

2007  
highlights der **physik**

Veranstalter:



Partner:



Medienpartner:



Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten die Deutsche Physikalische Gesellschaft und das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre ist zu den „Highlights der Physik 2007: Energie – aber wie?“ erschienen (Frankfurt am Main, 27.8. – 2.9.2007), Infos: [www.physik-highlights.de](http://www.physik-highlights.de)

# Energie aber wie?

Wissenschaftsmagazin

# Energie aber wie?



4



8



16



18



22



26

- 4** Am Anfang war das Feuer
- 8** Energiefabriken
- 16** Lebenskraft
- 18** Kraftpakete
- 22** Reiserouten
- 26** Energie – aber wie?  
Was tun gegen den Klimawandel?

IMPRESSUM

**HERAUSGEBER**  
Deutsche Physikalische  
Gesellschaft e.V. (DPG)  
Bundesministerium für  
Bildung und Forschung

**AUTOR**  
Roland Wengenmayr

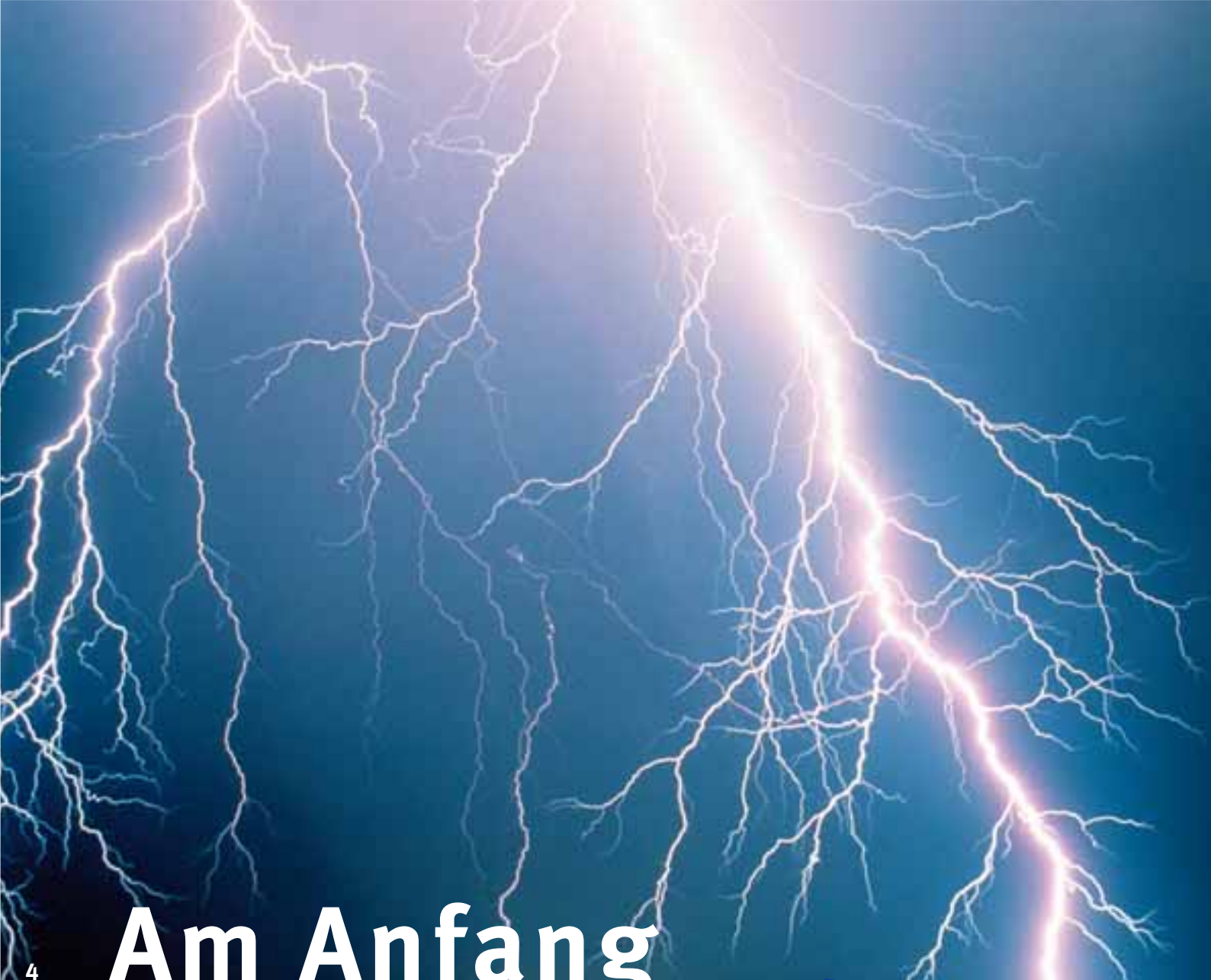
**WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG**  
Prof. Dr. Eberhard F. Wassermann

**INFORMATIONEN ZUM INHALT**  
Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.  
Pressestelle  
Rathausplatz 2-4  
53604 Bad Honnef  
Tel. (0 22 24) 95 195 - 18  
Fax (0 22 24) 95 195 - 19  
presse@dpg-physik.de

**KONZEPT, REDAKTION UND GESTALTUNG**  
**iserundschmidt**  
Kreativagentur für PublicRelations GmbH  
Bonn – Bad Honnef – Berlin  
(Verantwortlich: Dr. Marcus Neitzert,  
Claudia Oly, Timo Meyer, Marleen Schwalm)

August 2007

Bildquellen: PhotoDisc, Siemens, picture-  
alliance/dpa, Tesla Motors, pixelio.de,  
EUMETSAT



# Am Anfang war das Feuer

Glaubt man den alten Griechen, so war es der sagenhafte Prometheus, der der Menschheit das Feuer brachte. Er entzündete dazu einen Stängel des mythischen Riesenfenchels am Wagen des Sonnengottes Helios. Es ist kein Zufall, dass die Menschen früher der brennenden Glut göttliche Eigenschaften zusprachen. Sie kannten Feuer meist als Folge „himmlischer“ Naturereignisse. Vor allem Gewitter konnten mit Blitzeinschlägen verheerende Brände auslösen. Archäologische Funde beweisen, dass schon Frühmenschen wie Homo erectus das Feuer vor vielen Hunderttausend Jahren nutzten. Sie sammelten dazu die Glutreste natürlicher Brände ein. Später lernten unsere Vorfahren, wie sie selbst Feuer anzünden konnten. Die Neandertaler verwendeten dazu bereits vor über 40.000 Jahren Feuerstein, Eisenkies und Zunderschwamm. Ein ähnliches Feuerzeug steckte auch im Gepäck von

Ötzi, der 5.000 Jahre alten Gletschermumie aus den Alpen. Das **Feuermachen** war ein entscheidender Schritt in der Menschheitsgeschichte. Denn die Menschen erwarben so die Fähigkeit, Energie gezielt zu nutzen. Heute wissen wir, dass die Energie, die Blitzen und Gewittern innewohnt, tatsächlich von „Helios“ kommt. Antriebskraft ist nämlich die Sonne, deren Energie in Form elektromagnetischer Strahlung auf unseren Planeten gelangt. Elektromagnetische Strahlung, zu der auch das Licht gehört, ist pure Energie. Diese Einsicht verdanken wir genialen Forschern wie dem Briten James Maxwell (1831 - 1879), Max Planck (1858 - 1947) und Albert Einstein (1879 - 1955). Mit rund 300.000 Kilometern pro Sekunde flitzt diese Strahlung durch das All. Die Strecke von der Sonne zur Erde überbrückt sie so in gerade mal acht Minuten.

Hier eingetroffen treibt die Energie der Sonne nicht nur gewöhnliche Gewitter, sondern auch gewaltige Wirbelstürme an. In der Hurrikan-Saison (im Atlantik beispielsweise von Anfang Juni bis Ende November) heizt sie das Meer in Äquatornähe mächtig auf. Dabei verdunsten gigantische Wassermengen. Für diesen Phasenübergang vom flüssigen Wasser in den gasförmigen Wasserdampf „tanken“ die Wassermoleküle kräftig Wärmeenergie aus der Sonne, um der Bindung im flüssigen Wasser zu entkommen. Sind sie erst einmal frei, transportieren sie die umgewandelte Sonnenenergie zusammen mit der aufsteigenden Warmluft in riesigen Mengen in die Atmosphäre. In einigen Kilometern Höhe wird es jedoch so kalt, dass die Moleküle wieder zu Wassertropfen kondensieren. Im Prinzip passiert das Gleiche beim Kochen, wenn sich Wasser am Topfdeckel niederschlägt.

☞ Erste Erfahrungen mit dem Feuer sammelten die Urmenschen vermutlich durch Busch- und Waldbrände, die ein Blitzschlag entzündete. Bild: PhotoDisc

☞ Im Laufe der Zeit lernten unsere Vorfahren die Kunst des Feuermachens: Sie nahmen dazu Feuerstein, um aus Eisenkies (auch Pyrit genannt) glühende Funken herauszuschlagen, die sie mit Zunderschwamm auffingen. Mit trockenem Gras und vorsichtigem Pusten, konnten sie dann die Glut entfachen. Bild: Gunter Schöbel, Pfahlbaumuseum Unteruhldingen

☞ Brodelnde Lava ist Zeichen der Hitze im Inneren der Erde. Weniger offensichtlich ist die Erdwärme außerhalb vulkanischer Regionen. Aber auch dort steigt die Temperatur, je tiefer man ins Erdreich vordringt: im Mittel um 3 °C pro 100 Meter. Bild: PhotoDisc



## KALORIEN & CO.

Wie alle physikalischen Größen, kann man auch die Energie quantitativ vermessen. Die zugehörige Maßeinheit heißt *Joule*, benannt nach James Prescott Joule (1818 - 1889). Der englische Naturforscher untersuchte seinerzeit, wie kräftiges Rühren Wasser durch Reibung erwärmt. Doch ähnlich wie sich eine Entfernung wahlweise in Kilometern oder Meilen ausdrücken lässt, so gibt auch für die Energie diverse Maßeinheiten. Der Energiegehalt von Lebensmitteln beispielsweise wird traditionell in Kalorien angegeben. Per Definition ist eine *Kalorie* jene Wärmemenge, die man einem Gramm Wasser zuführen muss, um dessen Temperatur um ein Grad Celsius (konkret: von 14,5 °C auf 15,5 °C) zu erhöhen. Ingenieure wiederum rechnen in *Wattsekunden* (Ws) und *Kilowattstunden* (kWh). Die verschiedenen Einheiten hängen folgendermaßen zusammen:

**1 Kalorie = 4,187 Joule**  
**1 Joule = 1 Ws = 0,278 x 10<sup>-6</sup> kWh**

Gebräuchlich sind außerdem *Kilojoule* und *Kilokalorie*. Tausend Joule sind ein Kilojoule, tausend Kalorien eine Kilokalorie.

So entstehen Regenschauer. Doch woher kommt der Wind? Die Kondensation zu Wassertropfchen setzt die Energie, die bei der Verdampfung aufgenommen wurde, wieder frei und bringt Fahrt in die Luftmoleküle. Anfangs entstehen viele kleine Brisen, die schließlich zu einem Sturm anschwellen. Wenn das Meereswasser auf mindestens 27 Grad Celsius aufgeheizt ist, kann er zu einem echten Hurrikan anwachsen. Sie haben Windgeschwindigkeiten ab 120 Kilometern pro Stunde.

Der Wind – und damit umgewandelte Sonnenenergie – spielt auch eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Blitzen. Für ihre elektrische Energie sorgen wahrscheinlich starke Aufwinde in den Gewitterwolken. Die Luftmoleküle reiben sich dort kräftig an Wassertropfchen und Eisparkeln, die sich dabei elektrisch aufladen –

wie beim Reiben eines Gummistabs mit einem Katzenfell. Während die positiv geladenen Tropfen nach unten fallen, bleiben die negativ geladenen Eispartikel oben in der Wolke. Mit wachsender Distanz steigt die elektrische Spannung zwischen Eis und Wasser. Schließlich entlädt sie sich in Blitzen. Wind und Niederschläge sind also umgewandelte Sonnenenergie.

Auch das Leben basiert fast ausschließlich auf solarer Energie, denn Pflanzen setzen die Strahlung der Sonne durch Photosynthese in biochemisch verwertbare Energie um. Sie produzieren dabei energiereiche Biomasse, die Mensch und Tier ernährt. Nebenbei reichern sie die Atmosphäre mit lebensnotwendigem Sauerstoff an.

Energie ist also etwas, das sich permanent von einer Form in eine andere umwandelt.

Richtig fassbar ist sie nicht. Ihre Auswirkungen sind uns trotzdem vertraut. Denn Energie befähigt Lebewesen und Maschinen zur Arbeit – sei es Radfahren, das Stemmen eines Gewichts oder das Antreiben eines Motors. Außerdem können wir Energie in verschiedenen Formen wahrnehmen, etwa als Wärme, Wind, Schall, Bewegung oder Elektrizität. Die Kernenergie hingegen ist eine Energieform, die sich unseren Sinnen entzieht. In der Natur macht sich sie gleichwohl als Wärme aus dem **Erdinneren** bemerkbar. Diese speist sich nämlich größtenteils aus dem Zerfall radioaktiver Elemente.

Die natürlichen Energiekreisläufe brachten Physiker Mitte des 19. Jahrhunderts auf eine fundamentale Erkenntnis. Hermann von Helmholtz (1821 - 1894) formulierte sie im berühmten Energieerhaltungssatz. Nach diesem muss die Energiemenge in einem



**ZICK-ZACK:**

Mikroskopisch betrachtet ist Wärme unregelmäßige Teilchenbewegung. Luftmoleküle beispielsweise flitzen mit zunehmender Temperatur immer schneller umher und stoßen dabei ständig aneinander, so wie die Kugeln beim Billiardspiel. Auch Wassermoleküle bewegen sich hektischer, steigt die Temperatur. Haben sie genug Energie getankt, lösen sie sich aus dem Verband des flüssigen Wassers: Dampf steigt auf. Bild: pixelio.de



Bei Spannweiten von 100 Metern und mehr leisten moderne Windkraftwerke bis zu fünf Megawatt. Bild: Multibrid



Bei 100 km/h schluckt der Luftwiderstand etwa 2/3 der Motorleistung eines Mittelklasse-Wagens. Mit Hilfe des Windkanals können die Strömungsverhältnisse optimiert werden. Bild: DaimlerChrysler

Angesichts knapper Ressourcen werden Öl und Gas nicht nur Land, sondern auch auf See gefördert. Die dafür genutzten Bohrinseln sind riesig: Die abgebildete „Troll“ würde mit 472 m Gesamthöhe sogar den Eiffelturm überragen. Inzwischen ist sie vor der norwegischen Küste verankert, wo ihre Stelzen unter Wasser liegen. Bild: Statoil



**AUFGERIEBEN**

Ohne Reibung wäre Autofahren deutlich sparsamer, als es auf unseren Straßen der Fall ist. Ein 1.000 kg schweres Mittelklasse-Auto enthält bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h rund 400 Kilojoule an Bewegungsenergie. Diese Energie müsste der Wagen im Idealfall nur einmal, nämlich zur Beschleunigen aufbringen. Danach könnte er ewig weiterrollen. In der Realität jedoch vernichtet die Reibung ständig Bewegungsenergie, die der Motor nachliefern muss. Dabei dominieren die Rollreibung der Reifen und die Luftreibung. Wenn ein typisches Mittelklasse-Auto eine Minute lang 100 km/h fährt, muss der Motor rund 250 Kilojoule an Arbeit verrichten, um den Rollreibungsverlust auszugleichen. Für die Überwindung des Luftwiderstands braucht der Motor weitere 500 Kilojoule. Die Reibung im Getriebe frisst nochmals 15 Prozent der Antriebsleistung (Frontantrieb). In der Summe muss der Motor während der 60 Sekunden also gut 850 Kilojoule aufbringen, um 100 km/h Dauergeschwindigkeit zu halten. Dies entspricht einer Leistung von 15 Kilowatt bzw. 20 PS. Für Tempo 200 sind dagegen fast 90 Kilowatt nötig. Mit diesen Zahlen lässt sich der Kraftstoffverbrauch abschätzen: Moderne Benzinmotoren haben einen Wirkungsgrad von ungefähr 30 Prozent. Beim Betrieb gehen somit 70 Prozent der im Benzin chemisch gespeicherten Energie verloren. Mithin steht von den rund 30.000 Kilojoule, die ein Liter Benzin (reines n-Oktan) enthält, effektiv auch nur gut ein Drittel zur Verfügung. Für einen 100 km/h schnellen Mittelklassewagen folgt daraus ein Verbrauch von gut 5 Litern auf 100 Kilometern – bei doppelter Geschwindigkeit würde er dafür rund 16 Liter schlucken!

das dem Meerwasser Wärme entzieht und mit dieser Energie seinen Motor antreibt.

**Energieformen**

**Potentiell** 70 kg schwerer Springer auf dem 10-Meter-Turm: 7 Kilojoule. Bild: PhotoDisc



**Kinetisch** 1.000 kg schwerer Mittelklassewagen mit 64 km/h (Crashtest nach Euro-NCAP-Norm): 160 Kilojoule. Bild: ADAC



**Chemisch** 100 g Braunkohle oder Schokolade (1 Tafel): 2.000 Kilojoule. Bild: ius



**Atomar** 100 g Kernbrennstoff (3-prozentig angereichertes Uran): 200 Millionen Kilojoule. Bild: Electricité de France



**Elektromagnetisch** Energie, die Sonne pro Sekunde abstrahlt: 380 Trilliarden Kilojoule (Trilliarde = 10<sup>21</sup>). Bild: NASA/ESA



perfekt isolierten System immer gleich bleiben. Sie kann sich nur von einer Form in eine andere umwandeln. Energie kann also weder aus dem Nichts heraus entstehen, noch einfach verschwinden. Deshalb scheidet jeder Versuch, ein Perpetuum mobile (lateinisch für „ewig in Bewegung“) zu konstruieren. Keine Maschine kann andauernd Arbeit verrichten, ohne dafür Energie in irgendeiner Weise aufzunehmen. Insbesondere kann sie nicht Energie aus dem Nichts herbeizaubern.

Verbrauchen wir Öl, Erdgas oder Strom, sprechen wir auch von Energieverbrauch. Nach dem Energieerhaltungssatz ist diese Bezeichnung eigentlich falsch, denn Energie verschwindet nicht. Wir wandeln sie lediglich von einer für uns nutzbaren Form in eine andere Form um, die uns technisch nicht mehr zugänglich ist. Schlussendlich ist das immer Wärmeenergie, die an die Umwelt verloren geht. Ein Teil davon strahlt unser Planet in den Weltraum ab.

**Wärme** kann transportiert werden, wie schon der Wasserkreislauf in der Atmosphäre zeigt. Mit dem Wärmetransport eng verknüpft ist eine Änderung der Temperatur. Denn von einem heißeren Objekt fließt so lange Wärme ins kältere Objekt, bis beide exakt dieselbe Temperatur haben. Deshalb schmilzt im Sommer unser leckeres Eis auch im Schatten. Die Luftmoleküle nämlich transportieren so lange Wärme ins Eis, bis es zu Fruchtwasser zerläuft und sich danach auf Umgebungstemperatur aufwärmt.

Technisch nutzbare Energieformen gibt es viele. Ein Beispiel ist der Wind, also strömende Luftmoleküle. Einen Teil dieser Bewegungsenergie, die auch **kinetische Energie** heißt, kann ihnen ein Windrad entziehen. Nach dem Passieren seiner Flügel strömt die Luft langsamer. Dafür hat das Windrad Bewegungsenergie (Rotationsenergie) aufgenommen, denn nach dem Energieerhaltungssatz muss die Gesamtenergie des

Systems aus Wind und Windrad ja gleich bleiben. Damit kann es einen elektrischen Generator antreiben, der aus der Energie des Windes schließlich Strom erzeugt.

Ein anderer Speicher für physikalische Energie ist ein hoch gelegener Stausee, der das Schmelzwasser aus den Bergen für ein Wasserkraftwerk sammelt. Hoch droben hat das Wasser im Erdschwerefeld eine höhere potentielle Energie als im Tal. Wenn es durch Rohrleitungen hinunter stürzt, wird aus der potentiellen Energie Bewegungsenergie. Damit setzt der Wasserstrom die Kraftwerksturbinen in Bewegung.

Ein Motor dagegen zapft chemische Energie an: Benzin enthält in seinen molekularen Verbindungen viel Energie. Es ist, bezogen auf sein Volumen, einer unserer chemischen Energiespeicher mit der höchsten Dichte – noch besser als Schokolade oder Butter. Durch Verbrennen mit Sauerstoff (Oxida-

tion) wird die gespeicherte Energie als Wärme frei. Verbrennungsmotoren können einen Teil dieser Wärmeenergie in mechanische Arbeit, also etwa Vortrieb, umwandeln.

Wenn Motoren oder Muskeln Arbeit verrichten, kommt die „Leistung“ ins Spiel. Ähnlich wie die Geschwindigkeit darüber Auskunft gibt, in welcher Zeitspanne eine Strecke zurückgelegt wird, so beschreibt die Leistung, wie viel Arbeit pro Zeiteinheit verrichtet wird; die Leistung gibt also insbesondere an, wie schnell Energie umgesetzt wird. Bei Autos spricht man dann von den berühmten Pferdestärken, die heute allerdings in Watt oder Kilowatt (kW) gemessen werden (1 PS = 0,735 kW). Schaffen ein Muskel oder eine Maschine ein Joule pro Sekunde, so leisten sie ein Watt. Erreicht man bei einem Belastungstest auf dem Fahrradtrainer 200 Watt, ist man kerngesund. Geht einem schon bei 50 Watt die Puste aus – man leistet dann so viel wie ei-

ne gewöhnliche Glühlampe –, dann wird es Zeit, Sport zu machen.

Selbst der effizienteste Motor kann die Wärmeenergie aus der Verbrennung leider nicht komplett in Arbeit umsetzen. Ein großer Anteil geht als nutzlose Abwärme an die Umwelt verloren. Je mehr Nutzarbeit eine Maschine aus der zugeführten Wärmemenge gewinnt, desto höher ist ihr Wirkungsgrad. Ideal wären natürlich hundert Prozent Wirkungsgrad. Damit würden Autos oder Motorräder die Verbrennungswärme des Benzins komplett in Vortrieb verwandeln. Und der Auspuff bliebe kalt. Leider verdirbt dieses Gedankenspiel ein physikalischer Erfahrungssatz. Dieser geht insbesondere auf den Franzosen Sadi Carnot (1796 - 1832) zurück. Nach diesem „Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik“ bleibt die Umwandlung von Wärme in Arbeit immer begrenzt. Das macht es beispielsweise unmöglich, ein Schiff zu bauen,



# Energiefabriken

Loderndes Feuer war für unsere Vorfahren das Sinnbild für Energie. Heute denken wir dabei nicht nur an Wärme, sondern auch an den Strom aus der Steckdose. Die Elektrizität kommt größtenteils aus Kraftwerken, während Wärme hierzulande meist in den eigenen vier Wänden produziert wird. Dazu verbrennt die Heizungsanlage im heimischen Keller, in der Gastherme oder dem Kamin fossile Brennstoffe oder Holz. Mitunter kommt auch die Wärme von weither, doch Fernheizungsnetze sind in Deutschland weniger verbreitet als in anderen Ländern. Solche Netze transportieren Wärme, die in Kraftwerken als Nebenprodukt der Stromerzeugung entsteht, im dort erhitzten Wasser oder Wasserdampf bis zum Verbraucher. Diese Kombination aus Stromerzeugung und Nutzung der Abwärme heißt „Kraft-Wärme-Kopplung“. Weil solche Kraftwerke ihre Abwärme nicht einfach in die Umgebung emittieren, sind sie besonders effizient.

Heute decken fossile Brennstoffe, also Kohle, Erdöl und Erdgas fast achtzig Prozent des weltweiten Bedarfs an Primärenergie. In Deutschland ist es ähnlich. Zur Primärenergie zählen alle Energieträger, die direkt nutzbar sind. Ein Teil wird weiter zu Endenergieträgern veredelt. Erdöl wird zum Beispiel zu Benzin, Diesel und Kerosin (Flugbenzin) verarbeitet. Elektrischer Strom zählt ebenfalls zu den Endenergieträgern und wird aus unterschiedlichsten Primärenergieträgern hergestellt. Hierzulande beruht die Stromversorgung wesentlich auf Kernenergie und Kohle.

Fossile Brennstoffe sind uralte Biomasse. In ihr ist über Jahrtausende gesammelte Sonnenenergie chemisch gespeichert, bei Kohle sogar im reinen Kohlenstoff. In Erdöl und Erdgas steckt sie vor allem in der chemischen Bindung zwischen Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen. Ein Beispiel ist Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas: Wenn es

mit Sauerstoff verbrennt, wird Energie frei, weil die Speicherenergie im Methan höher ist als in den Verbrennungsprodukten – also Kohlendioxid und Wasser. Dieses chemische Energiegefälle erinnert an das physikalische Gefälle, das Wasserturbinen antreibt. Die Verbrennung verwandelt die chemische Energie in Wärme, die direkt zum Heizen oder indirekt für Arbeit nutzbar ist. Der Preis dafür ist die Anreicherung der Atmosphäre mit dem Treibhausgas Kohlendioxid.

Auch Brennholz und Holzkohle gehören zu den wichtigen Primärenergieträgern. Bei ihrer Verbrennung geben sie genauso viel Kohlendioxid frei, wie sie durch das Wachstum der Pflanzen zuvor der Atmosphäre entzogen haben. Deshalb zählen Statistiker diese traditionelle Biomasse zu den erneuerbaren Energien. Das ist aber nur korrekt, wenn die Menschen nicht mehr verbrauchen als nachwächst. Ein Stück Brennholz enthält im Übrigen nur etwa

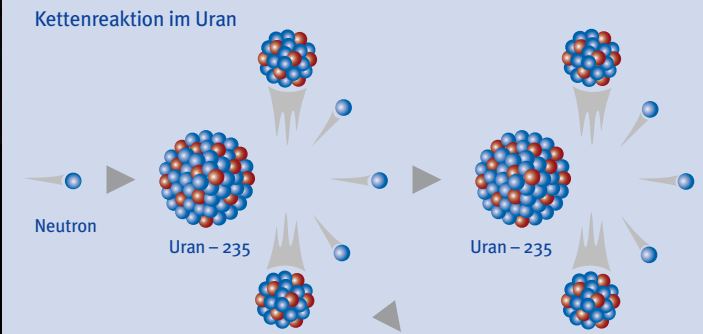


↑ Heißes Plasma leuchtet im Inneren einer Testanlage zur Kernfusion. Bild: MPI für Plasmaphysik (IPP)

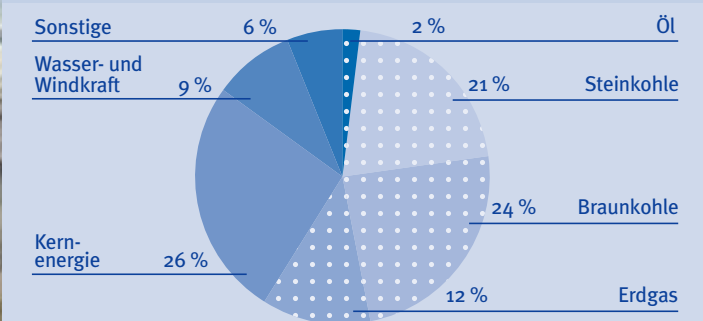
↓ Braunkohle zählt hierzulande zu den wichtigsten Energieträgern. Abgebaut wird sie mittels riesiger Schaufelradbagger. Bild: RWE



↔ Strom und Wasser aus einer Hand: Das Gas- und Dampfkraftwerk in Shuweihat am Persischen Golf liefert 1.500 Megawatt (1 Megawatt = 1 Millionen Watt) an elektrischer Leistung und ist mit einer Meerwasserentsalzungsanlage gekoppelt, die täglich bis zu 450 Millionen Liter Trinkwasser bereitstellt. Bild: Siemens



↑ Kernkraftwerke leisten 1.000 Megawatt und mehr. Energie gewinnen sie aus einer Kettenreaktion, bei der Atomkerne durch Neutronen (besondere Kernteilchen) gespalten werden. Bild: ius



↑ Stromerzeugung in Deutschland (Quelle: AG Energiebilanzen, 2006), fossile Brennstoffe sind mit einem Punktmuster markiert.

halb so viel Energie wie ein Stück Steinkohle gleichen Gewichts.

Uran, Brennstoff für Kernkraftwerke, zählt auch zu den wichtigen, nicht erneuerbaren Primärenergieträgern. Von diesem Metall gibt es verschiedene Sorten wie U-238 und U-235. Übliche Kernreaktoren spalten U-235. Davon enthalten Uranerze gerade einmal 0,7 Prozent. Viel zu wenig, um eine Kettenreaktion zu starten. Kernreaktoren benötigen deshalb „angereichertes“ Uran. Diese Form der Aufbereitung steigert den Anteil von U-235 auf drei bis fünf Prozent.

Die Kernspaltung setzt gewaltige Energiemengen aus den Bindungskräften der Atomkerne frei. Um den jährlichen Bedarf einer Millionenstadt an elektrischer Energie zu decken, muss ein Kohlekraftwerk über zwei Millionen Tonnen Steinkohle verbrennen. Ein Kernkraftwerk benötigt im Vergleich dazu weitaus weniger Material: von drei-

prozentig angereichertem Uran etwa 30 Tonnen. Kernenergie ist in Deutschland die wichtigste Stromquelle. Dennoch ist sie umstritten, weil bei einem schweren Störfall Radioaktivität in die Umwelt gelangen kann. Zudem bleibt ein Teil des Abfalls, der beim Betrieb eines Kernkraftwerks entsteht, sehr lange radioaktiv. Für seine „Endlagerung“ muss er deshalb über viele Jahrtausende sicher verwahrt werden. Deshalb muss die Gesellschaft diese Risiken gegen den Vorteil abwägen, dass solche Kraftwerke unter dem Strich sehr wenig Treibhausgase produzieren – selbst wenn man die komplette Abfolge von der Kernbrennstoffproduktion bis zum „fertigen“ Atomstrom berücksichtigt.

Die Kernfusion speist sich ebenfalls aus den Bindungskräften der Atomkerne. Dieser Prozess setzt noch weit mehr Energie frei als die Kernspaltung und bringt damit unsere Sonne zum Leuchten (s. Seite 14/15).

In ihrem Inneren verschmelzen die Atomkerne von Wasserstoff – bei enormem Druck und 15 Millionen Grad Temperatur – zu Heliumkernen. In künftigen Fusionsreaktoren soll eine ähnliche Reaktion ablaufen. Das geschieht in einem über 100 Millionen Grad heißen, elektrisch geladenem Gas, einem Plasma. Bei der Fusion wird eine gewaltige Energiemenge frei: Ein Kilogramm Wasserstoff liefert etwa so viel nutzbare Wärmeenergie wie das Verbrennen von tausend Tonnen Kohle! Allerdings werden Fusionskraftwerke kaum vor 2050 ans Netz gehen, denn sie benötigen noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Ein Schritt auf diesem Weg ist der internationale Testreaktor ITER im südfranzösischen Cadarache. Er soll um 2016 den Betrieb aufnehmen und erstmals zehnmals mehr Fusionsenergie erzeugen, als er für sein heißes Plasma verbraucht.

Kein heißer, sondern ein dynamischer Energieträger ist das Wasser. Die Wasserkraft

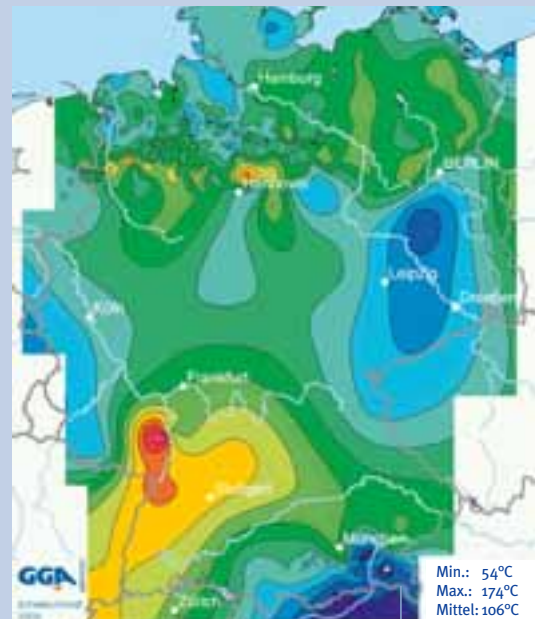


☞ Dampfturbine und Turbinenschaufeln aus nächster Nähe. Bild: Siemens

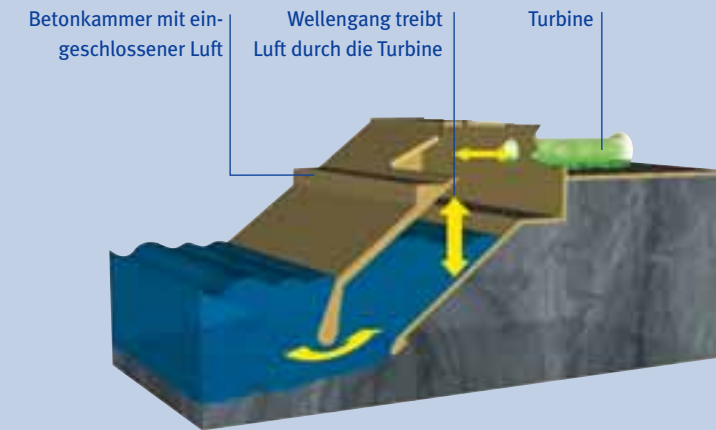
⚙️ Kreislauf in einem dampfbetriebenen Kraftwerk: Eine Wärmequelle erzeugt Dampf unter hohem Druck, der eine Turbine antreibt. Im Anschluss wird der Wasserdampf abgekühlt und kondensiert zu Wasser. Dieses wird zurück zum Dampferzeuger geleitet. Bild: ius



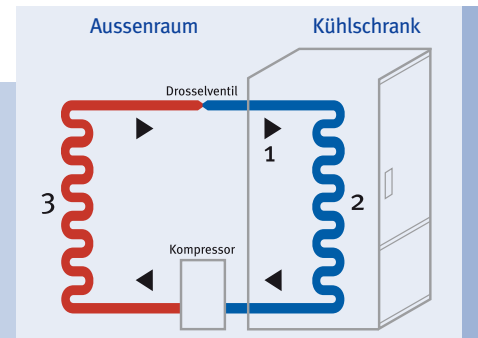
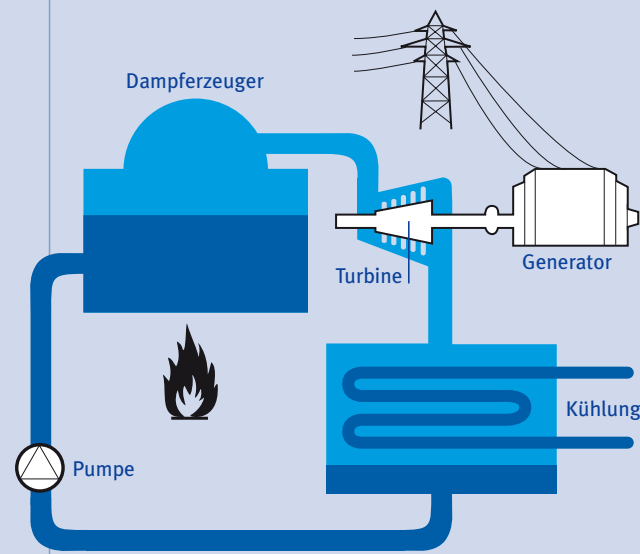
☞ Varianten der Solarthermie: Bei Turm-Anlagen (1. Bild links) wird die Sonnenstrahlung von Spiegeln auf einen Turm gerichtet, bei Kraftwerken mit Parabolrinnen-Kollektoren (2. Bild links) auf ein Rohr fokussiert, das oberhalb der Kollektoren verläuft. In beiden Fällen wird letztendlich Dampf erzeugt. Bilder: DLR



☞ Temperaturen in Deutschlands Untergrund in einer Tiefe von 3 km: Am wärmsten ist es unterhalb von Niedersachsen und an der Grenze zwischen Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg mit Spitzenwerten um 180 °C. Bild: GGA, Hannover



☞ Das Wellenkraftwerk auf der schottischen Insel Islay bringt es auf 0,5 Megawatt Leistung. Dessen Herzstück – eine röhrenartige Turbine – wird vom Luftstrom angetrieben, den der Wellengang verursacht. Bild: Wavegen



### KÄLTEMASCHINEN

Während Wärmekraftmaschinen aus Wärme nutzbare Arbeit gewinnen, lässt sich mit Wärmepumpen unter Aufwendung von Arbeit Wärme transportieren. Damit lassen sich sogar Häuser heizen. Die nötige Wärme wird zum Beispiel dem Erdboden oder dem Grundwasser entnommen. Der Kühlschrank arbeitet ähnlich. Auch er transportiert Wärme: nämlich von seinem Inneren zu den Kühlrippen an der Außenseite. Dort wird sie an die Zimmerluft abgegeben. Transportmittel der Wärme ist ein Arbeitsmedium (sprich: Kühlmittel), das bei den üblichen Kompressor-Kühlschränken innerhalb eines geschlossenen Kreislaufs zirkuliert. Es wird dabei abwechselnd verdampft und verflüssigt. Beim Übergang in den dampfförmigen Zustand nimmt es Verdampfungswärme auf. Wenn sich das Kühlmittel verflüssigt, wird dieselbe Wärmemenge als Kondensationsenergie wieder frei. Technisch funktioniert das folgendermaßen: Über eine Rohrleitung gelangt das flüssige Kühlmittel ins Innere des Kühlschranks (1). Dort verdampft es und entzieht dem Kühlschrank Wärme (2). Im nächsten Schritt wird das nun gasförmige Kühlmittel abgesaugt, mit einem Kompressor verdichtet und in die Kühlschlangen an der Außenseite geleitet. Dort kondensiert es, wobei es Wärme an die Umgebung abgibt (3). Über ein Drosselventil, das den Druck reguliert, gelangt das jetzt wieder flüssige Kühlmittel ins Innere des Kühlschranks und der ganze Ablauf beginnt von neuem.

Auch Fahrzeugmotoren arbeiten bekanntermaßen mit Hitze, wozu sie ein Gemisch aus Luft und Benzindampf zur kontrollierten Explosion bringen. Dieselmotoren erreichen dabei höhere Temperaturen als benzingetriebene Ottomotoren, weil sie die angesaugte Luft stärker verdichten. Deswegen liegt ihr „thermischer“ Wirkungsgrad mit 42 Prozent höher als beim Benziner mit nur

hat zwar nur einen Anteil von zwei Prozent am globalen Primärenergieverbrauch, denn sie liefert keine Wärme. Dafür kommen weltweit rund 16 Prozent des elektrischen Stroms aus Wasserkraftwerken, was sogar die Leistung der Kernkraft übertrifft. So ist Wasserkraft bislang die einzige erneuerbare Energiequelle, die global gesehen nennenswert zur Stromproduktion beiträgt.

Erneuerbare Energieträger werden weltweit immer mehr genutzt. Insgesamt betrachtet ist ihr Beitrag jedoch noch gering. Immerhin stammen in Deutschland zurzeit rund 12 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen. Die Hauptproduzenten sind Wind- und Wasserkraft.

Die effiziente Nutzung erneuerbarer Energieträger erfordert oft anspruchsvolle Techniken, von denen manche erst im Entwicklungsstadium sind. Langfristig haben sie gegenüber den fossilen Brennstoffen nicht nur den Vorteil, dass sie den Ausstoß an

Treibhausgasen senken. Sie sind vor allem praktisch unbegrenzt vorhanden. Die wichtigste, regenerative Quelle ist Sonnenenergie. In umgewandelter Form steckt sie in der Biomasse, der Wasserkraft, Windkraft und dem vom Wind angetriebenen Meereswellen, deren Energie Wellenkraftwerke anzapfen können. Enormes Potential bietet zudem die geothermale Wärme aus der Tiefe. Sie ist zum Teil dort seit der Entstehung der Erde gespeichert. Der größere Anteil stammt aus dem Zerfall radioaktiver Elemente, die in der Erdkruste natürlich vorkommen. Eine dritte, exotisch anmutende Quelle erneuerbarer Energie ist der Mond. Er sorgt für die Wasserströme von Ebbe und Flut. Gezeitenkraftwerke können sie dort nutzen, wo ein großer Tidenhub auftritt.

Um auf die verschiedenen Energieformen zugreifen zu können, haben die Menschen im Laufe der Jahrhunderte immer komplexere, mehrstufige Techniken entwickelt. Sie schreiben damit die Geschichte fort,

die sie einst mit der Nutzung des Feuers begannen, denn die meisten Prozesse erzeugen zunächst einmal Wärme. Das gilt für die Verbrennung fossiler Energieträger ebenso wie für Kernspaltung, Geo- und auch Solarthermie. In Kraftwerken erhitzt diese Wärme meist Wasser zu Dampf, der nun als „Arbeitsmedium“ dient – so wie bei alten Dampflokomotiven. Auch in einem Automotor steht am Anfang die Wärme. Sein Arbeitsmedium ist jedoch kein Dampf, sondern heißes Verbrennungsgas.

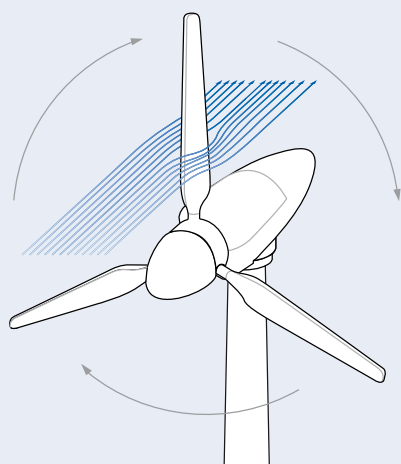
Aus dem heißen Arbeitsmedium müssen diese Techniken in der nächsten Stufe nutzbare Arbeit gewinnen. In Kraftwerken treibt diese dann Stromgeneratoren an, bei Fahrzeugen erzeugt sie Vortrieb. Alle Maschinen, die diesen Schritt leisten, heißen Wärmekraftmaschinen. Ihre Wirkungsweise lässt sich als **Kreisprozess** beschreiben. Das gilt für historische Dampfmaschinen genauso wie für moderne Dampfturbinen, Gasturbinen und Explosionsmotoren. Solche Ma-

schinen benötigen ein heißes Reservoir, aus dem das Arbeitsmedium zu Beginn des Zyklus Wärmeenergie aufnimmt. Dann expandiert das Arbeitsmedium, leistet mechanische Arbeit und kühlt dabei ab. Am Schluss überträgt es seine Restwärme einem kalten Reservoir – bei Kraftwerken meist per Wasserkühlung. Je größer dieser Temperaturhub ist, desto höher ist der Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine. Deshalb arbeiten moderne Erdgas- oder Kohlekraftwerke mit 600 °C heißem Wasserdampf und einem Dampfdruck von 200 bar. Damit erreichen sie Wirkungsgrade von fast 40 Prozent.

Dampftechniken erzeugen ihre Verbrennungswärme außerhalb des eigentlichen Energieerzeugers, das unterscheidet sie von Verbrennungsmotoren und Strahltriebwerken. In einem Kohlekraftwerk beispielsweise erhitzt die Kohleverbrennung Wasserdampf, der die Schaufeln einer Turbine in Gang setzt. An der Kraftwerksturbine hängt ein elektrischer Generator, der die

Rotationsenergie der Turbine in Strom umwandelt. Diese Generatoren funktionieren nach dem Dynamoprinzip, wie bei der Fahrradbeleuchtung. Beim Drahtesel induziert ein rotierender Magnet in einer Drahtspule einen elektrischen Strom. In großen Industriegeneratoren ruht umgekehrt der tonnenschwere Elektromagnet, dafür bewegt sich die leichtere Erregerspule. Auf diese Weise entsteht Wechselstrom.

Solarthermische Turmkraftwerke können mit ihrem Wirkungsgrad punkten. Sie sollen in Zukunft Arbeitstemperaturen bis zu 1.000 °C erreichen. Solche Kraftwerke sammeln mit großen Spiegelfeldern Sonnenlicht ein und fokussieren es wie ein riesiges Brennglas auf einen zentralen Turm. Geothermale Kraftwerke hingegen müssen mit einem geringeren Temperaturhub auskommen: für einen effektiven Betrieb benötigen sie über 150 °C heißes Thermalwasser. Dafür muss man außerhalb vulkanischer Gebiete – etwa in Mitteleuropa – **Kilometer** tief bohren.



### VOM WINDE VERWEHT...

Menschen nutzen Windenergie schon seit mindestens 4000 Jahren. Die alten Windmühlen hatten flache, zum Wind schräg orientierte Flügel. Die Luftströmung drehte diese „Widerstandsläufer“ wie eine simple Schraube. Bei modernen Anlagen sind die Flügel aerodynamisch geformt. Ihr gewölbtes Profil erzeugt wie ein Flugzeugflügel einen Auftrieb gegen die anströmende Luft: Der Flügel will regelrecht in sie hinein abheben. So entziehen diese „Auftriebsläufer“ dem Wind erheblich mehr Energie.

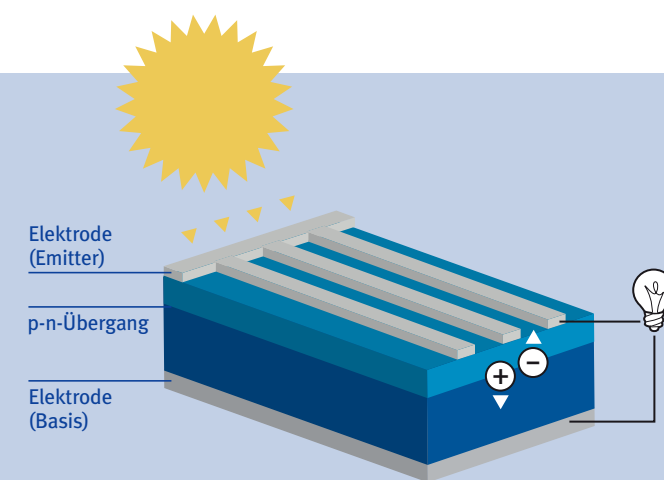
Die Entwickler moderner Windenergieanlagen experimentierten mit ein-, zwei- und dreiblättrigen Rotoren. Je weniger Flügel eine Anlage hat, desto schneller muss der Flügel die durchströmte Fläche überstreichen, um aus dem Wind die gleiche Energie zu gewinnen. Dreiblättrige Rotoren können also langsamer laufen als einblättrige. Das bringt verschiedene Vorteile, weshalb sie heute dominieren. Sie sind wegen der geringeren Geschwindigkeit leiser und neigen weniger zu materialermüdenden Schwingungen. Zudem sind sie aerodynamisch besser zu beherrschen: Bei Windstärke 7 bis 8 erreichen die großen Dreiflügler schon Blattspitzengeschwindigkeiten bis zu 300 km/h. Um sie optimal zur Geschwindigkeit des anströmenden Windes einzustellen, sind die Flügel heutiger Windräder meist über Getriebe drehbar. Ob ein Windrad für Drehungen rechts herum oder links herum gebaut ist, ist im Prinzip natürlich egal. Die Industrie hat sich heute auf „Rechtsrum“ geeinigt. Sie müsste sonst viele Hightech-Teile doppelt produzieren, was viel teurer wäre. Bild: ius



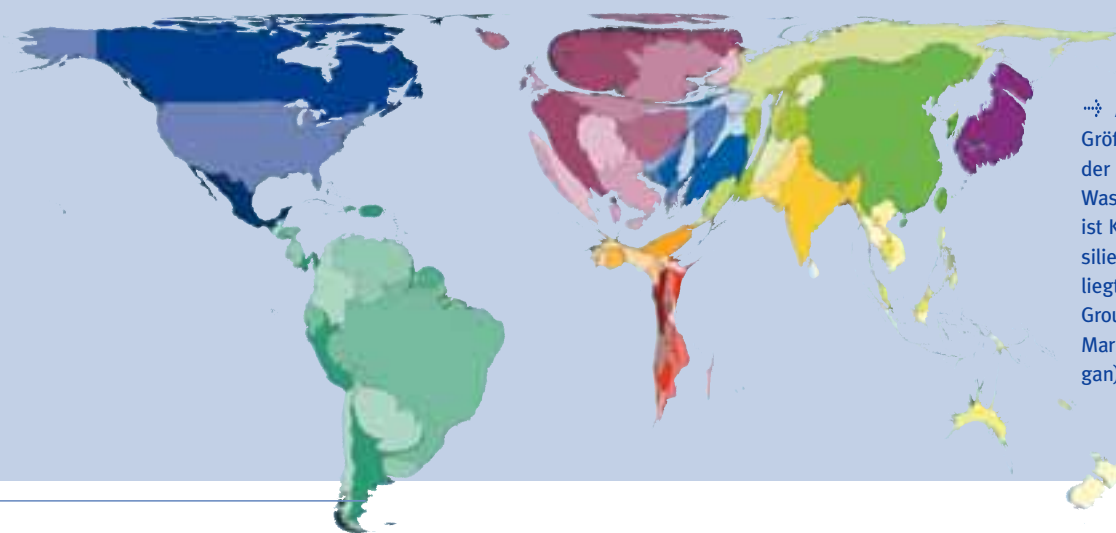
↑ 5-Megawatt-Windrad vor der schottischen Küste. Der Rotordurchmesser beträgt 126 m. Ähnlich große Windräder werden zurzeit vor der Küste Borkums in Stellung gebracht. Dort entsteht unter dem Namen „alpha ventus“ Deutschlands erster Offshore-Windpark. Bild: REpower Systems



↑ Bei Leipzig steht der zurzeit weltweit größte Solarpark mit Dünnschicht-Solarzellen. Die Anlage „Rote Jahne“ leistet 6 Megawatt und ist so groß wie elf Fußballfelder. Bild: Juwi



↑ Funktionsprinzip einer Solarzelle: Licht erzeugt in dem Schichtmaterial eine Ladungstrennung. Über Elektroden an Ober- und Unterseite wird der Strom abgeführt. Bild: ius



→ Auf dieser Karte spiegelt die Größe der Länder deren Anteil an der globalen Stromproduktion aus Wasserkraft wieder. Spitzenreiter ist Kanada, gefolgt von China, Brasilien und den USA. Deutschland liegt um Platz 20. Bild: 2006 SASI Group (University of Sheffield) and Mark Newman (University of Michigan), www.worldmapper.org

36 Prozent. Allerdings senken Reibungsverluste in der Motormechanik den Wirkungsgrad: Ein moderner Diesel kann daher nur 36 Prozent der Verbrennungswärme aus dem Sprit in Vortrieb umsetzen, ein Ottomotor lediglich 31 Prozent.

Anders als Wärmekraftmaschinen funktionieren Wasser- und Windkraftanlagen, ohne dass zuerst Hitze erzeugt werden muss. Sie verwandeln die Bewegungsenergie des Windes oder strömenden Wassers direkt in Rotationsenergie, ohne Umweg über die Wärme. So verzaubern moderne Wasserturbinen-Generatoren über achtzig Prozent der Strömungsenergie des Wassers in elektrische Energie. Solche traumhaften Wirkungsgrade bleiben Wärmekraftmaschinen verschlossen.

Auch Solarzellen verwandeln Sonnenlicht direkt in elektrischen Strom. Das macht sie attraktiv. Fängt eine photovoltaische Zelle ein Lichtquant ein, dann schlägt die-

ses Photon ein Elektron aus dem Verbund der Atome heraus. Das befreite Elektron hinterlässt in dem atomaren Kristallgitter einen leeren Platz. Dieses „Loch“ kann ebenfalls von Atom zu Atom hüpfen und trägt wie das freie Elektron zum elektrischen Strom bei. Allerdings funktioniert das nur, wenn das Lichtquant dem Elektron genügend Energie mitgibt. Solarzellen sind nämlich aus Halbleitermaterial gefertigt und diese weisen eine energetische Verbotzone auf, die das Elektron mit Hilfe der Lichtenergie überspringen muss. Erreicht es das erlaubte Energiestockwerk, dann geht es zu wie auf wie auf einer 2-spurigen Straße mit Gegenverkehr: Die Elektronen fließen in eine Richtung, die Löcher in die entgegen gesetzte Richtung.

Aus diesem Gegenverkehr gewinnt die Zelle elektrische Energie. Allerdings haben die Elektronen und Löcher keinen eigenen Antrieb – anders als die Autos auf der Straße. Das übernimmt ein elektrisches

Feld. Es zieht die negativ geladenen Elektronen an das eine Ende der Zelle, zu einem elektrischen Kontakt namens „Emitter“. Die positiv geladenen Löcher treibt es dagegen zum „Basis“-Kontakt am anderen Ende. Dieses elektrische Feld wird der Zelle nicht von außen übergestülpt, es ist – bedingt durch den Fertigungsprozess – im Material bereits vorhanden. Dafür sorgen die verschiedenen Halbleitermaterialien, aus denen eine Solarzelle besteht. Sie bilden einen „p-n-Übergang“. Dieser wirkt wie ein Ventil, das die positiven und negativen Ladungen voneinander trennt. Schließt man nun einen Verbraucher an, dann fließt durch diesen Strom, angetrieben von der eingefangenen Sonnenergie. Eine Solarzelle funktioniert folglich nach dem gegensätzlichen Prinzip einer Leuchtdiode, die umgekehrt elektrischen Strom in Lichtquanten verwandelt.

Zum kleinen Einmaleins der Solarzelle gehören noch die „direkten“ und „indirekten“

Halbleiter. Direkte Halbleiter wie Galliumarsenid funktionieren so wie eben beschrieben. Bei Silizium jedoch müssen neben den geschluckten Lichtquanten noch die Schwingungen der Atome im Kristall mithelfen, um das Elektron auf die erlaubte Energiestufe zu heben. Deshalb ist Silizium ein indirekter Halbleiter und eigentlich ein ungünstiges Material für die Photovoltaik. Nur amorphes, glasartiges Dünnschicht-Silizium ist ein direkter Halbleiter.

Heutige Solarzellen – die meisten basieren auf Silizium – können bis zu 20 Prozent der Sonnenergie in elektrische Energie umwandeln. Den Rekord halten spezielle Zellen mit einer „Lupe“, die das Sonnenlicht konzentriert. Ihr Wirkungsgrad liegt bei fast 40 Prozent.

Allerdings verschlechtern die heute noch dominierenden Herstellungstechniken die Energiebilanz für Solarzellen. Denn bei der Produktion werden große Blöcke aus ge-

schmolzenem Silizium gegossen, was viel Energie frisst. Diese werden in Scheiben zersägt, wobei viel Material und damit nochmals wertvolle Energie verpulvert wird. Deshalb produzieren solche Zellen während ihrer Lebenszeit nur etwa siebenmal so viel Energie, wie ihre Herstellung kostete. Bei großen Windenergie-Anlagen indessen kann der Ertrag an gewonnener Energie den Faktor 50 erreichen, sehr langlebige Wasserkraftwerke können im Laufe ihres Betriebs gar das 250-fache an Energie produzieren, wie für ihre Herstellung einst nötig war. Solarzellen werden daher nur durch neue Herstellungstechniken konkurrenzfähig und umweltfreundlich. Dies zeigen zum Beispiel dünne, photovoltaisch aktive Schichten auf Glas. Solche Dünnschicht-Solarzellen sind mittlerweile auf dem Markt.

Mit der Photovoltaik können wir die Sonnenenergie also direkt anzapfen. Doch wie entsteht das Sonnenfeuer?

# Infografik Energiespender

Ohne Sonne kein Leben. Ohne ihre Energie keine Photosynthese, kein flüssiges Wasser und keine lauen Sommerabende. Dabei erzeugt unser Heimatstern bereits seit fast fünf Milliarden Jahren mithilfe der einfachsten aller thermonuklearen Kernfusionen Energie: der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium. Für schätzungsweise weitere fünf Milliarden Rekordsommer reichen die Brennstoff-Reserven im Sonneninnersten noch, danach ist der Ofen endgültig aus.

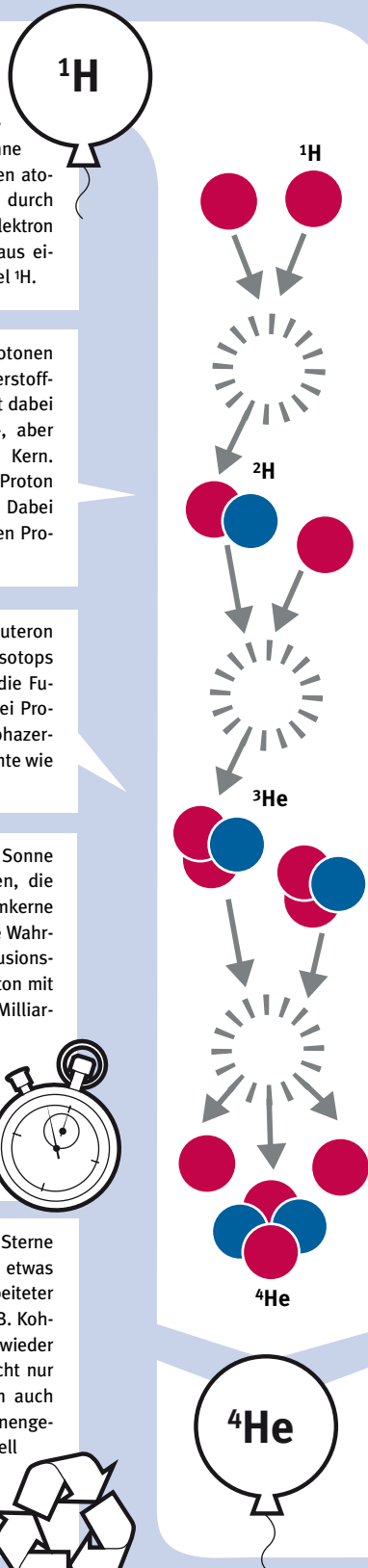
Alles beginnt mit Wasserstoff, dem häufigsten chemischen Element des Universums. Während bei uns z. B. Wasserstoffautos die molekulare Variante  $H_2$  im Tank haben, nutzt die Sonne den auf der Erde nicht vorkommenden atomaren Wasserstoff  $^1H$ , bzw. dessen durch hohe Umgebungstemperaturen vom Elektron befreiten Atomkern. Dieser besteht aus einem einzelnen Proton – die 1 im Kürzel  $^1H$ .

Im ersten Schritt entsteht aus zwei Protonen ein Deuteron – der Kern des Wasserstoff-Isotops Deuterium. Isotop bezeichnet dabei ein Element mit gleicher Protonen-, aber unterschiedlicher Neutronenzahl im Kern. Im Falle des Deuterons  $^2H$  bilden Proton (rot) und Neutron (blau) den Kern. Dabei wird eines der ursprünglich beteiligten Protonen in ein Neutron verwandelt.

Im zweiten Schritt verschmelzen Deuteron und Proton zum Kern des Helium-Isotops  $^3He$ . Danach folgt im dritten Schritt die Fusion des  $^4He$ ; Nebenprodukt sind zwei Protonen.  $^4He$  wird auf der Erde beim Alpha-Zerfall verschiedener radioaktiver Elemente wie zum Beispiel Uran gebildet.

Bei jedem Fusionsschritt muss die Sonne gegen abstoßende Kräfte ankämpfen, die sich gegen die Verschmelzung der Atomkerne stemmen. Diese Kräfte bestimmen die Wahrscheinlichkeit, mit der der jeweilige Fusionsprozess abläuft. So fusioniert ein Proton mit einem anderen im Schnitt nur alle 14 Milliarden Jahre. Wäre dieser erste und wichtigste Prozess nur etwas wahrscheinlicher, würde der Wasserstoff so schnell umgewandelt, dass unsere Sonne vermutlich längst ausgebrannt wäre.

Den Grünen Punkt gibt es seit 1991, Sterne kennen das Recycling-Prinzip schon etwas länger. Alle ihre Elemente, ob unverarbeiteter Wasserstoff oder Endprodukte wie z. B. Kohlenstoff, werden mit dem Sterntod wieder in den Weltraum geblasen und so nicht nur Baustoff für neue Planeten, sondern auch Fusionstreibstoff für zukünftige Sternengenerationen. Die Sängerin Joni Mitchell hatte also Recht, als sie 1969 sang: „We are stardust; we are golden. We are billion-year-old carbon.“



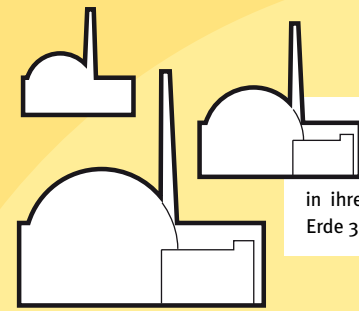
Während der Wasserstoff-Fusion werden neben „Positronen“ u. a. auch „Neutrinos“ erzeugt. Diese können das heiße Sonnenplasma fast ungehindert durchqueren. Für Forscher bieten die Teilchen damit einen unverbauten Einblick ins ansonsten verborgene Sonnenzentrum.

Die Wasserstoff-Fusion ist keine einspurige Strasse – nach der Erzeugung der  $^3He$ -Kerne gibt es drei Möglichkeiten, um zum  $^4He$  zu gelangen. Während auf der Haupttroute nur Helium-Isotope zu finden sind, entstehen auf den Nebenpfaden, die beide zunächst über die Bildung von Beryllium laufen, weitaus schwerere Zwischenprodukte wie etwa das Lithium-Isotop  $^7Li$ .

Für den Weg über die Isotope der Elemente Beryllium und Lithium entscheiden sich 15 Prozent aller  $^3He$ -Kerne, für den Weg über die Isotope von Beryllium und Bor lediglich 0,015 Prozent.

Albert Einstein ist überall, sogar im Innersten der Sonne. Hier werden in jeder Sekunde 564 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 560 Millionen Tonnen Helium verarbeitet. Der Grund für die Diskrepanz zwischen beiden Werten ist der so genannte „Massendefekt“: Die verschmelzenden Wasserstoffkerne haben zusammengenommen eine etwas größere Masse als der aus ihnen hervorgehende Heliumkern. Glück für uns, denn die „übrig gebliebenen“ vier Millionen Tonnen werden gemäß Einsteins berühmter Formel  $E=mc^2$  in lebenswichtige Sonnenenergie umgewandelt.

15% 15%



Unsere Sonne ist uneinholbare Nr. 1 unter den Energiefabriken: Um die gleiche Energiemenge umzusetzen wie die Sonne sekundlich in ihrem Kern, müssten alle 438 Kernreaktoren der Erde 32 Millionen Jahre lang auf Hochtouren laufen.

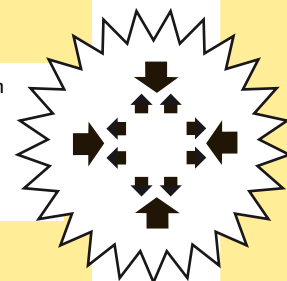
Im verhältnismäßig kleinen Sonnenkern lagert nicht nur mehr als die Hälfte der gesamten Sonnenmasse, sondern auch der eigentliche Fusionsreaktor. Rekordverdächtige 15 Millionen Grad, 200 Milliarden bar Druck und eine Dichte, 14mal höher als die von Blei, schaffen hier die Voraussetzungen, um die sich eigentlich abstoßenden Atomkerne miteinander zu verschmelzen und damit 99 Prozent der Sonnenenergie zu erzeugen.

Kern 15 Mio °C

Nachdem die Energie im Kern erzeugt wurde, tritt sie bei Kilometer 174.000 in einen Bereich ein, den sie in Form elektromagnetischer Strahlung durchquert. Dies geschieht keineswegs geradlinig, sondern im Zick-Zack-Kurs. Die einzelnen Energiepakete, die „Photonen“, werden an den Ionen des Sonnenplasmas gestreut, d. h. absorbiert und wieder emittiert – manchmal sogar wieder zurück in Richtung Kern.

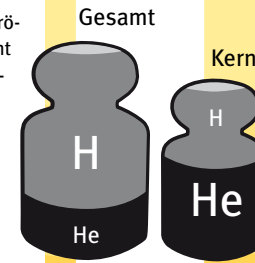
Strahlungszone

Die Sonne, fällt nur deshalb nicht einfach unter ihrem eigenen Gewicht zusammen, weil Gas- und Strahlungsdruck den Sternkörper entgegen der Gravitationskraft von innen her aufblasen und so stabilisieren.



Nach dem Hindernisparcours der Strahlungszone sind 556.000 Kilometer vom Sonnenzentrum entfernt die Temperaturen soweit abgesunken, dass Photonen dauerhaft vom Gas aufgenommen werden können. Konvektion – Heißes steigt auf, Kaltes sinkt ab – transportiert die Energie über die letzten hunderttausend Kilometer bis an den Rand der Photosphäre. Vom Kern bis zu dieser Schicht, die wir als Sonnenoberfläche wahrnehmen, braucht die Energie im Schnitt einige hunderttausend Jahre.

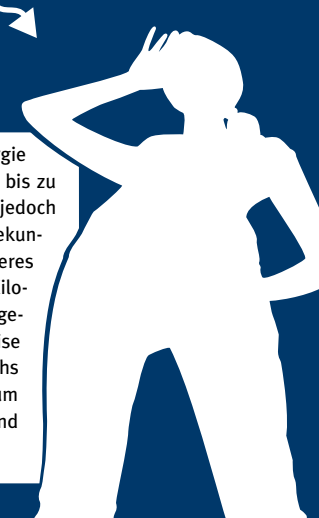
Die Gesamtmasse der Sonne, 333.000mal größer als die der Erde, teilt sich in 75 Prozent Wasserstoff, 23 Prozent Helium und 2 Prozent schwererer Elemente. Die einzelnen Anteile spiegeln neben dem Einfluss der Kernfusion vor allem die Originalmischung jener Gaswolke wieder, aus der unser Heimatstern einst entstand. Im Kern haben sich die Massenanteile fusionsbedingt bereits verschoben: Hier stellt Helium mittlerweile die Mehrheit.



Bei der Nutzung des Massendefekts gilt: Kernenergie gewinnt man, wenn man sich bei der Synthese neuer Elemente in Richtung Eisen bewegt, entweder durch die Verschmelzung leichterer oder durch die Spaltung schwererer Kerne. Die Fusion von Atomkernen, die schwerer sind als  $^{56}Fe$  (Fe = lat. ferrum, Eisen), würde keine Energie liefern, sondern verbrauchen.



Jahrhunderttausende lang ist die Energie durchschnittlich vom Kern der Sonne bis zu ihrer Oberfläche unterwegs. Dann jedoch geht alles ganz schnell. Die in jeder Sekunde und von jedem Quadratmeter unseres Heimatsterns abgestrahlten 63.000 Kilojoule Energie benötigen dank Lichtgeschwindigkeit nur einen vergleichsweise kurzen Augenblick für den Weg durchs Sonnensystem – 4 Stunden bis zum Neptun, 43 Minuten bis zum Jupiter und etwas mehr als 8 Minuten bis zu uns.



Chromosphäre und Korona

Photosphäre

Konvektionszone

500.000 °C

5.500 °C

1 Mio °C



# Lebenskraft

Wie produzieren Lebewesen Wärme? Dies fragte sich Hermann von Helmholtz (1821 - 1894), dem wir den Energieerhaltungssatz verdanken. Als Quelle vermutete er völlig zurecht die Muskeln. Warmblüter halten zwar ihre Körpertemperatur auch ohne Muskelarbeit stabil, dafür sorgt ihr Stoffwechsel mit seinem hohen Grundumsatz. Bei einem siebzig Kilogramm schweren Erwachsenen, der regungslos daliegt, sind das immerhin 80 Watt Dauerleistung. Legen die Muskeln aber richtig los, erzeugen sie zusätzliche Wärme. Dem Körper droht ein Hitzekollaps. Er vermeidet ihn, indem er sich durch verdunstenden Schweiß Abkühlung verschafft.

Muskeln haben einen Wirkungsgrad von maximal 25 Prozent, deshalb werden sie bei Tätigkeit warm. Dabei fließen rund 75 Prozent der umgesetzten Energie in ungenutzte Wärme. Ein Sportler, der ein 100-Kilogramm-Gewicht auf zwei Meter Höhe stemmt, verrichtet rein physikalisch etwa

2 Kilojoule Arbeit, um die Anziehungskraft der Erde zu überwinden. Seine Muskulatur braucht dafür rund das Vierfache, also 8 Kilojoule. Dreiviertel davon sind Abwärme, die der Körper loswerden muss. Radsportlern hilft da der Fahrtwind. Profis kommen auf durchschnittlich 240 bis 280 Watt Dauerleistung an den Pedalen. Bei explosiven Sprints mobilisieren sie kurzzeitig bis zu 1,6 Kilojoule pro Sekunde, also 1,6 Kilowatt oder gut zwei PS.

Um ihren Stoffwechsel in Gang zu halten, sind alle Lebewesen auf Nahrungsmittel angewiesen. Denn sie enthalten energiereiche Fette, Eiweiße und Kohlenhydrate. Manche Nahrungsmittel sind echte „Kalorienbomben“. Beispiel Schokolade: Eine übliche Tafel (100 Gramm) hat einen Energiegehalt von über zwei Millionen Joule. Einmal verpeist, muss man sich ganz schön anstrengen, um diese Energieladung wieder loszuwerden. Wer entsprechend trainiert ist,

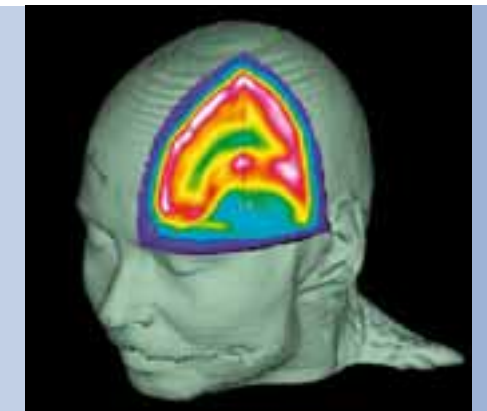
kann es mit Gewichtheben versuchen: Um eine Schokoladentafel abzuarbeiten, muss man theoretisch betrachtet 100 Kilogramm 250 Mal auf zwei Meter Höhe anheben.

Nicht ganz so energiereich wie die fetthaltige Schokolade sind die im Fleisch enthaltenen Proteine (Eiweiße). Sie liefern etwa so viel Energie wie Kohlenhydrate und halb so viel wie Fett. Fleischfresser stehen übrigens am Ende der Nahrungskette, denn alle energiehaltigen Nährstoffe haben ihren Ursprung in den Pflanzen. So stammt das Steak auf unserem Teller von einem Rind, das sich einst von Gras ernährte und dabei gespeicherte Sonnenergie aufnahm. Die Pflanzen haben nämlich im Laufe der Evolution eine besondere Gabe entwickelt: sie decken ihren Energiebedarf mit Hilfe des Lichts. Dazu nehmen sie Kohlendioxid und Wasser auf, durch einen biochemischen Prozess – der **Photosynthese** – produzieren sie daraus Sauerstoff und Traubenzucker

☞ Sportler haben ganz individuelle Vorlieben, um während eines Wettkampfs bei Kräften zu bleiben. Beliebt bei Marathonläufern ist die energiereiche Banane. Bild: picture-alliance/dpa

☞ Die großen Pflanzenfresser von einst lebten auf „Sparflamme“: Der Umsatz eines ruhenden, 40 Tonnen schweren Brachiosaurus wird auf gerade mal 10 Watt veranschlagt. Bild: Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin

☞ Pflanzenzellen unter dem Mikroskop: Ort der Photosynthese sind die runden Chloroplasten. Sie sind einige Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) groß, wie man anhand des eingblendeten Maßstabs erkennt. Bild: Hans-Ulrich Koop, LMU München



☞ Eine Kombination tomographischer Aufnahmen zeigt Aktivitätsmuster des Gehirns. Regionen mit besonders hohem Stoffwechsel erscheinen rot und weiß. Bild: Uwe Pietrzyk, FZ Jülich

## ENERGIE FÜR DEN „DENKMUSKEL“

Wenn die gut hundert Milliarden Nervenzellen in unserem Kopf so richtig feuern, zum Beispiel beim Lesen dieses Textes, dann fressen sie ordentlich Energie. Bei Erwachsenen macht das Gehirn zwar nur ein Fünfzigstel des Körpergewichts aus, beansprucht aber ein Fünftel des gesamten Energieumsatzes. Das entspricht einer Dauerleistung von etwa 20 Watt. Wir haben eine kleine Glühbirne auf den Schultern.

Das Gehirn verlangt auch biologisches Superbenzin, nämlich reinen Traubenzucker. Den verbrennt es mit Sauerstoff, was pro verbrauchtem Glucose-Molekül bis zu 38 energiereiche ATP-Moleküle liefert. Abfallprodukte sind Kohlendioxid und Wasser.

Experimente haben gezeigt, dass die kurzzeitige Zufuhr von reinem Sauerstoff und Glucose die Leistung des Gehirns steigern kann. Probanden konnten dann schneller Rechenaufgaben lösen als Vergleichsgruppen ohne „Doping“, und sie konnten sich längere Wortreihen merken.

sam dürften pflanzenfressende Riesensaurier gelebt haben: **Brachiosaurus**, das größte Landtier, von dem ein vollständiges Skelett existiert, war bis zu 13 Meter hoch und begnügte sich Schätzungen zufolge mit einer Tagesration von 890 Kilojoule (213 Kilokalorien). Umgerechnet auf 24 Stunden entspricht dies einer durchschnittlichen Leistungszufuhr von 10 Watt. Das ist nur ein Achtel des menschlichen Grundbedarfs.

(Glucose). Die dafür notwendige Energie entnehmen die Pflanzen dem Sonnenlicht. Den Sauerstoff entlassen sie in die Luft, die Glucose dient als Energievorrat.

Eine Schlüsselrolle im Stoffwechsel sämtlicher Lebewesen spielt im Übrigen ein Molekül mit dem Namen Adenosintriphosphat (ATP). Es ist der universelle „Biosprit“, der die Zellen aller pflanzlicher und auch aller tierischer Organismen mit Energie versorgt. Das ATP wird nach Bedarf aus Glucose und anderen Energiespeichern gewonnen. Täglich zirkulieren mindestens 50 Kilogramm ATP durch unseren Körper, einzelne ATP-Moleküle werden dabei unzählige Male verbraucht, recycled und wiederverwertet.

Menschen und Tiere müssen aus ihrer Nahrung mindestens so viel Energie freisetzen, wie sie zur Nahrungssuche wieder verbrauchen. Hinzu kommt die Energie, die alle lebensnotwendigen Stoffwechselfor-

gänge in Gang hält. Deshalb kann man mit einer solchen Energiebilanz das Verhalten von Landraubtieren verblüffend gut erklären. Forscher errechneten, dass es für Jäger mit einem Körpergewicht unter 20 Kilogramm günstiger ist, lange unterwegs zu sein und viele kleinere Beutetiere zu fangen. So verhält sich ein Fuchs. Schwerere Raubtiere müssen dagegen für ihre Energiebilanz große Beutetiere erlegen. Und sie brauchen auch ausgedehnte, energiesparende Ruhephasen. In dieses Muster passen Löwen perfekt. Sobald warmblütige Fleischfresser mehr als eine Tonne wiegen, wird ihre Energiebilanz ungünstig, weshalb Löwen nie die Größe von Elefanten erreichen. Tatsächlich wiegen Eisbärenmännchen, die schwersten heute existierenden Landraubtiere, etwa 800 Kilogramm – ganz selten bis zu einer Tonne. Nur die größten Raubsaurier erreichten einst bis zu neun Tonnen Gewicht, weil sie einen langsamen Stoffwechsel hatten. Ebenfalls spar-



# Kraftpakete

Naht der Winter, entpuppen sich manche Tiere als wahre Überlebenskünstler: Eichhörnchen sammeln Nüsse und sonstige Kalorienbomben für die kommenden Monate, Bären wiederum futtern sich eine Speckschicht auf die Rippen, von der sie während der kalten Jahreszeit zehren können. Ähnliches tun Menschen, wenn sie im Sommer den Tank der Ölheizung auffüllen oder im Keller Brennholz stapeln. Was mit dem Einlagern fossiler Brennstoffe so einfach erscheint, ist in technischer Hinsicht eine Herausforderung. Wie die Erzeugung von Energie ist nämlich auch deren Speicherung ein uraltes Problem, das erst im Laufe der Zeit die Batterie und andere Erfindungen hervorbrachte. Dahinter steckt immer dieselbe Idee: Man speichert Energie in Zeiten ihres Überflusses und setzt sie bei Knappheit wieder frei.

Nach diesem Prinzip funktionieren neben Batterien auch Akkumulatoren („Akkus“).

Diese Kraftpakete sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Akkus kann man wieder aufladen, Batterien geben ihre Energie jedoch nur einmal ab. Der Bleiakku wurde Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelt und findet sich noch heute unter jeder Motorhaube. Allerdings kostet es viel Sprit, dieses schwere Gerät, das nur für den Startvorgang benötigt wird, ständig mitzuschleppen. Ingenieure forschen deshalb schon lange an einem Ersatz. Doch bis heute ist der Bleiakku nahezu konkurrenzlos, denn nur er erzeugt die kräftigen Stromstöße von einigen hundert Ampère, die zum Anlassen eines Motors nötig sind.

Akkus und Batterien liefern Strom – und damit elektrische Energie – durch elektrochemische Reaktionen. Deshalb heißen sie auch elektrochemische Zellen. Sie besitzen immer zwei Anschlüsse (Elektroden), einen Plus-Pol (Anode) und einen Minus-Pol (Kathode). Die Materialien dieser Elektroden

befähigen diese Zellen, Energie zu speichern und Strom freizusetzen. Bei einem geladenen Bleiakku besteht zum Beispiel der Minus-Pol aus reinem Blei, einem eifrigen Elektronenspender. Die Plus-Elektrode hingegen ist in diesem Zustand mit Bleioxid umhüllt, einem gierigeren Elektronenfresser. Beide Elektroden sind zudem in eine Mischung aus Schwefelsäure und Wasser getaucht – dem Elektrolyten.

Dreht man den Zündschlüssel, so schickt der Minus-Pol elektrischen Strom über dicke Anschlusskabel auf die Reise zum Plus-Pol, wobei die Elektronen unterwegs im Anlasser harte Arbeit leisten müssen. Gleichzeitig laufen an beiden Elektroden elektrochemische Reaktionen ab. Dabei entsteht Wasser, das die Elektrolytlösung nach und nach verdünnt. Deshalb lässt sich aus ihrer Säurekonzentration der Ladezustand des Bleiakkus ablesen. Solche Zellen erreichen nominell rund 2 Volt Spannung,

Was aussieht wie ein italienischer Sportwagen, ist tatsächlich ein amerikanisches Fabrikat. Das elektrisch betriebene Cabrio erreicht knapp 210 km/h Spitzengeschwindigkeit. Die Energie dazu liefern Lithium-Ionen-Akkus. Bild: Tesla Motors

Radioisotopen-Generatoren, wie sie Raumsonde „Cassini“ mitführt, wandeln die Wärme, die beim radioaktiven Zerfall von Plutonium freigesetzt wird, in elektrischen Strom. Das Foto zeigt die Sonde vor dem Start. Bild: NASA



Speichermedien im Vergleich:  
Dieselbe Energiemenge wie 50 Liter Benzin enthalten:



| Wasserstoff (flüssig) | Benzin (n-Oktan) | Methanol | Bleiakku (mit Gehäuse) |
|-----------------------|------------------|----------|------------------------|
| 40*                   | 13,33*           | 6,37*    | 0,03*                  |

Je mehr Energie ein Treibstoff pro Kilogramm speichern kann, umso leichter ist das zugehörige Fahrzeug.  
\*Energiedichte in kWh/kg

Die Brennstoffzellen an Bord der Raumfähre produzieren Wasser und Strom. Dabei anfallende, überschüssige Wärme wird über „Radiatoren“ (links und rechts des Laderaums) in den Weltraum abgestrahlt. Bild: NASA



sechs von ihnen ergeben zusammenschaltet eine übliche 12-Volt-„Autobatterie“ (die eigentlich ein Akku ist). Beim Laden eines Akkus wird der Entladevorgang einfach umgedreht und neue Energie in die Zellen gepumpt. Autobatterien erreichen einen Energiegehalt von rund 2 Millionen Joule, was etwa 0,6 kWh entspricht. Die Energiedichte liegt bei etwa 0,03 kWh pro Kilogramm.

Viel leichtgewichtiger als der Bleiakku ist ein moderner Lithium-Ionen-Akku, der gut dreimal so viel Energie pro Kilogramm aufnehmen kann. In kleiner Ausführung findet man ihn in Handys, Notebooks und MP3-Spielern. Aber auch Elektroautos könnte er zu einer erfolgreichen Zukunft verhelfen. Viele Hersteller liebäugeln allerdings mit einer anderen Technik: Sie setzen auf Elektrofahrzeuge, die nicht mit Akkus, sondern per Brennstoffzellen angetrieben werden – diese wandeln die chemische Ener-

gie aus der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff direkt in Strom um.

Neben diesen chemischen Energiespeichern gibt es viele physikalische Energiespeicher. Eine Menge Energie steckt zum Beispiel in der Bindungskraft, die Atomkerne zusammenhält. Frei wird sie unter anderem beim radioaktiven Zerfall. Raumsonden, die für den Einsatz von Sonnensegeln zu weit von der Sonne entfernt sind, nutzen diese Zerfallswärme zur Stromversorgung. Ein solches Aggregat versorgt zum Beispiel die Saturn-Sonde „Cassini“ und die Sonde „New Horizons“, die derzeit zum Pluto am Rande des Sonnensystems unterwegs ist.

Wind und Wellen speichern dagegen Bewegungsenergie, die ursprünglich als Wärme von der Sonne geliefert wurde. Bei Gezeitenkraftwerken nutzt man Energie, die in der in der anziehenden Gravitationskraft

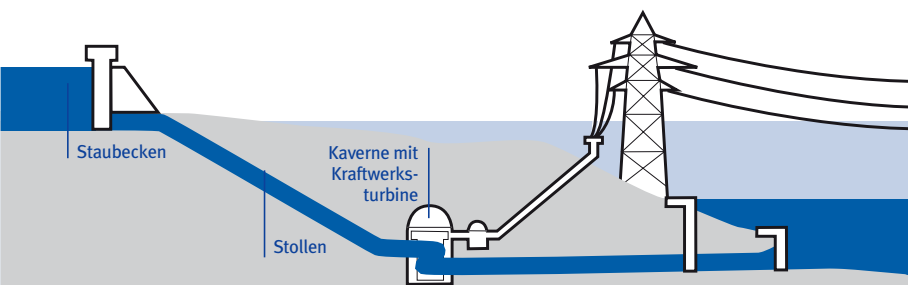


Brennstoffzellen-Autos tanken je nach Modell Wasserstoffgas unter hohem Druck (einige Hundert bar) oder ultrakalten, flüssigen Wasserstoff (minus 253 Grad Celsius). Die Tankkupplung für das Wasserstoffgas ähnelt einer üblichen Zapfpistole. Bild: Clean Energy Partnership (CEP)

## MOBILER WASSERSTOFF

Mit der energiereichen Kombination aus Wasserstoff und Sauerstoff werden unter anderem Raketen angetrieben. Die Haupttriebwerke des Space Shuttle beispielsweise verbrennen davon während der knapp neunminütigen Startphase fast zwei Millionen Liter. Genügsamer sind Aggregate, die aus der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff elektrische Energie (Strom) gewinnen. Die Geschichte solcher Brennstoffzellen reicht bis ins 19. Jahrhundert zurück. Gekoppelt an einen Elektromotor werden sie heutzutage als Antriebsquelle für Busse und PKWs erprobt. Bislang ist die kostspielige Fahrzeugtechnik jedoch nicht reif für den Massenmarkt. Auch die Abhängigkeit vom Wasserstoff ist ein Problem. Einerseits fehlt ein Tankstellennetz. Andererseits muss Wasserstoff aufwändig hergestellt werden, da er in freier Form in der Natur nicht vorkommt. Einige Hersteller entwickeln daher Brennstoffzellen, die statt reinem Wasserstoff wasserstoffhaltige Substanzen wie Methanol verwerten.

In der Raumfahrt sind Brennstoffzellen seit langem Standard. Sie begleiteten die Astronauten zum Mond und versorgen auch die amerikanischen Raumfähren mit Strom. Während Brennstoffzellen-Fahrzeuge über 60 Kilowatt auf die Straße bringen, müssen die Astronauten allerdings mit 21 Kilowatt Durchschnittsleistung auskommen. Doch die Brennstoffzellen haben einen praktischen Nebeneffekt: außer Strom liefern sie Wasser und versorgen so die Crew mit Trinkwasser. Bei irdischen Fahrzeugen hingegen strömt dieses „Abfallprodukt“ ungenutzt durch den Auspuff.



Das Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal gehört zu den größten seiner Art in Europa. In lastschwachen Zeiten, wenn das Stromangebot größer ist als die Nachfrage, fördert es Wasser in ein hochgelegenes Staubecken (Foto). Bei Energiebedarf wird das Wasser über einen unterirdischen Stollen abgeleitet und setzt die Turbinen zur Stromproduktion in Gang. Bilder: Vattenfall/ius

Um das öffentliche Netz zu schonen, produzieren Garchinger Forscher die für ihre Kernfusionsexperimente benötigten Stromstöße mit Hilfe von Drehzylindern (Bild links). Schwungräder sind jedoch keine Erfindung unserer Tage: Im 19. Jahrhundert lieferte das rechts abgebildete Modell Energie für das Walzen von Zinkblechen. Bilder: MPI für Plasmaphysik (IPP) & Friedrich Holtz/Sebastian Wenzler, Museum Zinkhütter Hof



zwischen Erde und Mond steckt. Und Pumpspeicher-Wasserkraftwerke wiederum fungieren wie gigantische „Akkus“ im Stromnetz. Beim Speichern wandeln sie mit ihren Pumpen elektrische Energie in potentielle Energie, indem sie Wasser in ein Hochbecken befördern. Zur Stromproduktion lassen sie das Wasser wieder ins Tal ab. Dabei wird seine potentielle Energie zu Bewegungsenergie. Das strömende Nass setzt eine Turbine in Bewegung, die elektrische Energie produziert. Nach dieser Methode kann zum Beispiel das Kraftwerk **Goldisthal** (Thüringen) pro Beckenfüllung umgerechnet knapp dreißigtausend Milliarden Joule an elektrischer Energie speichern. Das entspricht rund 8 Millionen Kilowattstunden: genug für eine Jahresversorgung von 1.300 deutschen Durchschnittsverbrauchern.

Komprimiertes Gas eignet sich ebenfalls als Speicher für potentielle Energie – wie bei einer zusammengedrückten Feder. Das nutzen Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke aus, die ebenfalls als „Akkus“ im Stromnetz arbeiten. Sie pressen mit ihren elektrisch angetriebenen Turbinen Luft in große unterirdische Hohlräume – zum Beispiel Salzstöcke. Wird elektrische Energie gebraucht, dann lassen sie diese Druckluft durch ihre Turbinen abblasen und produzieren Strom. Ein weiterer Speicher für elektrische Energie ist der **Schwunghmassenspeicher**, dessen Schwungrad dazu ein Elektromotor auf mehrere Zehntausend Umdrehungen pro Minute bringt. Dabei speichert das Rad viel Rotationsenergie, also Bewegungsenergie. Bricht das Stromnetz ein, dann arbeitet der Motor als Ge-

nerator und macht in Milisekunden aus der Rotationsenergie einige Sekunden lang elektrischen Strom.

„Supraleitende“ Spulen können ebenfalls Netzschwankungen ausgleichen. In ihnen kreist elektrischer Strom verlustfrei und damit nahezu ewig – bis er angezapft wird. Allerdings werden solche Speicher eher selten verwendet. Denn Spulen aus konventionellen Supraleitern müssen aufwändig gekühlt werden. Sie benötigen flüssiges Helium und das ist minus 269 Grad Celsius kalt. Hochtemperatur-Supraleiter hingegen erreichen höhere Speicherdichten und sparen Kühlkosten. Um sie zu betreiben, reicht flüssiger Stickstoff. Dieser ist minus 196 Grad Celsius kalt und wesentlich billiger als teures Helium. Allerdings



Der Airbus A380 kann inklusive Besatzung bis zu 873 Passagiere befördern. Diese müssen im Notfall innerhalb von 90 Sekunden von Bord, so die Vorschrift. Dies geschieht über aufblasbare Rutschen, die sich innerhalb von nur acht Sekunden entfalten. Elektrische Kondensatoren stellen dafür blitzschnell Energie bereit. Bild: Airbus Deutschland



### HITZE AUF „KNOPFDRUCK“

Handwärmer bestehen aus einem flüssigkeitsgefüllten Kunststoffbeutel, in dem ein Metallplättchen schwimmt. Knickt man dieses Plättchen wie einen Knackfrosch, wird die Flüssigkeit fest und bleibt etwa eine halbe Stunde lang warm. Um sich zu regenerieren, muss das Kissen ins heiße Wasserbad, wobei sich der Inhalt des Beutels wieder verflüssigt.

Des Beutels' Geheimnis ist ein Salz (meist Natriumacetat-Trihydrat), das in Wasser gelöst ist. Ist die Füllung flüssig und kalt, ist sie im Zustand einer „unterkühlten“ Lösung: Die winzigen Bestandteile des Salzes (Ionen), die in der Lösung umhertreiben, würden ihre Bewegungsenergie gerne loswerden und sich zu starren Salzkristallen zusammenschließen. Um sich zu verfestigen, fehlt ihnen jedoch ein atomarer Angriffspunkt. Erst die frische Knickstelle am Metallplättchen liefert einen solchen Kristallisationskeim. Dort liegt nämlich die Oberfläche des Metalls aus geordneten Atomen offen, ohne von einer Oxidschicht überzogen zu sein. Sie bietet einen Startpunkt für das Wachstum der Salzkristalle. Beim Übergang von der Lösung zum Kristall erhitzt sich der Beutel.

Der Handwärmer beruht somit auf dem Wechselspiel zweier Phasen: Lösung und Kristall. Beim Auflösen im Wasserbad wird Lösungswärme zugeführt, bei der Verfestigung wird diese als Kristallisationswärme wieder frei. Bild: ius

sind Spulen aus Hochtemperatur-Supraleitern noch nicht ausgereift und sehr teuer.

Auch Kondensatoren eignen sich als Speicher. Sie nehmen elektrostatische Energie auf, wie wir sie vom elektrischen Schlag an der Türklinke kennen. Akkus fassen zwar pro Gewichtseinheit zehnmal mehr Energie als modernste Kondensatoren. Doch diese Ultracaps können Ströme blitzschnell abgeben und altern nicht so schnell. Deswegen liefern sie zum Beispiel im Airbus **A380** im Ernstfall den Strom zum Ausfahren der Notrutschen.

Wärme lässt sich weitaus besser speichern als elektrische Energie. Das Speichermaterial muss dazu eine hohe „spezifische“ Wärmekapazität haben, also pro Kilogramm

besonders viel Wärme aufnehmen können. Wasser ist ein Paradebeispiel, deshalb eignet es sich als Füllung von Wärmflaschen oder Heizkreisläufen. Es gibt sogar riesige Heißwasserspeicher mit mehreren Tausend Kubikmetern Inhalt, die im Sommer überschüssige Wärme aufnehmen und im Winter wieder abgeben.

Noch trickreicher ist das Ausnutzen von Phasenübergängen, denn diese sind mit einem Energieumsatz verbunden. Die Umwandlung von fest in flüssig – etwa von Eis in Wasser – braucht Wärmeenergie, weil die Moleküle sich aus den engen Kristallbindungen herausarbeiten müssen. Beim Ausfrieren gibt die Flüssigkeit diese Wärme wieder ab. Handwärmer nutzen ein ähnliches Prinzip.



# Reiserouten

Am 4. Januar 1903 jagte bei 6.000 Volt Spannung ein tödlicher Stromstoß durch die arme Topsy. Die Elefantenkuh gehörte zu einem Zirkus auf der New Yorker Halbinsel Coney Island. Sie hatte drei Pfleger getötet und sollte daher eingeschläfert werden. Auf die makabre Idee, stattdessen elektrischen Strom einzusetzen, kam Thomas Edison (1847 - 1931) höchstpersönlich. Der berühmte Erfinder der Glühbirne ließ Topsis trauriges Ende sogar filmen. Diese Bilder setzte er im Propagandakrieg gegen seinen Konkurrenten George Westinghouse (1846 – 1914) ein. Der Film sollte den Amerikanern vor Augen führen, wie gefährlich Wechselstrom sei. Wechselstrom war nämlich Westinghouses Lösung für den rapide wachsenden Bedarf der USA an elektrischer Energie. Edison favorisierte dagegen Gleichstrom.

Die zentrale Figur in diesem Stromkrieg war Nikola Tesla (1856 - 1943). Der geniale Ingenieur aus dem österreichischen Kaiserreich hatte bei Edison gearbeitet. In dessen Labor erfand er den elektrischen Wechselstrom-Generator. Edison verkannte jedoch die Vorteile der komplexen Wechselstromtechnik, weshalb Tesla frustriert kündigte. In Westinghouse hingegen fand Tesla einen mächtigen Förderer, mit dem er das Wechselstromsystem in den USA durchsetzte.

Edison verlor diesen Stromkrieg, weil er die Physik nicht austricksen konnte. Bei seinem System verursachte der Leitungswiderstand schon auf kurzen Strecken hohe Übertragungsverluste. Die Kraftwerke mussten praktisch vor der Haustüre der Kunden stehen, damit diese noch genug Energie bekamen. Bei jeder Stromart ver-

wandelt nämlich der elektrische Widerstand der Leitungen die Energie der fließenden Elektronen zum Teil in nutzlose Wärme. Und bei Edisons Verfahren war dieser Effekt besonders ausgeprägt.

Edisons Gleichstromsystem litt besonders unter der relativ geringen Spannung von 110 Volt. Soll elektrischer Strom eine bestimmte Energiemenge transportieren, dann braucht er bei niedriger Spannung eine entsprechend hohe Stromstärke. Bei hoher Spannung reicht umgekehrt eine geringe Stromstärke. Fließt wenig Strom, sind auch die Verluste durch den Leitungswiderstand klein. Ein Fernübertragungsnetz ist also umso effizienter, je höher seine Betriebsspannung ist. Hochspannung, wie sie etwa heutige Überlandleitungen verwenden, ist jedoch viel zu gefährlich für die

⚡ Überlandleitungen sind die Autobahnen des Stroms. Weite Teile des deutschen Stromnetzes, das rund 1,6 Millionen Kilometer umfasst, verlaufen jedoch unterirdisch. Bild: pixelio.de

📍 Per Seekabel bezieht die amerikanische Halbinsel Long Island Strom aus dem Netz von New Jersey. Die Hochspannungs-Gleichstrom-Leitung steht unter 500.000 Volt. Bild: Siemens



🌃 Nächtliches Lichtermeer zeigt sich die Allgegenwart der Elektrizität. Bild: NASA/Goddard Space Flight Center, Scientific Visualization Studio



Hauselektrik. Deshalb müssen Umspannanlagen sie in der Nähe von Siedlungen in Niederspannung umsetzen. In Mitteleuropa sind es 220 Volt.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts musste allerdings erst noch eine Technik gefunden werden, die wie ein Getriebe Hochspannung in Niederspannung umsetzen kann – und umgekehrt. Für Gleichstrom gab es damals keine Lösung. Edison musste deshalb auf Niederspannung zurückgreifen, was hohe und damit verlustreiche Stromstärken bedingte. Für Wechselstrom hatte Tesla jedoch eine Apparatur parat, die auch heute in Umspannwerken zu finden ist: den Transformator. Dieser nutzt den physikalischen Effekt der Induktion, genau wie Generatoren und Elektromotoren. Im einfachsten Fall besteht der Transformator

aus zwei Spulen, die um einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt sind. Fließt durch die erste Spule ein Wechselstrom, dann induziert dessen schwingendes Magnetfeld in der zweiten Spule ebenfalls einen Wechselstrom. Hat diese zum Beispiel doppelt so viele Wicklungen wie die erste Spule, verdoppelt sich in ihr die Spannung. Die Stärke des in ihr erregten Stroms halbiert sich dagegen. Also über- oder untersetzt der „Trafo“ Wechselspannungen genau im Verhältnis der Wicklungszahlen seiner Spulen.

Genauso durchläuft der Strom heutzutage diverse Spannungsstufen auf seinem Weg vom Kraftwerk zum Verbraucher, wobei er nach Bedarf hoch- und runtertransformiert wird. Am Ende stehen unter anderem Industrie, Bahnverkehr sowie die heimische Steck-

dose. Dorthin gelangt der Strom über ein Geflecht von Wechselspannungsleitungen, die elektrische Energie über weite Entfernungen transportieren. Diese Netze arbeiten bei sehr hohen Spannungen. In Deutschland sind es streckenweise 380.000 Volt, in den USA sogar 765.000 Volt. Allerdings leiden auch sie unter Übertragungsverlusten. Wechselstrom verhält sich nämlich ziemlich komplex: Er induziert unerwünschte „Blindströme“, die Energie wegfressen. Im deutschen Netz gehen etwa 4,5 Prozent der elektrischen Energie auf dem Weg vom Kraftwerk zum Verbraucher verloren.

**Gleichstromnetze**, die bei Spannungen bis zu einer Million Volt arbeiten, haben wesentlich geringere Verluste. Und inzwischen gibt es Techniken, die Gleichströme von niedriger in hohe Spannung und zurück



### TSCHÜSS, BATTERIE!

Oft erleben wir, dass der Akku des Handys schon wieder leer ist. Das „Ernten“ von Energie aus der Umwelt könnte solche Probleme lösen. Praktisch überall gibt es mechanische Schwingungen, Wärme oder chemische Energie als Quellen kleiner Energiemengen. Geeignete Energiewandler können sie anzapfen.

Ein MP3-Spieler könnte zum Beispiel seine elektrische Energie aus Körperwärme gewinnen. Ein Thermogenerator würde sie direkt in Strom umwandeln. Der Generator nutzt die Tatsache aus, dass gute elektrische Leiter auch Wärme gut transportieren. Elektronen strömen deshalb zum kalten Ende des Thermogenerators, für dessen Kühlung könnten die Kopfhörerleitungen sorgen. Dort sammeln sich die Elektronen, während das warme Ende des Generators an Elektronen verarmt. Die so entstehende elektrische Spannung wird also durch Körperwärme angetrieben.

Eine andere pfiffige Idee ist das Ernten mechanischer Energie. Es gibt Funkschalter, die aus dem Fingerdruck Energie für ihr Funksignal gewinnen. Bei älteren Modellen wandeln Piezokristalle den mechanischen Druck in Strom um. Neuere Modelle sind kompakter gebaut und arbeiten nach dem Induktionsprinzip: Durch betätigen des Schalters wird ein elektrischer Spannungstoß verursacht.

Das Ernten von Energie wird umso interessanter, je mehr Mikrochips verschiedenste Gegenstände „intelligent“ machen. Ein Beispiel sind mit elektronischen Etiketten versehene Verpackungen, die Informationen über den Inhalt gespeichert haben. Eine Energieversorgung ohne Batterien wäre auch ideal für medizinische Implantate, etwa für Herzschrittmacher. Viele Ideen sind aber noch Zukunftsmusik.

↔ Funkschalter liefern Energie auf Tastendruck. Weil sie ohne Stromkabel auskommen, lassen sie sich an Wänden oder sonst wo beliebig platzieren. Bild: EnOcean

↔ Innenleben eines Hochtemperatur-Supraleiter-Kabels. Inklusiv der verschiedenen Lagen und Ummantelungen ist es etwa so dick wie ein Unterschenkel. Bild: Nexans

↔ Mit einem rund 60 Meter hohen Sendemast, dem „Wardenclyffe-Tower“ auf Long Island, wollte Nikola Tesla Energie über weite Entfernungen übertragen – drahtlos und eventuell sogar weltweit. Das Bauwerk blieb jedoch unvollendet. Und aus heutiger Sicht sprechen auch physikalische Gründe gegen Teslas Vision. Bild: Tesla Society Schweiz



umwandeln können. Sie basieren auf besonderen Halbleiter-Bauelementen, sogenannten Thyristoren. Die Hochspannungsgleichstromübertragung eignet sich sehr gut für die unterseeischen Kabel, die Windenergie-Anlagen auf dem Meer mit dem Land verbinden. Weltweit sind zwar auch an Land erst wenige Übertragungsstrecken in Betrieb. Doch das könnte sich ändern, wenn sonnenreiche Länder in Nordafrika große Mengen an Solarstrom produzieren und nach Europa verkaufen. Das wäre Edisons später Triumph.

Die idealen Stromtransporter sind „Supraleiter“. Entsprechend gekühlt, leiten sie den Strom völlig verlustfrei. „Hochtemperatur-Supraleiter“ werden mit minus 196 Grad kaltem flüssigem Stickstoff betrieben, einem verhältnismäßig billigen Kühlmittel.

Entsprechende Hochspannungskabel sind schon auf dem Markt. Demnächst soll eine 610 Meter lange Trasse die New Yorker Halbinsel Long Island versorgen. Sie hat eine Betriebsspannung von 138.000 Volt. Noch sind supraleitende Kabel sehr teuer. Sie können sich aber bei großen Metropolen rechnen, weil sie besser in die überfüllten Versorgungsschächte passen. Konventionelle Kabel haben nämlich größere Querschnitte. Außerdem produzieren sie viel Abwärme, die die Schächte stark aufheizen kann.

Besonders elegant wäre die drahtlose Übertragung von Energie, von der schon Nikola Tesla träumte. Elektromagnetische Wellen haben jedoch den Nachteil, dass sie ihre Energie breit in den Raum verteilen, anstatt sie gezielt zum Empfänger zu bringen. Das

↑ Ferne Vision: Eine Raumstation wandelt Sonnenlicht in elektrische Energie und schickt diese in Gestalt gebündelter Mikrowellen zur Erde. Bild: NASA

Bündeln der Strahlung, etwa von Mikrowellen, löst dieses Problem. Einige Wissenschaftler träumen davon, Energie per Mikrowellen aus dem Himmel zur Erde schicken: Sie käme von riesigen Solarkraftwerken in der Erdumlaufbahn.

Eine andere Form gebündelter, elektromagnetischer Strahlung ist Laserlicht. Laser können vor allem auf kurze Distanz enorm viel Energie übertragen. Industrielaser schneiden so problemlos zentimeterdicke Metallplatten. Physiker haben Anlagen mit Leistungen im Petawatt-Bereich (1 Petawatt = 1.000.000.000.000 Watt) entwickelt. Sie übersteigen die Leistung des gesamten Kraftwerksparks eines Industrielandes – allerdings nur für wenige Augenblicke. Ihre Lichtpulse blitzen nämlich nur für Bruchteile einer Billionstel Sekunden auf.

Derartige Laseranlagen dienen der Grundlagenforschung. Sie können zum Beispiel Atome zertrümmern oder ihre Kerne wie im Sonneninneren verschmelzen lassen. Starke Laserstrahlen kommen in Luft allerdings nicht weit, denn sie zerreißen förmlich die Luftmoleküle. Die elektrisch geladenen Molekültrümmer entziehen dann dem Licht seine Energie. Atmosphärenphysiker jedoch sind begeistert: Mit Laserkanonen wollen sie elektrische geladene „Plasmakanäle“ durch die Luft in Gewitterwolken schießen, dort gezielt Blitze auslösen und diese durch die Kanäle ableiten. Solche Anlagen könnten Gebäude mit empfindlichen Elektroanlagen, wie Krankenhäuser oder Flughäfen, vor Blitzeinschlag schützen.

↔ Bei einem Labor-Experiment lenkt ein intensiver (unsichtbarer) Laserstrahl einen ansonsten umherzuckenden Blitz in eine vorbestimmte Bahn. Bild: Kamil Stelmaszczyk, FU Berlin



# Energie – aber wie? Was tun gegen den Klimawandel?

Fast 80 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs werden heutzutage aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe gedeckt. Dadurch gelangten im Laufe der Zeit immer größere Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Luft: Nach dem aktuellen Klimareport der Vereinten Nationen ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre zwischen den Jahren 1750 und 2005 um 35 Prozent gestiegen. Außerdem ist es in den vergangenen 100 Jahren um 0,74 °C wärmer geworden. Tendenz steigend. Für Wissenschaftler belegen diese und weitere Erkenntnisse, wie das Abschmelzen der Gletscher, dass der mit unserem Lebenswandel verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß die Atmosphäre aufheizt. Natürliche Phänomene können die Fülle der Beobachtungen nämlich nicht erklären.

Der Temperaturzunahme von 0,74 °C ist nur scheinbar gering, denn unser Klima reagiert auch auf kleine Änderungen äußerst sensibel. Wie sich die „globale Erwärmung“ weiter entwickelt, hängt allerdings davon ab, wie die Menschheit ihren Energiekonsum von nun an gestaltet. Nach Ansicht von Experten muss der Anstieg bis zum Jahr 2100 auf 2 °C begrenzt werden. Ansonsten müssten sich Menschen, Tiere und Pflanzen auf einschneidende Veränderungen des Klimas einstellen. Was tun? Drei Meinungen:



**Prof. Dr. Claudia Kemfert leitet die Abteilung „Energie, Verkehr, Umwelt“ am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung in Berlin**

Der menschlich verursachte Klimawandel ist die größte Bedrohung und zugleich Herausforderung, vor der die Menschheit je gestanden hat. Die größten Gefahren gehen von extremen Klimaereignissen aus, wie sehr starke Niederschläge, häufige und intensive Hurrikane und Tornados und von extrem heißen Sommern aus. Welche desaströse Auswirkungen ein intensiver Hurrikan haben kann, hat uns im Jahre 2005 die Katastrophe von New Orleans gezeigt. Aber auch Überflutungen, ausgelöst durch Niederschläge oder einem Meeresspiegelanstieg führen zu volkswirtschaftlichen Schäden. Ein nahezu ungebremster Klimawandel führt zu enormen volkswirtschaftlichen Schäden, welche eine weltweite Rezession auslösen können.

Daher ist es notwendig, die Treibhausgase zu vermindern. Dies muss sowohl durch den verstärkten Einsatz CO<sub>2</sub> freier Energietechniken geschehen als auch durch die Verminderung anderer Treibhausgase, wie Methan und Lachgas. Letzteres kann in erster Linie durch veränderte landwirtschaftliche Anbaumethoden – zum Beispiel Reisanbau und Viehzucht – geschehen. Die künftigen Energietechniken müssen vor allem CO<sub>2</sub> frei sein. Es ist notwendig, dass wir künftig eine möglichst breite Palette an CO<sub>2</sub> freien Energietechniken einsetzen – wie erneuerbare Energien, Verbesserung der Energieeffizienz, alternative Antriebsstoffe wie zum Beispiel Wasserstoff, CO<sub>2</sub> arme Kohlekraftwerke und, als Übergangstechnik, Atomenergie. Zudem können in der Zukunft weitere, heute noch unbekannt Techniken, eine Rolle spielen, wie zum Beispiel die Kernfusion. Daher ist es aus heutiger Sicht besonders wichtig, möglichst viele klimaschonende Energietechniken zu erforschen und zum Einsatz zu bringen – wir benötigen nichts weniger als eine Energierevolution.

Fotos: privat, Hintergrund: EUMETSAT



**Prof. Dr. Mojib Latif leitet den Forschungsbereich „Ozeanzirkulation und Klimadynamik“ am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel**

Der globale Klimawandel ist eine Realität. Die Erde erwärmt sich, das Eis schmilzt, der Meeresspiegel steigt und die Wetterextreme nehmen zu. Diese Tendenzen werden sich wegen der Trägheit des Klimas in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen. Falls keine Klimaschutz-Maßnahmen ergriffen werden, kann die Temperatur bis 2100 um weitere vier Grad ansteigen, eine in der Menschheitsgeschichte einmalig rasante Klimaänderung. Neben den klimatischen Problemen besteht auch die Gefahr der Versauerung der Weltmeere, da ungefähr 30 - 40 Prozent des von uns Menschen in die Atmosphäre entlassenen Treibhausgases Kohlendioxid von den Meeren aufgenommen werden. Dies dämpft zwar einerseits die globale Erwärmung, kann aber andererseits zu unabsehbaren Folgen für das Leben im Meer führen, bis hin zu einem Kollaps ganzer Ökosysteme. Um die gravierenden klimatischen und ökologischen Auswirkungen des globalen Klimawandels auf einem „ungefährlichen“ Niveau zu stabilisieren, müsste der Ausstoß der Treibhausgase, insbesondere des Kohlendioxid, um etwa 80 Prozent bis 2100 gesenkt werden. Dies ist nur durch einen strukturellen Umbau der Weltwirtschaft in Richtung der erneuerbaren Energien (Sonnenenergie, Erdwärme, Wasser- und Windkraft, etc.) möglich.

logischen Auswirkungen des globalen Klimawandels auf einem „ungefährlichen“ Niveau zu stabilisieren, müsste der Ausstoß der Treibhausgase, insbesondere des Kohlendioxid, um etwa 80 Prozent bis 2100 gesenkt werden. Dies ist nur durch einen strukturellen Umbau der Weltwirtschaft in Richtung der erneuerbaren Energien (Sonnenenergie, Erdwärme, Wasser- und Windkraft, etc.) möglich.



**Prof. Dr. Walter Blum ist Vorsitzender des „Arbeitskreises Energie“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft**

Der Klimawandel kommt langsam und sicher auf die Welt zugewandelt und wird sie sehr verändern. Schon heute gibt es mehr heiße Sommer und schlimmere Wirbelstürme als früher. Die Pflanzen und die Tiere haben begonnen, sich anzupassen, früher im Jahr zu kommen oder auch auszuwandern.

Wenn aber die Klimaveränderungen zu schnell gehen, so dass die Pflanzen und Tiere ihre neuen Lebensbedingungen nicht finden können, werden sie großen Schaden nehmen, denn die belebte Natur braucht für die Anpassung an neue Lebensbedingungen Zeit. Schaden für die belebte Natur ist auch Schaden für den Menschen, abhängig wie er ist für seine Nahrung und sein Wohlergehen. Der Temperaturanstieg darf bis zum Ende des Jahrhunderts nicht über zwei Grad Celsius hinausgehen.

Für die Energieversorgung müssen wir weltweit alle Mittel einsetzen, das jährliche Kohlendioxid aus der Verbrennung bis zur Mitte des Jahrhunderts zu halbieren. Wind, Sonne und Uran sind geeignete Energiequellen, das zu schaffen. Wir können auch mit weniger Energie auskommen, wenn genügend in die Spartechiken investiert wird. Außerdem müssen wir auf gute Ideen und neue Erfindungen hoffen, um das Zwei-Grad-Ziel bis zum Ende des Jahrhunderts nicht zu verfehlen.