hohen Temperaturen benötigt wird. Hier kann es sein, dass die elektrische Erzeugung unter dem Strich sparsamer ist als beispielsweise auf direkte Art mit einer Flamme, oder die Anwendung ist hier anders gar nicht möglich, weil sich nur auf elektrischem Wege die hohe Temperatur erreichen und auf kleinsten Raum konzentrieren lässt, beispielsweise in der Medizintechnik oder beim Schweißen.

Nur sind die offiziellen Grund-Einheiten ein wenig unhandlich, da gar so klein. Deswegen hat es sich für den Alltags-Gebrauch eingebürgert, alle Energien in Kilowattstunden anzugeben. Auch z. B. Gas wird heute so abgerechnet, obwohl es noch vor kurzem in Kubikmetern gehandelt wurde, aber dann musste man stets wissen, wie viele Kilowattstunden ein Kubikmeter *der betreffenden Sorte* bei der Verbrennung erbringt. Nur bei Akkumulatoren bleibt man oft aus gegebenem Anlass dazwischen – nämlich bei der Wattstunde – hängen. Da

- ein Kilowatt gleich 1 000 Watt ($1 \text{ kW} = 1 000 \text{ W}$) und
- eine Stunde gleich 3 600 Sekunden ($1 \text{ h} = 3 600 \text{ s}$) sind, ist
- eine Kilowattstunde gleich 3 600 000 Wattsekunden oder 3,6 Megawattsekunden ($1 \text{ kWh} = 3 600 000 \text{ Ws} = 3,6 \text{ MWh} = 3,6 \text{ MJ} = 3,6 \text{ MNm}$).

So, wie die aufzuführenden Energiemengen zunehmen, geht man auch immer mit der Einheit jeweils einen Tausender höher:

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

- eine Megawattstunde gleich 1 000 Kilowattstunden
(1 MWh = 1 000 kWh = 10^6 Wh),
- eine Gigawattstunde gleich 1 000 Megawattstunden
(1 GWh = 1 000 MWh = 1 000 000 kWh = 10^9 Wh),
- eine Terawattstunde gleich 1 000 Gigawattstunden
- (1 TWh = 1 000 GWh = 1 000 000 000 kWh = 10^{12} Wh).

Man sieht aber auch die wissenschaftlich formal korrekte Bezeichnung Petajoule [PJ]:

1 PJ = 10^{15} Ws = 10^{15} J – eine Eins mit 15 Nullen. Eigenartiger Weise gerade dann, wenn vom gesamten weltweiten Energieverbrauch – nicht nur der elektrischen – die Rede ist, sieht man meist diese Einheit.

Es gibt aber noch eine viel kleinere Einheit weit unterhalb des Joule: Das Elektronvolt [eV]. Diesem liegt die Tatsache zu Grunde, dass auf ein (seiner Natur nach negativ geladenes) Elektron in einem elektrischen Feld eine Kraft wirkt, da es von der negativen Elektrode abgestoßen und zur positiven hingezogen wird. Ist das Elektron frei beweglich, dann wird es beschleunigt. Beträgt die Spannung zwischen den Elektroden 1 V, so hat das Elektron nach dem Durchlauf eine kinetische Energie von 1 eV. Dabei ist es unerheblich, wie groß der Abstand der Elektroden ist, denn die elektrische Feldstärke – und damit die auf das Elektron wirkende Kraft – ist umso stärker, je kürzer der Abstand ist. Ist der Beschleunigungsweg nur halb so lang, so ist also die beschleunigende Kraft doppelt so groß, so dass in jedem Fall die gleiche Geschwindigkeit erreicht wird, abhängig nur von der Spannung.

Da eine Stromstärke von 1 A bedeutet, dass an einer beliebigen Stelle des Drahtes $6,24 \cdot 10^{18}$ Elektronen pro Sekunde vorbei fließen, ist $6,24 \cdot 10^{18}$ eV = 1 J. Damit ist das Elektronvolt natürlich eine unvorstellbar kleine Einheit – war doch das Joule schon unpraktisch klein – und wird nur für die Atomphysik und in der Chemie für die Betrachtung einzelner Moleküle verwendet. Dafür ist diese Einheit gut geeignet (Abschnitt 5).

8 Nur zum Vergleich: Der Mensch als Antriebsmaschine

Doch zurück ins »wirkliche Leben«: Steigt beispielsweise ein 102 kg (≈ 1000 N) schwerer Mensch 300 m hoch auf den Eiffelturm, so verrichtet er dabei eine mechanische Arbeit von $1000 \text{ N} \cdot 300 \text{ m} = 300\,000 \text{ Nm} = 300\,000 \text{ Ws} = 300\,000 \text{ J} = 300 \text{ kJ}$.

Betrachtet man einen Menschen (z. B. in dieser Situation) als Wärmekraftmaschine, so lässt sich ein Wirkungsgrad von etwa 22% annehmen. Nun ist aber zufällig gerade

$1 \text{ cal} \approx 4,187 \text{ J} = 4,187 \text{ Ws}$.

Damit muss ein Mensch ungefähr eine Kalorie thermischer Energie essen, um ein Joule mechanischer Energie erzeugen zu können. Die restlichen 3,187 J einer jeden verspeisten Kalorie gehen in Wärme über – ob dem Esser das nun passt oder nicht. Um die Körpertemperatur dennoch auf 37°C zu halten, muss der Turmsteiger sich im Rahmen des moralisch Vertretbaren entkleiden. Darüber hinaus muss er auf seiner Körperoberfläche Wasser verdunsten, um die Wärme zu »verbraten« – und das hilft! Gut 0,4 l Wasser muss unser 1 kN schwerer Turmsteiger unterwegs verdampfen, wenn die Kleidung keine Potenziale bietet und auch kein Wind oder Regen die Kühlung unterstützt. Er verbraucht etwa eine Kilokalorie je Meter Höhe (was im Volksmund in der Regel als »Kalorie« bezeichnet wird, ist schon eine Kilokalorie – siehe die Nahrungsmittelpackungen: In [kcal] und in [kJ] werden die Brennwerte

Drehstromzähler
7 CA54 61

Energie – was ist das überhaupt?

4960



dort angegeben). Bei einem Körpergewicht von 500 N, also einer Körpermasse von 51 kg, werden nur noch 500 Kalorien je Meter Höhe verbraucht. Das klingt nach viel, ist aber doch ernüchternd wenig. Schließlich muss man die Joule bzw. Newtonmeter bzw. Wattsekunden zuerst durch 1 000 teilen, um auf Kilowattsekunden zu kommen, und dann noch zwei Mal durch 60, um – unter Auslassung der niemals verwendeten »Kilowattminute« – zur üblichen Einheit Kilowattstunde zu gelangen.

Etwa 300 W mechanische Abgabeleistung schafft ein Profi-Sportler. Unser 1000-N-Mensch müsste also $\frac{1}{3}$ m/s, etwa 2 Treppenstufen je Sekunde, steigen und den Eiffelturm in 15 Minuten bezwungen haben. Die 51 kg schlanke Person müsste es bei dieser Leistung doppelt so schnell geschafft haben – und diese Anstrengung halten z. B. die Teilnehmer der Tour de France oder des Giro d'Italia etwa 6 bis 8 Stunden am Tag aus! Das macht also 1,8 kWh ... 2,4 kWh abgegebener mechanischer Energie pro Tag. Der Verbrauch liegt gut beim Vierfachen hiervon, also mit 860 kcal = 1 kWh um 7000 kcal oder 8 kWh täglich, zuzüglich des »Grund-Verbrauchs« zur Aufrecht-Erhaltung der Körpertemperatur und die Lebens-Grundfunktionen für die übrigen 16 bis 18 Stunden des Tages. Der Radler darf also gut und gerne 4 Mal so viel essen wie normal sterbliche »Schreibtischtäter«, die sich nicht körperlich betätigen und normaler Weise mit etwa 2000 kcal, also rund 3 kWh »Grund-Bedarf« angegeben werden, was für eine mittlere Wärme-Abgabe von etwa 70 W ... 100 W steht. Während der sportlichen Spitzenleistung von 300 W mechanisch sind dagegen 1200 W ... 1500 W an Wärme loszuwerden. Dass es dem Körper dennoch gelingt, seine Temperatur konstant zu halten, grenzt an ein biologisches Wunder. Ganz ohne Kühlung finge der Radprofi nach ein paar Stunden an zu kochen! Aber der Fahrtwind unterstützt die körpereigene Kühlung durch Schwitzen schon beträchtlich. Überhaupt kein Problem haben an diesem Punkt die Schwimmer, da der Wärme-Übergang von Haut an Wasser etwa 30 Mal so stark ist wie es der Wärme-Übergang von Haut an Luft ohne Schwitzen wäre.

Die rund 2 kWh mechanischer Energie, die unsere Sportler aus Abschnitt 3.3 »sinnlos verballern«, ließen sich mit hohem Wirkungsgrad – etwa 90% – in nahezu 2 kWh elektrische Energie umwandeln, würden sie nicht eingesetzt, um in den Pyrenäen herum zu rasen, und damit könnte der Radler daheim seine Stromrechnung um gut 50 Cent entlasten (einschließlich EEG-Umlage). Bei uns ungeübten »normal Sterblichen« gehen wir lieber von 75 W und einer Ausdauer von 2 Stunden aus – im Gegenwert von etwa 2 Cent. Na toll, 1 Cent pro Stunde. Nein, so geht das nicht. Das Fahrrad-Ergometer ist kein Ersatz für Kraftwerke. Da müssen andere Stromquellen her.

Wie das geht, lesen Sie in der Schrift »Euro-Verbundnetz – wie funktioniert das?« in unserer [Mediathek](#).

¹ Deutsches Kupferinstitut – Mediathek – Technische Auskunft: »Licht – was ist das überhaupt?«

² Stefan Fassbinder: »Der Weg zur Energiewende – Chancen und Hindernisse«, Teil 3: »Knackpunkt Energiespeicher – thermische und chemische« (www.elektropraktiker.de/nc/fachinformationen/fachartikel/der-weg-zur-energiewende-chancen-und-hindernisse)

³ Deutsches Kupferinstitut – Mediathek – Technische Auskunft: »Strom und Elektrizität – Wie kommt der Strom in die Steckdose?«

⁴ Karsten Jungk: »Radon – allgegenwärtige Gefahr aus dem Untergrund«, Elektropraktiker 1/2019, S. 54

⁵ Markus Gehrig: »SI-Einheitensystem«. ET Elektrotechnik 1/2020, S. 42