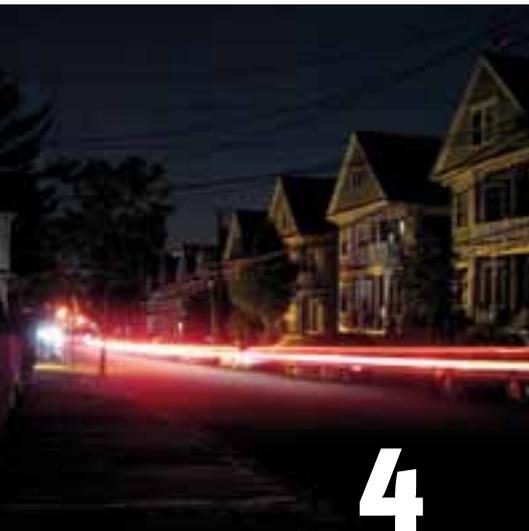


2010  
highlights der **physik**

# Gigawatt

Wissenschaftsmagazin

---



4



16



22

## IMPRESSUM

### HERAUSGEBER

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

### AUTOR

Dr. Thomas Bührke

### WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Prof. Dr. Eberhard F. Wassermann

### INFORMATIONEN ZUM INHALT

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.  
Pressestelle  
Bonner Talweg 8  
53113 Bonn  
Tel. (0228) 55 525 - 18  
Fax (0228) 55 525 - 19  
presse@dpg-physik.de

### KONZEPT, REDAKTION UND GESTALTUNG

#### iserundschmidt

Kreativagentur für PublicRelations GmbH  
Bonn – Berlin  
(Verantwortlich: Timo Meyer,  
Marleen Schwalm, Jana Koliotassis)

September 2010

### QUELENNACHWEIS

Elektrizität: Schlüssel zu einem nachhaltigen  
und klimaverträglichen Energiesystem, Studie  
der Deutschen Physikalischen Gesellschaft,  
Bad Honnef 2010

Energie in Deutschland. Trends und Hinter-  
gründe zur Energieversorgung in Deutschland,  
Bundesministerium für Wirtschaft  
und Technologie (BMWi), Berlin 2009

Energy Statistics of OECD Countries,  
International Energy Agency, Paris 2010

Energie, C. Buchal, Forschungszentrum Jülich,  
2008

Computer, Internet & Co., Umweltbundesamt,  
Bonn 2009

Mehr zur Energie finden Sie unter  
[www.weltderphysik.de/Energie](http://www.weltderphysik.de/Energie)



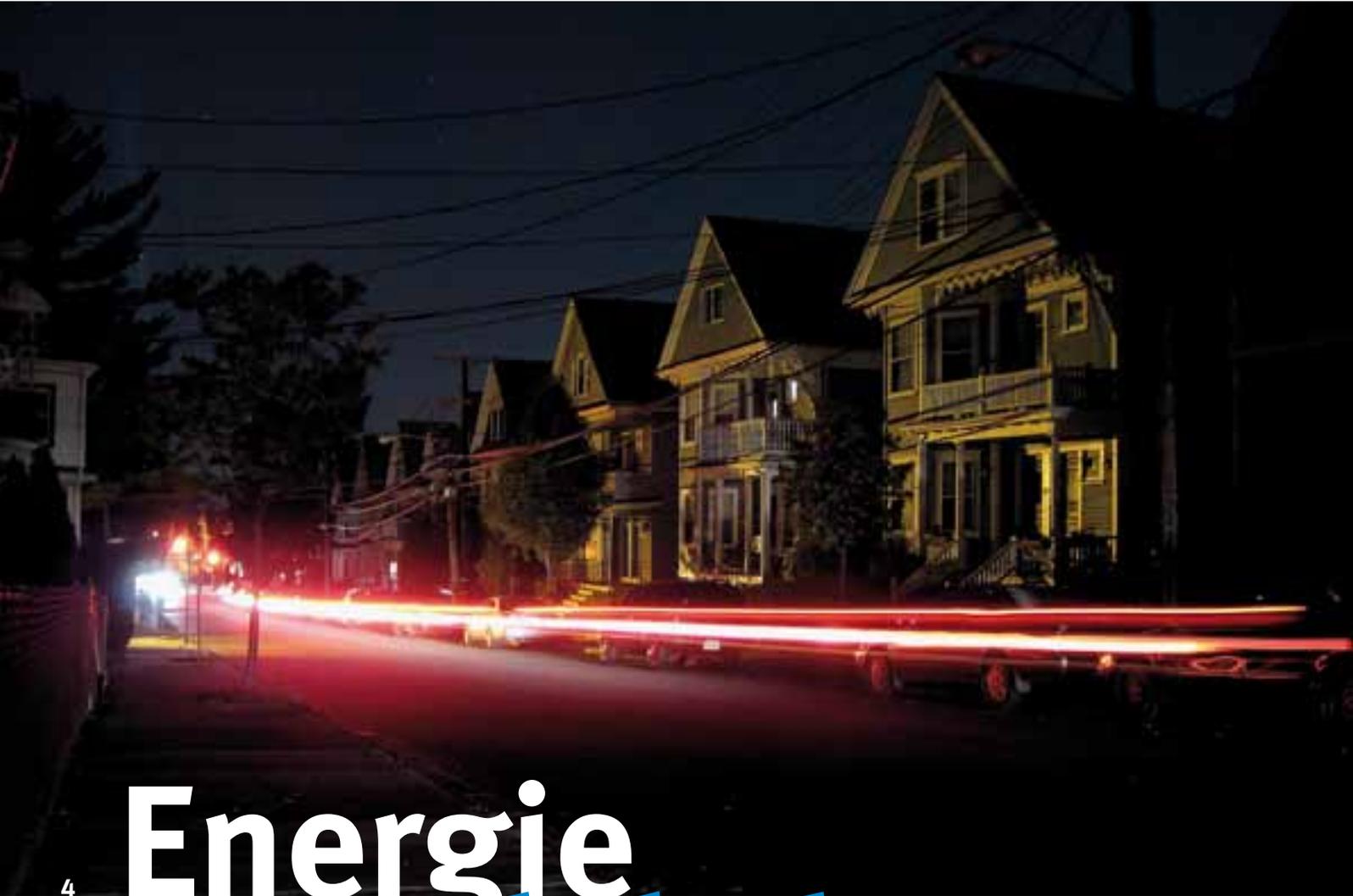
# Gigawatt

## **INHALT**

**4** Energie lokal

**16** Energie unterwegs

**22** Energie global



4

# Energie lokal

**Sieben Uhr morgens, ein neuer Arbeitstag beginnt mit den Frühnachrichten aus dem Radiowecker. Und damit hat auch schon der alltägliche Stromverbrauch eingesetzt. Wir schalten das Licht an, gehen ins Badezimmer und duschen. Falls wir hierfür einen elektrischen Durchlauferhitzer verwenden, bringen wir unseren Stromzähler in Schwung. Abschließend föhnen wir uns die Haare. In der Küche toasten wir Brot auf, holen aus dem Kühlschrank Butter und Marmelade und kochen auf dem Elektroherd ein Ei. Gleichzeitig schalten wir das Notebook an, um E-Mails zu lesen.**

Schon in den ersten Minuten des Tages haben wir eine ganze Reihe elektrischer Geräte benutzt, ohne uns Gedanken darüber zu machen, woher und wie der Strom zu uns kommt oder wie viel elektrische Energie wir verbrauchen. Man kann es sich leicht ausrechnen, wenn man die Leistungsaufnahme der Geräte kennt: Durchlauferhitzer 24.000 Watt (W) bzw. 24 Kilowatt (kW), Toaster und Föhn jeweils 1500 W, Lampen 100 W, Notebook 40 W. Die verbrauchte Energie ergibt sich aus dem Produkt der Leistung und der Zeitdauer. Wenn wir uns zwölf Minuten, entspre-

chend 0,2 Stunden, lang duschen, so verbraucht der Durchlauferhitzer 4800 Wattstunden (Wh) bzw. 4,8 Kilowattstunden (kWh). Die größten Stromverbraucher im Haushalt sind aber Gefrier- und Kühlschränke mit jeweils etwa 100 W Leistung, die 24 Stunden am Tag laufen.

Insgesamt verbraucht eine dreiköpfige Durchschnittsfamilie in Deutschland jährlich 4000 kWh an Strom. Oftmals ist uns das gar nicht bewusst. Beispiel Internet: Die unzähligen Bits und Bytes, die tagtäglich um den Globus flitzen, erweisen sich

zunehmend als Energiefresser. Bereits einmal „Googeln“ benötigt schätzungsweise 4 Wh für die Server-Leistung. Sehr viel mehr, nämlich stolze 1700 kWh, verspielt auf diese Weise ein durchschnittlicher Online-Spieler pro Jahr – das entspricht dem jährlichen Stromverbrauch eines Brasilianers. Das US Lawrence Berkeley National Laboratory hat ausgerechnet, dass der weltweite Verbrauch der [Internetserver](#) im Jahre 2005 etwa 123 Milliarden kWh bzw. 123 Terawattstunden (TWh) betrug. Das entspricht in etwa der Energiemenge, die der gesamte australische Kontinent 2005 benötigte.

Wie sieht es insgesamt mit dem Stromverbrauch in Deutschland aus? Jeder Bürger benötigt pro Tag im Mittel knapp 5 kWh. Das summiert sich zu einem Viertel des gesamten jährlichen Stromverbrauchs in Deutschland. Gleich viel etwa entfallen dabei auf Handel und Gewerbe. Den

► Büste von James Watt im Scottish Hall of Heroes des Wallace Monuments in Schottland. Den Platz hat er sich redlich verdient: Watt entwickelte eine neue Generation von Dampfmaschinen und definierte als erster die Leistung, deren Einheit heute seinen Namen trägt. (Bild: David Brammer)



## INFO

### Newton, Joule und Watt

Als James Watt seine ersten Dampfmaschinen baute, suchte er nach einer physikalischen Größe, mit der er deren Leistungen beschreiben konnte. Dabei orientierte er sich an Pferden, die damals in Mahlwerken angeschirrt im Kreis liefen und auf diese Weise Mühlen antrieben. Das Produkt aus der Kraft, mit der das Pferd zog, und der Geschwindigkeit, mit der es im Kreis lief, definierte Watt als eine Pferdestärke, kurz 1 PS.

Will man die Einheit PS in das heute übliche und nach dem Vater der Dampfmaschine benannte Watt (W) übersetzen, muss man einfach nur die Zahlenwerte, die James Watt den Arbeitspferden zuschrieb, in moderne Einheiten umrechnen. Für die Kraft der Pferde ergibt dies 800 Newton (N), für ihre Geschwindigkeit 0,92 Meter pro Sekunde (m/s). In modernen Einheiten entspricht also  $1 \text{ PS} = 800 \text{ N} \cdot 0,92 \text{ m/s} = 735,5 \text{ Watt}$ . Als Energie bezeichnet man die über einen bestimmten Zeitraum hinweg erbrachte Leistung, also beispielsweise 1 Wattsekunde (Ws).

In den Einheiten des heute verwendeten SI-Systems (von frz. *Système international d'unités*, also Internationales Einheitensystem) ist die mechanische Leistung definiert als die Kraft von 1 Newton bei einer Geschwindigkeit von 1 Meter pro Sekunde (Nm/s). Schafft man über eine Sekunde hinweg eine Leistung von 1 Nm/s, so hat man damit eine Energie von 1 Nm erbracht.

Für unterschiedliche Energieformen verwendet man unterschiedliche Einheiten. „Newton mal Meter“ (mechanisch), „Joule“ (thermisch) und „Watt mal Sekunde“ (elektrisch) lassen sich dabei bequem ineinander umrechnen:  $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ . Dabei sind 3600 Ws eine Wattstunde (Wh) und 1000 Wh eine Kilowattstunde (kWh). Diese Einheit findet sich auch auf unseren Stromrechnungen.



◀ Wie sehr wir alle tagtäglich auf Energie angewiesen sind, merken wir erst, wenn sie fehlt – wie hier bei einem Stromausfall in Somerville im US-Bundesstaat Massachusetts. (Bild: sandcastlematt, Flickr.com)

▲ Wenn wir im Internet surfen, verbraucht nicht nur unser Computer Strom, sondern auch die weltweit mehr als 400 Millionen Internetserver. (Bild: STRATO AG)

Löwenanteil, nämlich fast die Hälfte, verbraucht die Industrie. Der Schienenverkehr beansprucht lediglich drei Prozent.

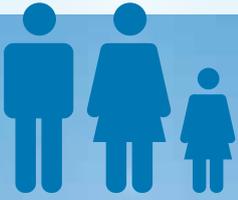
Schaut man auf die bundesweit jährlich verbrauchte Gesamtenergie, so macht der Stromanteil dieser Endenergie hier nur etwa ein Fünftel aus. Einen etwas größeren Anteil hat der Benzinverbrauch im Straßenverkehr. Überwiegend wird bei uns jedoch Energie für das Heizen mit Öl und Gas verwendet. In diesem Bereich liegen deshalb auch die größten Einsparpotenziale. Nehmen wir dies alles zusammen, so benötigt jeder Bundesbürger 81 kWh Energie pro Tag. Ein US-Amerikaner verbraucht fast das Doppelte.

Das ist nur die unmittelbar von uns selbst verbrauchte Energie. Doch was ist mit dem Energieaufwand für die Herstellung der von uns täglich benutzten Gegenstände? In unserem Umfeld versteckt sich noch so

genannte graue Energie. So benötigt man für die Herstellung eines PCs mit Drucker etwa 2800 kWh Strom. Das entspricht etwa dem eineinhalbfachen Jahresverbrauch eines Bürgers in Deutschland. Hinzu kommen noch Wasser und wertvolle Rohstoffe wie seltene Metalle. Oder betrachten wir die T-Shirts in unserem Kleiderschrank: In jedem von ihnen stecken 20 kWh für die Herstellung. Diese graue Energie macht einen Großteil des weltweiten Primärenergieverbrauchs aus, der 2009 durchschnittlich bei 123 kWh pro Kopf und Tag lag.

#### Wie der Strom in die Steckdose kommt

Wenn wir von Energie sprechen, unterscheiden wir dabei ganz unterschiedliche Formen wie etwa elektrische (Strom), thermische (Wärme), kinetische (Bewegung) oder chemische Energie, die in den Bindungen von Molekülen steckt. Dabei

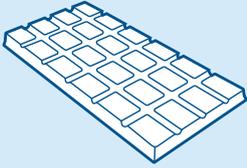


11 kWh

Stromverbrauch pro Tag

4000 kWh

Stromverbrauch pro Jahr



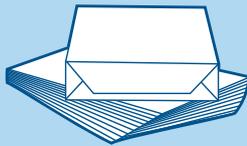
1 kg Schokolade: 2,5 kWh



Tageszeitung: 7,5 kWh



1 Paar Schuhe: 8 kWh



500 Blatt Kopierpapier: 41 kWh



Notebook: 1000 kWh



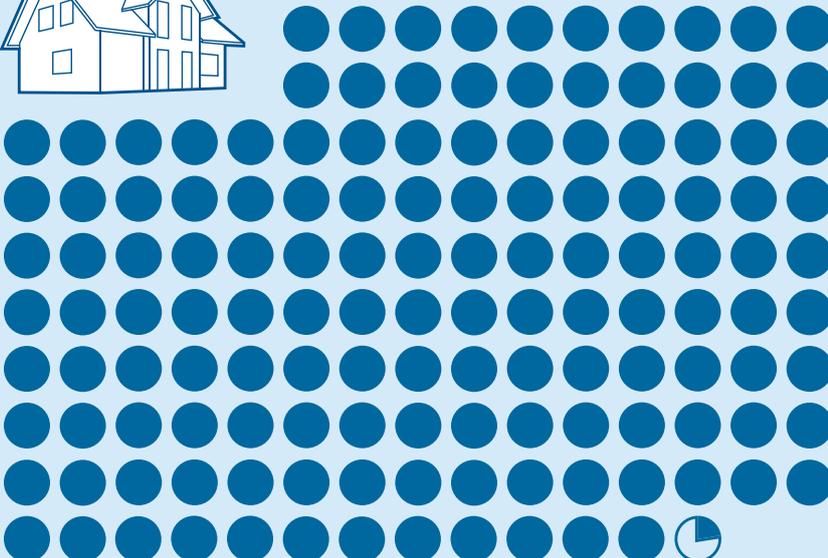
6



Auto: etwa 30.000 kWh



Haus in Ziegelbauweise: 548.900 kWh



◀ Viele Alltagsobjekte kosten schon Energie, bevor wir sie überhaupt nutzen – vor allem für Herstellung, aber auch für Transport und Lagerung. Diese „graue Energie“ kann beachtliche Ausmaße annehmen, wie diese Grafik zeigt. Zum besseren Vergleich ist die graue Energie hier in Einheiten des täglichen bzw. jährlichen Stromverbrauchs einer 3-köpfigen Familie dargestellt. (Infografik: Timo Meyer, Melina Diener)

kann man Energie von einer Form in eine andere umwandeln. Der Physiker Hermann von Helmholtz (1821–1894) fasste die grundsätzlichen Erkenntnisse über die Energie in einem Erfahrungssatz, dem Energieerhaltungssatz zusammen: In einem perfekt isolierten System bleibt die Summe der Energien immer gleich. Energie lässt sich also weder aus dem Nichts erzeugen noch vernichten. Wenn von Energieverlust die Rede ist, meint dies eigentlich den Übergang einer leicht nutzbaren Energieform in eine schwerer nutzbare.

Das bedeutet, dass auch die elektrische Energie, die aus unseren Steckdosen kommt, zuvor in ganz anderer Form vorlag. Betrachten wir diese Umwandlung einmal etwas genauer: Weltweit wird der meiste Strom in Kohlekraftwerken erzeugt. 44 Prozent der gesamten Primärenergie Deutschlands werden durch Braun- und Steinkohle gedeckt. Der Energiegewinn resultiert dabei aus dem Unter-

## Alles dreht sich um Eta

Von den ersten Dampfmaschinen bis zu den heutigen Kraftwerken kreist alles um eine Größe: den Wirkungsgrad. Diese, auch mit dem griechischen Buchstaben Eta bezeichnete Größe gibt für einen physikalischen bzw. technischen Energieumwandlungs- oder Übertragungsprozess an, welcher Anteil der investierten Energie in nutzbringende Energie umgewandelt wird. Da man aus keiner Maschine mehr Energie herausholen kann, als man hineinsteckt, liegt Eta immer zwischen 0 und 1 – entsprechend 0 und 100 Prozent. Dabei kann der Wert 1 niemals erreicht werden. Ansonsten könnte man ein perpetuum mobile konstruieren, also eine Maschine, die immer Arbeit verrichten würde, ohne dass man Energie in sie hineinstecken muss.

Ein Automotor setzt nur etwa 30 Prozent der chemischen Energie bei der Verbrennung des Benzins in die Fortbewegung um, arbeitet also mit einem Wirkungsgrad von 0,3. Der Rest verschwindet als Wärme an den Motorwänden, im Abgas und aufgrund des Rollwiderstands der Reifen. Besonders hohe Wirkungsgrade haben Wasserkraftwerke (bis 90 Prozent) und Elektromotoren (um 90 Prozent). Besonders gering ist er bei Silizium-Solarzellen (13 bis 16 Prozent).

In zusammengesetzten Systemen multiplizieren sich die Wirkungsgrade. Hat beispielsweise ein Kraftwerk bei der Verstromung einen Wirkungsgrad von 46 Prozent und kommen von der eingespeisten Energie aufgrund der Übertragungsverluste in den Fernleitungen an den Hauszählern nur etwa 90 Prozent an, so ergibt sich beim Betrieb einer Glühbirne (Wirkungsgrad 4 Prozent) ein Gesamtwirkungsgrad von  $0,46 \cdot 0,9 \cdot 0,04 = 0,017$  – magere 1,7 Prozent.

Damit eine herkömmliche Glühbirne leuchtet, müssen wir also 60-mal mehr Energie ins Kraftwerk hineinstecken, als letztlich in der Glühbirne als Lichtenergie wieder herauskommt. Bei einer modernen Energiesparlampe mit einem Wirkungsgrad von 25 Prozent sieht das Endergebnis schon wesentlich besser aus: Hier erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad auf 10,4 Prozent, sechsmal mehr als im Fall der Glühbirne.

▲ Der Begriff des Wirkungsgrads ist nicht nur mit Motoren und Generatoren verknüpft. Auch natürlichen Prozessen kann man einen Wirkungsgrad zuordnen, beispielsweise der Lichterzeugung von Glühwürmchen. Diese gelingt den winzigen Insekten mit bis zu 95 Prozent Effizienz – weitaus mehr als bei jeder bisher produzierten künstlichen Lichtquelle. (Bild: Jon Liu)



◀ Techniker an einer 50-Megawatt-Dampfturbine, wie sie hauptsächlich als Generatorantrieb zur Stromerzeugung eingesetzt wird. Gut zu erkennen sind die Turbinenschaukeln im oberen Bildteil. (Bild: Siemens-Pressebild)

schied der chemischen Bindungsenergien, wenn der in der Kohle enthaltene Kohlenstoff zu Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) verbrennt.

Transportmedium der Energie vom Verbrennungsraum in die Dampfturbinen ist bei allen Kraftwerken Wasserdampf – egal ob Kohle, Gas oder Öl verbrannt wird. Mit Temperaturen von bis zu 600 Grad Celsius und hohem Druck von etwa 250 Bar schießt er gegen die Schaufelräder einer Turbine, die sich genau 3000-mal pro Minute drehen muss, damit im so angetriebenen Generator durch Induktion 50 Hertz Wechselstrom erzeugt wird.

Die Turbinenschaukeln müssen dabei ganz besondere Belastungen verkraften. Nicht nur aufgrund der auf sie einwirkenden hohen Temperaturen, denen man mit neuartigen Beschichtungen und Verbesserungen der Schaufelkühlung begegnet. Allein aufgrund ihrer Länge von bis zu 1,4 Metern erreichen ihre Flügelspitzen bei 3000 Um-

drehungen pro Minute fast 1,5-fache Schallgeschwindigkeit. Die dabei auftretenden, an den Flügeln zerrenden Fliehkräfte entsprechen einem Gewicht von bis zu 550 Tonnen, also in etwa dem, was ein voll betankter Airbus A380 auf die Waage bringt.

Im gesamten Kraftwerksprozess wird Energie mehrmals umgewandelt, wobei immer Energie in Form von Wärme verloren geht. Da sich die einzelnen Wirkungsgrade multiplizieren, ist der Wirkungsgrad des gesamten Prozesses relativ gering. In Kohlekraftwerken wird nicht einmal die Hälfte der ursprünglichen chemischen Energie der Kohle in elektrische Energie umgesetzt. Der Wirkungsgrad der zurzeit in Betrieb befindlichen Kraftwerke beträgt weltweit im Durchschnitt etwa 30 Prozent, in Deutschland sind es 41,5 Prozent; neue Kraftwerke erreichen sogar 43 Prozent. Diese Zahl soll in Zukunft weiter steigen. Erklärtes Ziel der Ingenieure ist ein Wirkungsgrad von 50 Prozent.



◀ Das Bild zeigt eine australische Uranmine. Genau wie Öl, Erdgas oder Kohle ist auch der Brennstoff unserer Kernkraftwerke in einigen Jahrzehnten endgültig aufgebraucht. (Bild: Alberto OG)



◀ In dieser Testanlage rückt man einem Teil der Abgase des Braunkohlekraftwerks Niederaußem mithilfe von Algen zu Leibe. Diese gedeihen in V-förmig aufgehängten Kunststoffschläuchen und ernähren sich vom Kohlendioxid in den Abgasen. Rund zwölf Tonnen CO<sub>2</sub> binden die Mikroalgen auf diese Weise pro Jahr – ein verschwindend geringer Teil der 27 Millionen Tonnen, die Niederaußem jährlich produziert. Für kleinere Kraftwerke könnten die Algen aber durchaus eine Option sein. (Bild: RWE)

### Die Rohstoffe sind begrenzt

Eine Verbesserung des Wirkungsgrades ist aus zwei Gründen wichtig: Zum einen sind die Vorräte an fossilen Brennstoffen begrenzt. Eine effizientere Nutzung verlängert also die Zeit, in der die Rohstoffe zur Verfügung stehen. Zum anderen reduziert sich bei Erhöhung des Wirkungsgrades auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Würde der weltweite Verbrauch auf dem derzeitigen Niveau bleiben, so reichten die bekannten Reserven von Erdöl noch 40 Jahre, Erdgas 60 Jahre, Steinkohle 130 Jahre, Braunkohle 290 Jahre und [Uran](#) 70 Jahre. Nimmt man die vermutlich darüber hinaus vorhandenen Ressourcen hinzu, so verlängert sich die jeweilige zeitliche Reichweite um ein Vielfaches. Jedoch wird die Zunahme des jährlichen weltweiten Verbrauchs diesen Zeithorizont wiederum verringern. Neue Förder-techniken und energiesparende Techno-

logien werden ihn dagegen verlängern. Sichere Vorhersagen sind deshalb heute nicht möglich.

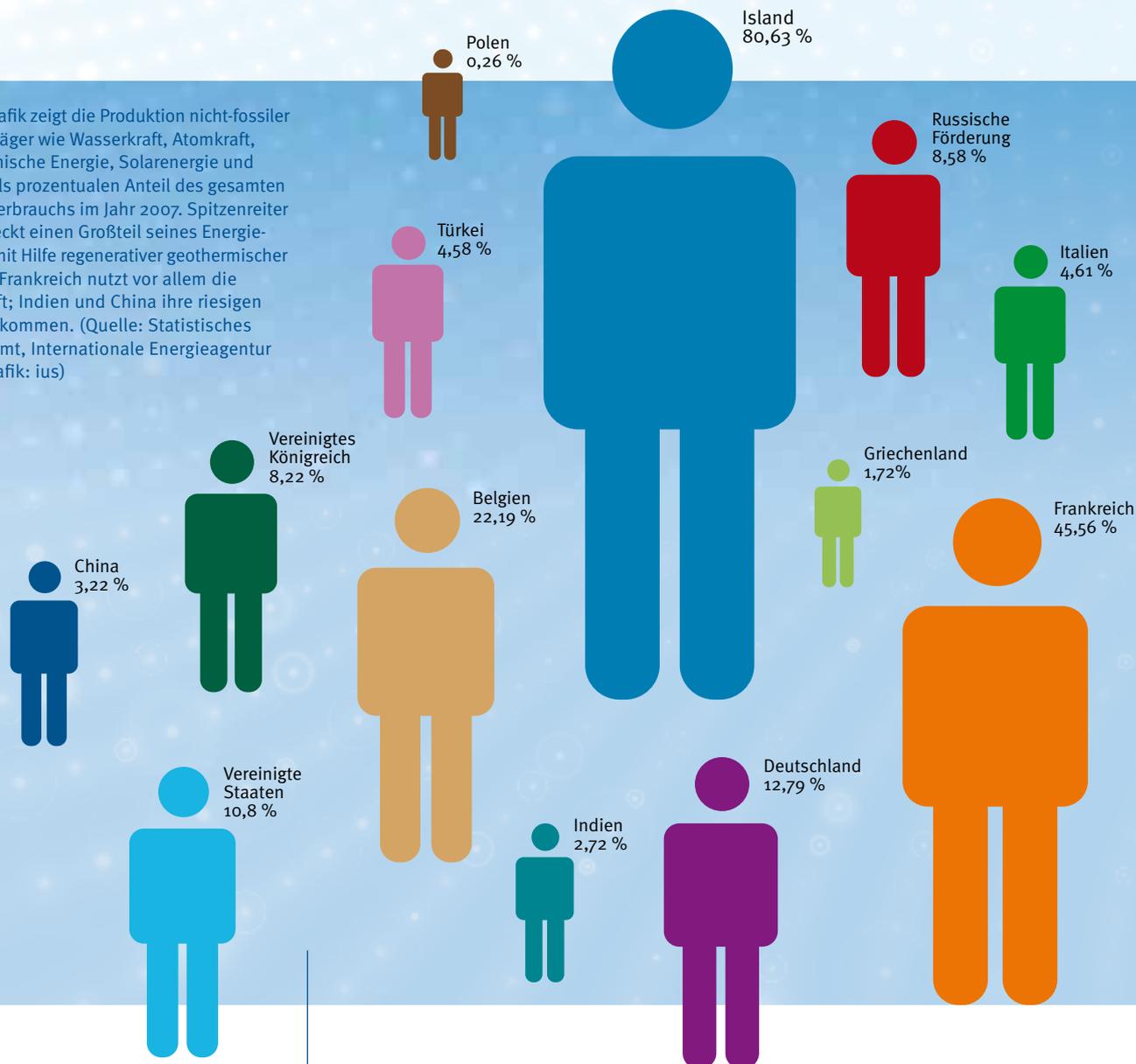
In Deutschland wird im Schnitt bei jeder erzeugten Kilowattstunde ein halbes Kilogramm Kohlendioxid frei. Zählt man alle Emissionen – also auch die aus Autos – zusammen, so kommt man 2009 für Deutschland auf eine Gesamtmenge von 797 Millionen Tonnen. Das entspricht aber nur 2,5 Prozent aller weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dabei legte der neue Spitzenreiter China (7,43 Milliarden Tonnen) von 2008 auf 2009 bei den Emissionen um 630 Millionen Tonnen zu – Dreiviertel des deutschen Gesamtverbrauchs.

Diese gigantischen Mengen an Kohlendioxid sammeln sich langsam in der Atmosphäre an. Heute befinden sich in einem Kubikmeter Luft 0,385 Liter CO<sub>2</sub>. Die CO<sub>2</sub>-Moleküle lassen das einfallende Sonnenlicht ungehindert durch, denn CO<sub>2</sub>-Mole-

küle absorbieren im Wesentlichen keine Strahlung aus dem Spektrum des Sonnenlichts. Ein Drittel der einfallenden Sonnenstrahlung wird an der Erdoberfläche zurückreflektiert. Zwei Drittel der Strahlung erwärmt den Erdboden und die Meere. Die so entstehende Wärmestrahlung wird als langwellige Infrarotstrahlung in Richtung Weltraum abgestrahlt. Diese Strahlung wird in der Atmosphäre vor allem von Wasserdampfmolekülen, bei großen Wellenlängen von mehr als 15 Mikrometern auch von den CO<sub>2</sub>-Molekülen absorbiert und wieder in Richtung Erde abgestrahlt. Dies führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre. Die CO<sub>2</sub>- und die Wassermoleküle wirken gewissermaßen wie das Glasdach eines Treibhauses, daher die Betitelung als Treibhausgas.

Eine Möglichkeit, den [CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern](#), ist die Verbesserung des Wirkungsgrades der Kraftwerke. Technisch

► Die Grafik zeigt die Produktion nicht-fossiler Energieträger wie Wasserkraft, Atomkraft, geothermische Energie, Solarenergie und andere als prozentualen Anteil des gesamten Energieverbrauchs im Jahr 2007. Spitzenreiter Island deckt einen Großteil seines Energiebedarfs mit Hilfe regenerativer geothermischer Energie. Frankreich nutzt vor allem die Atomkraft; Indien und China ihre riesigen Kohlevorkommen. (Quelle: Statistisches Bundesamt, Internationale Energieagentur (IEA); Grafik: ius)



gesehen ist dies eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Der Weltrekord für Dampfturbinen liegt heute bei 46 Prozent. Diese werden mit 600 Grad heißem Wasserdampf betrieben. Eine Steigerung auf 50 Prozent und mehr ist möglich, wenn man die Dampftemperatur bis auf 700 Grad Celsius erhöht. Grundlage dieser Rechnung ist ein bereits 1824 vom französischen Physiker Sadi Carnot entdecktes Gesetz: Je größer der Temperaturunterschied des Mediums – in diesem Fall Dampf – vor und nach der geleisteten Arbeit ist, desto größer ist der Wirkungsgrad.

Die Entwicklung spezieller auf solch hohe Temperaturen ausgelegter Turbinen ist jedoch so aufwendig, dass sich mehrere Unternehmen zu einem Forschungskonsortium namens COMTESS 700 zusammengeschlossen haben. Im Jahr 2014 soll das erste 700-Grad-Kraftwerk der Welt mit dem Namen „50plus“ in Wilhelmshaven in Betrieb gehen.

Insgesamt ließe sich in Deutschland mit moderner Technik und vermehrtem Einsatz von Gas anstelle von Kohle die CO<sub>2</sub>-Emission bis 2030 schätzungsweise um 15 bis 25 Prozent verringern.

#### Es geht auch ohne Kohlendioxid

Am besten wäre es natürlich, wenn man Energie oder zumindest Strom **gänzlich ohne CO<sub>2</sub>-Emission** erzeugen könnte. Regenerative Energien, Kernfusion und Kernspaltung sind die Stichworte. Den größten Beitrag zur CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugung in Deutschland liefern momentan 17 Kernkraftwerke mit jährlich rund 120 TWh – das ist rund ein Fünftel des deutschen Stroms. Würde diese Menge von anderen Kraftwerken entsprechend dem heutigen deutschen Energiemix erzeugt, so näme die emittierte CO<sub>2</sub>-Menge sogar um gut hundert Millionen Tonnen, also rund 30 Prozent zu.

Kernkraftwerke beziehen ihre Energie aus der Spaltung von Urankernen in zwei etwa gleich schwere leichtere Kerne. Die Masse dieser Produkte der Kernspaltung ist kleiner als die Masse der Ausgangskerne. Die fehlende Masse  $m$  steht nach Einsteins berühmter Formel  $E=mc^2$  als Energie zur Verfügung, zunächst als Wärme, die Wasser zu Dampf erhitzt, und dann wie in einem Kohlekraftwerk eine Turbine mit Generator zur Stromerzeugung antreibt. Allerdings entstehen im Betrieb große Mengen an radioaktivem Abfall, für den es noch keine endgültige Entsorgungsmöglichkeit gibt.

Die bereits erwähnte Kernfusion schöpft ihre Energie ebenfalls aus den Bindungsenergien der Atomkerne. Hier nutzt man Prozesse, die auch im Zentralbereich unserer Sonne ablaufen. Wasserstoffkerne verschmelzen dort bei enormem Druck und 15 Millionen Grad Celsius zu Heliumkernen. In einem Fusionsreaktor soll eine

# INFO



12 kWh



10 kWh



8,1 kWh



4,7 kWh



0,15 kWh



0,03 kWh

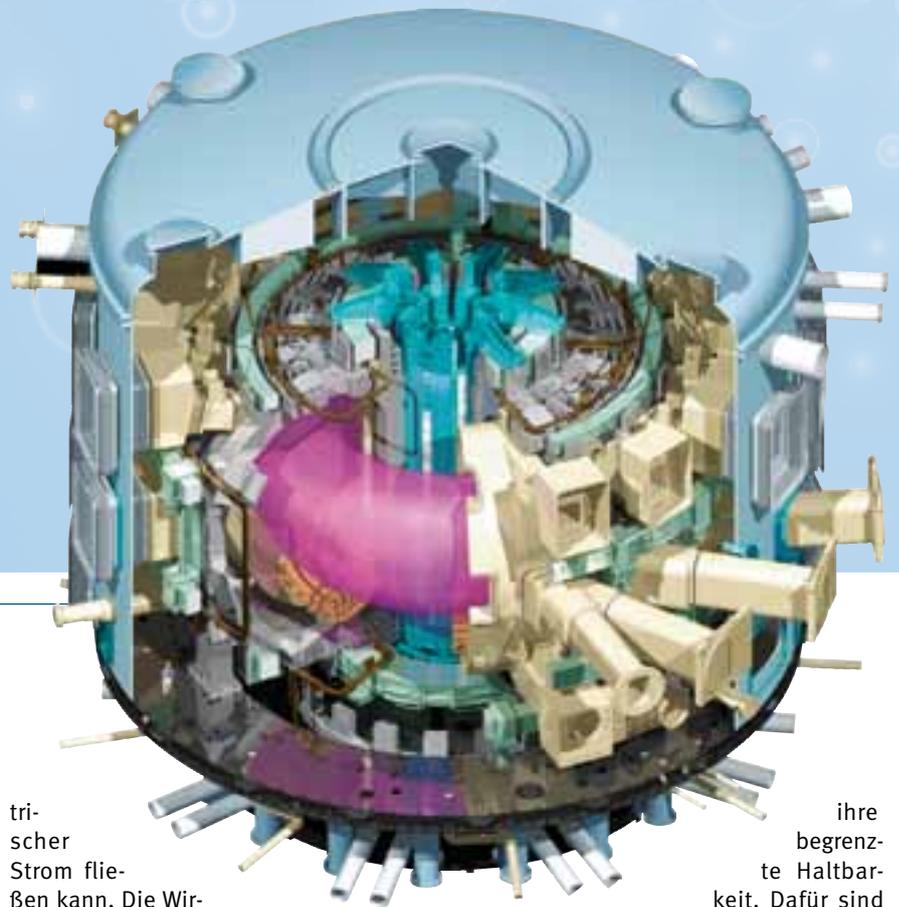
## Geballte Energie

Unablässig wird auf der Erde Energie umgewandelt: Autos gewinnen aus der Verbrennung von Benzin kinetische, thermische und elektrische Energie, Kraftwerke setzen Energieträger in Strom und Wärme um, und wir Menschen ziehen aus der Nahrung Energie für alle Lebensvorgänge. Der Energieinhalt der Brennstoffe wird als Brennwert bezeichnet. Das ist diejenige Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung eines Stoffes je Masse- oder Volumeneinheit freigesetzt wird. Da bei der Energieumwandlung jedoch nie ein Wirkungsgrad von 100 Prozent erreicht wird, ist der Energieinhalt nicht vollständig nutzbar. Die obere Grafik zeigt die spezifischen Energieinhalte für jeweils ein Kilogramm (v.l.n.r.) Benzin, Butter, Steinkohle, Zucker, Lithium-Ionen-Akku (Speicherkapazität) und Bleiakku. (Grafik: ius)

10

► Organische Leuchtdioden – sogenannte OLEDs – sind hauchdünn, extrem leicht, strahlend hell und verbrauchen nur wenig Energie. (Bild: OSRAM-Pressbild)

▼ Die Schnittzeichnung zeigt das Innenleben des zukünftigen Fusionsreaktors ITER. Innerhalb eines heißen Fusionsplasmas in seinem Inneren (hier violett) sollen später einmal Deuterium- und Tritiumkerne zu Heliumkernen verschmelzen und so Energie liefern. (Bild: © ITER Organization)



ähnliche Reaktion kontrolliert ablaufen. Man erzeugt ein 15 Millionen Grad heißes Plasma aus elektrisch geladenen Teilchen und erhöht dann die Temperatur, bis die Kerne fusionieren. Dabei wird eine ungeheure Energiemenge freigesetzt. Ein Kilogramm Wasserstoff liefert so viel nutzbare Wärmeenergie wie 10.000 Tonnen Kohle. Im südfranzösischen Cadarache entsteht zurzeit der internationale Fusionsreaktor ITER, der frühestens 2019 seinen Forschungsbetrieb aufnehmen soll.

Die Energie, die die Sonne per Fusion erzeugt, ist praktisch unerschöpflich. Ihre Sonnenstrahlung lässt sich mit Solarzellen auch direkt in Strom umwandeln. Einstein verdanken wir ein Grundverständnis dieses photoelektrischen Prozesses, kurz Photoeffekts. Fängt eine Photozelle ein Lichtquant (Photon) ein, dann schlägt dieses aus dem Atomverbund der Photozelle ein negativ geladenes Elektron heraus, das in einem äußeren Stromkreis als elek-

trischer Strom fließen kann. Die Wirkungsgrade heutiger Solarzellen aus polykristallinem Silizium liegen bei 16 bis 19 Prozent. Mehrlagige Hightech-Zellen aus Gallium, Indium und Germanium schaffen sogar 41 Prozent. Photovoltaik trug 2009 in Deutschland ein Prozent zur Stromeinspeisung bei, beansprucht aber etwa 8 Prozent der Stromerzeugungskosten.

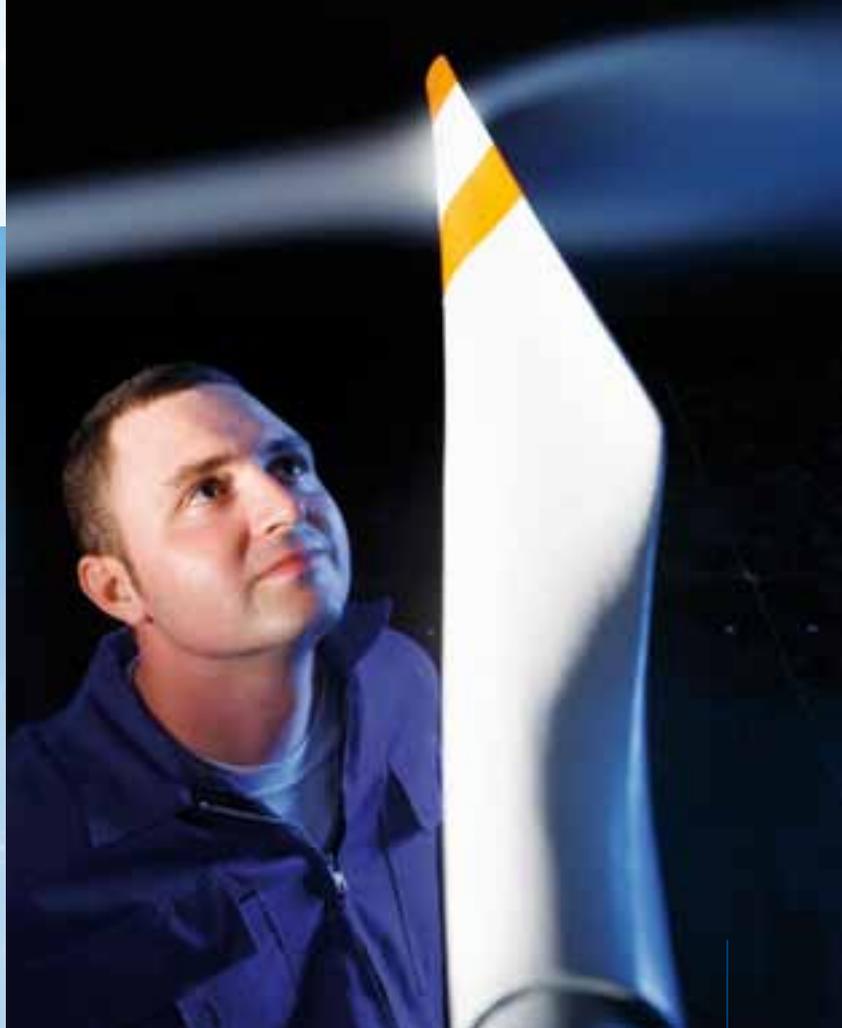
Mit modernen Methoden und dem Einsatz von Nanotechnologie gelingt es immer besser, Photozellen auch aus organischen und polymeren Materialien herzustellen. Diese sind preiswert und unter vergleichsweise geringem Energieeinsatz herstellbar. Ihr Nachteil ist bis heute der geringe Wirkungsgrad von wenigen Prozent und

ihre begrenzte Haltbarkeit. Dafür sind sie großflächig herstellbar, flexibel und sogar kleine Multitalente: Legt man eine Spannung an die Zellen und kehrt damit den Photoeffekt um, erhält man **organische Leuchtdioden**. Diese könnten in Zukunft, aufgetragen mit einer Farbbrolle, vielleicht ganze Zimmerwände zum Leuchten bringen oder Fensterfronten von Bürogebäuden nachts in großflächige Lichtquellen verwandeln.

Doch nicht nur Photovoltaik nutzt das Sonnenlicht, sondern auch die Solarthermie. Hier bündelt man die Sonnenstrahlen mit Spiegeln und erhitzt eine Flüssigkeit. Man erzeugt also mit Sonnenenergie zunächst thermische Energie (Wärme), mit deren Hilfe dann Turbinen angetrie-



▲ Baustoff für Solarzellen ist eigentlich Silizium. Kommt es allerdings mehr auf Effizienz an als auf den Preis, ist Germanium besser geeignet – zum Beispiel für Solarmodule im Weltraum. Die Aufnahme zeigt einen Germanium-Einkristall mit einem Durchmesser von 110 Millimetern. (Bild: Leibniz-Institut für Kristallzüchtung Berlin; Foto: K. Banse, Ch. Frank-Rotsch)



▲ Rotorblätter heutiger Windräder sind aerodynamisch geformt wie Flugzeugflügel. Ihr gewölbtes Profil erzeugt genau wie beim Flugzeug eine Auftriebskraft. Mit dem Unterschied, dass diese keinen Jumbojet in die Luft hebt, sondern den Rotor des Windrads in Drehung versetzt. Die besonderen Luftströmungen kann man anhand von Modellen in einem Windkanal mit Rauch sichtbar machen. (Bild: © BMU / Christoph Edelhoff)

ben werden. Solarthermische Kraftwerke haben den Vorteil, dass sich thermische Energie gut speichern lässt. Diese Kraftwerkstypen können deshalb auch nachts Strom liefern, weil sie die gespeicherte Wärme dann zur Stromerzeugung nutzen (mehr dazu im Kapitel „Energie global“).

Wasserkraftwerke sind die Klassiker unter den erneuerbaren Energiequellen. Sie wandeln die Bewegungsenergie des strömenden Wassers direkt in Strom um. Weltweit tragen sie 16 Prozent zur Stromerzeugung bei, in Deutschland nur 3,5 Prozent – ein wesentlich stärkerer Ausbau scheint bei uns nicht mehr möglich zu sein.

Ganz im Gegensatz dazu erfährt die [Windkraft](#) ein starkes Wachstum. Mittlerweile beträgt ihr Anteil an der Stromerzeugung 6,3 Prozent – Tendenz steigend. Das Potenzial für den künftigen Ausbau liegt hier bei großen Windfarmen auf hoher See, den sogenannten Offshore-Anla-

gen (siehe Kapitel „Energie global“) und dem Austauschen kleiner Anlagen auf dem Festland durch modernere leistungsfähigere Windräder („Repowering“). Die installierte Windleistung in Deutschland übertrifft mit fast 27 Gigawatt (GW) schon heute die Kapazität der Kernkraftwerke – allerdings läuft jede einzelne Windenergieanlage im Schnitt nur an 70 Tagen im Jahr wirklich mit voller Leistung; nur an rund 2 Tagen liefert der gesamte deutsche Windpark mehr als 20 GW.

#### Auf und ab im Stromverbrauch

Wenn in der Zukunft unsere Energie zu einem viel größeren Anteil aus regenerativen Quellen stammt, woher kommt dann der Strom, wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht?

Aktuell arbeitet unser Kraftwerksnetz nach einem ausgeklügelten Plan, in dem

bei Bedarf auch schnell reagiert werden kann. Alle Kraftwerke werden über [Computerprogramme](#) gesteuert, in die zum Beispiel auch die Wettervorhersage eingeht. Dabei hilft es, dass der Tagesgang des Stromverbrauchs grundsätzlich bekannt ist. Ein Großteil an Strom für Industrie und Haushalte wird rund um die Uhr benötigt. Diese Grundlast ist aufgrund des größeren Bedarfs an Licht und Heizung im Winter höher als im Sommer. Den Grundlaststrom liefern heute Laufwasser-, Braunkohle- und Kernkraftwerke. Sie laufen mit voller Leistung beinahe das ganze Jahr über. Zu dieser Grundlast kommt eine variable Mittellast hinzu, die bekannten, regelmäßigen Schwankungen unterliegt. Die Mittellast liefern Kraftwerke, die sich über einen weiten Leistungsbereich gut regeln lassen, also Steinkohle-, Gas- und Dampfturbinenkraftwerke.

Dieser Grund- und Mittellast sind zusätzlich morgens, mittags und abends – zu den



◀ In den Kontrollräumen der Kraftwerke wird über die Stromerzeugung gewacht und gesteuert, wie viel Energie ins Netz eingespeist wird. (Bild: RWE)



◀ Lastspitzen entstehen, wenn viele Menschen zur gleichen Zeit kurzfristig mehr Strom verbrauchen als üblich. Ein gutes Beispiel: Das WM-Finale Deutschland gegen Argentinien am 8. Juli 1990. Insgesamt dreimal ließen 28,66 Millionen deutsche Fernsehzuschauer\* den Strombedarf stark schwanken – kurz vor dem Spiel und in der Halbzeitpause jeweils um 160 MW sowie in der ersten halben Stunde nach Spielende um stolze 400 MW. (Bild: picture-alliance/augenblick)

\* TV-Zuschauer in der alten Bundesrepublik.

Essenszeiten – drei Spitzen überlagert. Zur Deckung dieses Bedarfs springen Spitzenlastkraftwerke an, die aus dem Stand innerhalb weniger Minuten ihre volle Leistung erbringen. Hierfür eignen sich besonders Gasturbinen- und Pumpspeicherkraftwerke. Bekannt ist auch, dass in der Weihnachtszeit besondere Spitzen auftreten, und selbst die [Fernsehübertragung eines wichtigen Fußballspiels](#) wird berücksichtigt, weil man weiß, dass zur Halbzeit der Strombedarf steigt.

### Von der langen Leitung zum intelligenten Netz

Mit unserem derzeitigen Kraftwerkspark lassen sich solche Lastspitzen ausgleichen. Wenn zukünftig aber vermehrt Wind- und Sonnenkraftwerke den Strom liefern, können so hohe Spannungsschwankungen auftreten, dass die Strom-

versorgung wegen Überlast zusammenbricht. Unser rund 40 Jahre altes Netz ist für eine solche Entwicklung nicht ausgelegt. Deswegen wird europaweit an einem neuen Verbundnetz gearbeitet, das zukünftig in der Lage sein soll, stark schwankende Einspeisungen und Abnahmen selbstständig zu regeln. Fachleute sprechen vom intelligenten Netz (englisch: smart grid), dem ein computergesteuertes Energiemanagement zugrunde liegt.

In einem intelligenten Netz muss sich der Strom grenzüberschreitend verteilen können, so dass sich Mangel und Bedarf optimal ausgleichen lassen. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die Stromspeicher. Großtechnisch kommen dafür zurzeit nur Pumpspeicher in Frage. Diese bestehen aus zwei Wasserreservoirs, die sich auf unterschiedlichen Höhen befinden. Bei Stromüberschuss wird Wasser von unten nach oben gepumpt. Dabei gewinnt es im

Schwerefeld der Erde potentielle Energie. Bei Strombedarf fließt das Wasser dann durch eine Röhre wieder ins untere Becken zurück und treibt dabei eine Turbine mit Generator an. Dabei wird die potentielle Energie in kinetische und dann im Generator in elektrische Energie umgewandelt.

Solche [Pumpspeicherwerke](#), von denen es in Deutschland insgesamt 31 gibt, besitzen einen recht hohen Wirkungsgrad von 80 Prozent und eine Gesamtspeicherkapazität von 40 GWh. Ein wirklich intelligentes Netz von regenerativen Kraftwerken mit Wind- und Sonnenenergieprognose und gut regelbaren (Bio-)gasanlagen könnte mit dieser Speicherkapazität auch mit deutlich weniger Grundlastkraftwerken als bisher zuverlässig den Strom verteilen. Ein Vergleich mit der Gesamtkapazität der installierten Windleistung (2010 etwa 26,4 GWh) zeigt allerdings, dass diese Kapazität nur gut eine einzige Stunde

▼ Luftaufnahme des Pumpspeicherkraftwerks Goldisthal in Thüringen mit seinen zwei Wasserbecken – das obere fasst 12, das untere 18 Millionen Kubikmeter Wasser. Wird dieses aus dem oberen Reservoir durch einen Verbindungstollen nach unten geleitet, treibt es dabei 4 gewaltige Turbinen mit einer Gesamtleistung von mehr als einem Gigawatt an. (Bild: Vattenfall)

► Diese Glühbirne geht gerade vom geordneten in einen ungeordneten Zustand über – die Entropie nimmt zu. Geringer werden kann die Entropie hingegen nicht: Selbst, wenn man die Glühbirne reparieren und so von Hand in den geordneteren Zustand zurückversetzen könnte, die dazu aufgewendete Energie würde die Gesamtentropie wieder anwachsen lassen. (Bild: © Laszlo Ilyes)



Windflaute komplett ersetzen kann. Es bedarf also anderer großtechnischer Energiespeicher für eine gesicherte Versorgung mit erneuerbaren Energien. Außerdem wird auch an Lösungen geforscht, um den Strom zu solchen Zeiten kostenfrei zu verbrauchen und Energie zu speichern, wenn er im Überschuss zur Verfügung steht. Etwa, um Gase aufzubereiten, die dann in unterirdischen Lagern für eine spätere Verwendung gespeichert werden, oder um riesige Kühlhäuser abzukühlen, die dann wiederum tagelang auch ohne Strom auskommen.

Zukünftig sollen außerdem zunehmend auch kleine Anlagen wie die Photovoltaikanlage auf dem Hausdach oder die Biogasanlage auf dem Bauernhof mit in das europaweite Netz eingegliedert werden. Ein weiterer Baustein im intelligenten Netz sollen virtuelle Kraftwerke werden. Das sind regionale Verbände von mehreren klei-

nen Stromerzeugern, die über eine computergesteuerte Leitwarte zusammengeschaltet werden und dann nach außen wie ein kleines Kraftwerk auftreten, das bei Bedarf Lastspitzen ausgleicht. Ein Pilotprojekt mit neun kleinen Wasserkraftwerken läuft seit 2008 im Sauerland.

Heute wird auch bereits darüber diskutiert, große Gebäude und später Elektroautos in das intelligente Stromnetz mit aufzunehmen (siehe Kapitel „Energie unterwegs“). Bei Hochhäusern gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, Energie zu erzeugen, zum Beispiel mithilfe auf dem Dach installierter Solarzellen, wie man sie in Deutschland vielfach auf Privathäusern oder auf den großen Scheunendächern in ländlichen Gegenden findet. Einen Schritt weiter ist das 2008 fertig gestellte World Trade Center in Bahrain. Es besteht aus zwei Türmen, deren Form an Segel erinnern. Zwischen den Türmen sind drei



## INFO

### Auf dem Weg ins Chaos

Mitte des 19. Jahrhunderts führte der deutsche Physiker Rudolf Clausius den Begriff der Entropie ein. Beim Betrieb einer Dampfmaschine beispielsweise besitzt die zugeführte Energie eine geringe Entropie, die Abwärme hingegen eine hohe Entropie. Aus der Differenz lässt sich die mögliche mechanische Arbeit der Maschine berechnen. Clausius fand heraus, dass die Entropie bei solchen Prozessen nie abnehmen kann. Anders ausgedrückt: Wärmeenergie kann nie vollständig in mechanische Energie umgeformt werden. Dabei stellte sich Clausius Wärme noch als Substanz vor, die von einem Körper auf den anderen übergeht, wobei diese nie von selbst vom kälteren zum wärmeren Körper wechselt.

Im Jahr 1877 fand der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann eine statistische Erklärung für die Entropie. Sie beruht darauf, dass Materie aus sich bewegenden Atomen und Molekülen besteht. Demnach ist die Entropie eine Größe, die etwas über die Ordnung dieser Teilchen aussagt: Jedes System strebt nach mehr Unordnung. Von alleine, also ohne Energiezufuhr von außen, entsteht keine Ordnung. Ordnung ist hier ein Ausdruck der Wahrscheinlichkeit: Eine Zunahme der Entropie bedeutet einen Übergang in einen Zustand von größerer Wahrscheinlichkeit. Denkt man sich zum Beispiel tausend Kugeln in einem Karton, so gibt es nur eine begrenzte Zahl an Möglichkeiten, sie so anzuordnen, dass sie alle genau in einer Reihe liegen. Es gibt aber nahezu unbegrenzt viele Möglichkeiten, ein regelloses Muster einzunehmen. Das Streben nach diesem wahrscheinlichsten Zustand, der Unordnung, ist die Zunahme der Entropie.



14

◀ Zwischen den beiden Gebäudeteilen des Bahrain World Trade Centers sind drei Windräder installiert. Alle drei zusammen liefern 1,2 GWh pro Jahr und stellen die weltweit erste gebäudeintegrierte Windturbinenenergieanlage dar. (Bild: Bahrain World Trade Center)

▶ Die Grafik zeigt den Primärenergieverbrauch weltweit und in Deutschland. Zusätzlich zeigt sie, woher bei uns die Energie stammt. Die dabei auftretende Diskrepanz zwischen Primärenergiegewinnung und -verbrauch wird durch den Import von Energieträgern ausgeglichen – hier vor allem Mineralöl, Erdgas und Uran. (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Juni 2010; Infografik: Timo Meyer, Marleen Schwalm)

Windräder mit jeweils 29 Meter Durchmesser montiert. Die Form der beiden Türme ist dem Profil von Flugzeugtragflächen nachempfunden, so dass die Luft zwischen ihnen wie in einer Düse strömt. Das verleiht den **Windrädern** eine hohe Effizienz. Sie liefern zusammen im Jahr 1,2 GWh an Strom, was immerhin rund 15 Prozent des im Gebäude anfallenden Bedarfs abdeckt.

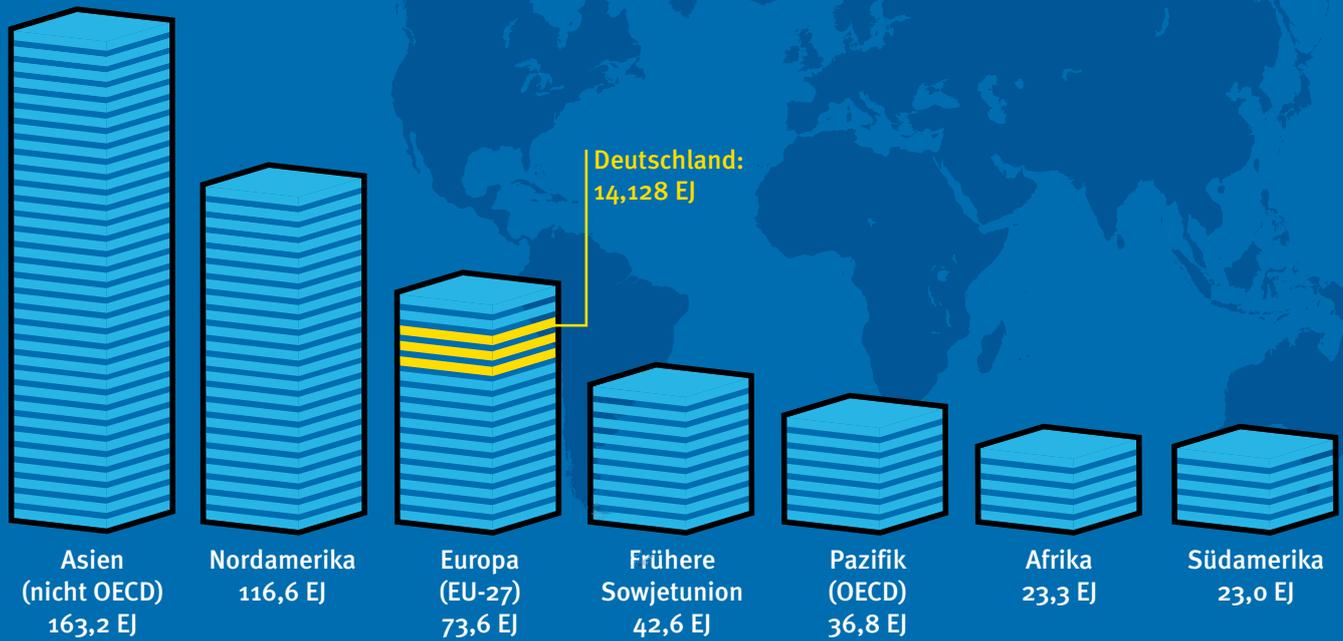
Als Grünen Riesen könnte man auch den Pearl River Tower im chinesischen Guangzhou bezeichnen. Dieser 310 Meter hohe

Wolkenkratzer soll nach seiner Fertigstellung im Jahre 2011 seine benötigte Energie komplett selbst produzieren – vor allem mit Windkraft. Das Hochhaus besitzt zwei große Öffnungen, durch die der Wind in das Gebäudeinnere eindringt und zwei Turbinen antreibt. Zudem erzeugen Solarzellen an der Außenfassade Strom und Sonnenspiegel erhitzen Wasser. Überschüssige Energie speist der Turm in das Netz ein. Ein intelligenter Energiespeicher würde das Gebäude letztlich völlig autark machen.

Diese Beispiele zeigen, was energietechnisch möglich ist. Für das erforderliche intelligente Netz einer dezentralen Energieversorgung müssen europaweit zukünftig schätzungsweise 6000 Kilometer neue Kabel verlegt und 10.000 Kilometer technisch aufgerüstet werden. Hinzu kommen moderne Leitstellen mit schnellen Computern und intelligenter Software. Das dürfte allein in Europa bis 2050 rund 200 Milliarden Euro kosten und damit eines der größten Infrastrukturprojekte unserer Zeit werden.

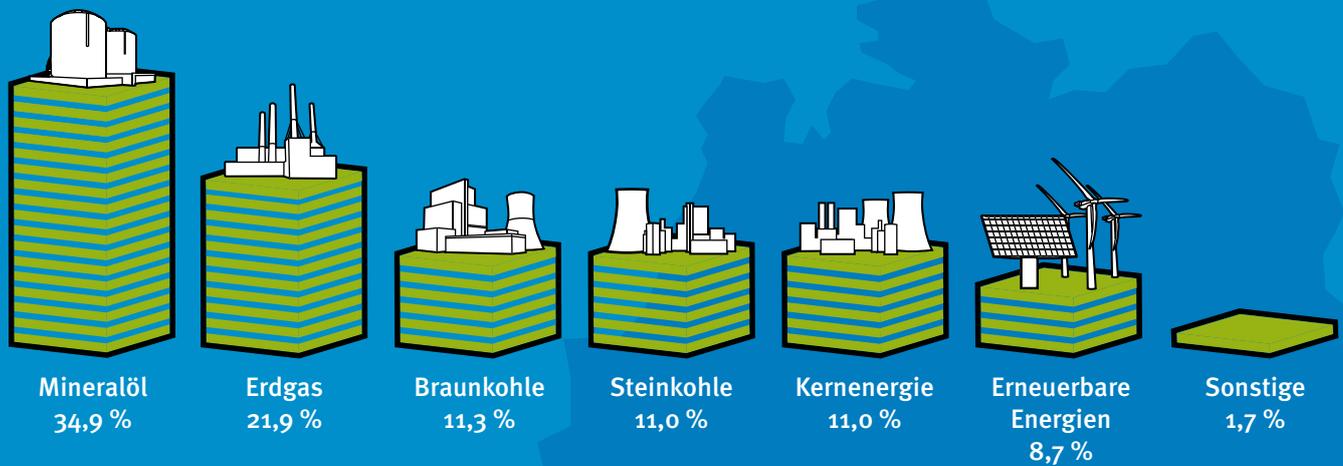
### Primärenergieverbrauch nach Ländern und Regionen 2007

Weltweit gesamt: 503,6 Exajoule (E) =  $503,6 \cdot 10^{18} \text{ J}$  = 139.900.000.000.000 kWh



### Primärenergieverbrauch nach Energieträgern Deutschland 2009

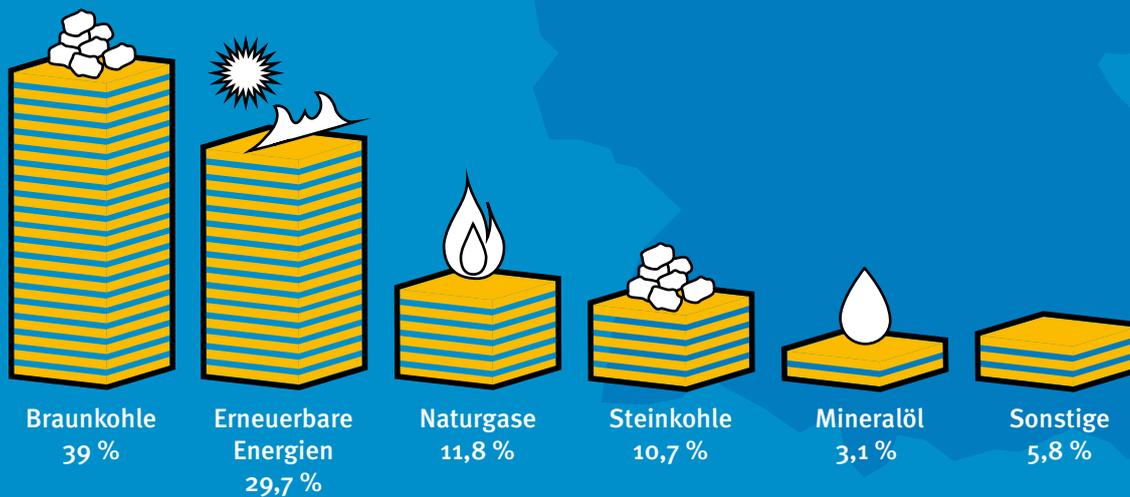
Insgesamt 13,398 Exajoule =  $13,398 \cdot 10^{18} \text{ J}$  = 3.700.000.000.000 kWh



15

### Primärenergiegewinnung nach Energieträgern in Deutschland 2009

Insgesamt 3,913 Exajoule =  $3,913 \cdot 10^{18} \text{ J}$  = 1.100.000.000.000 kWh





16

# Energie unterwegs

**An einem ganz normalen Tag in der Zukunft verlässt ein ganz normaler Berufstätiger morgens das Haus, um zur Arbeit zu fahren. Er betritt die Garage und trennt erst einmal sein Auto von der Ladestation – dieses Auto tankt kein Benzin mehr, es ist ein Elektromobil. Die Batterieanzeige steht auf hundert Prozent, die Fahrt kann beginnen. Fast lautlos bewegt sich das Auto über die Straße, ein Getriebe mit einer Gangschaltung gibt es nicht, der Motor liefert über einen großen Drehzahlbereich die volle Leistung. Nachdem der Fahrer seinen Arbeitsplatz erreicht hat, parkt er sein Auto an einer Stromzapfsäule und schließt es an.**

Dort wird das Auto nun während der Arbeitszeit seines Fahrers in aller Ruhe mit Strom betankt. Das Ladesystem schaltet sich automatisch ab, sobald die Lithium-Ionen-Batterie voll ist, denn sie verträgt weder Überladen noch völliges Entladen. Doch das Ladesystem bleibt wachsam und merkt, wenn sich zur Mittagszeit der Strombedarf in den Haushalten erhöht. Diese Lastspitze wird nun zum Teil von den Batterien der vielen Tausend Autos an den E-Zapfsäulen gedeckt, indem sie

Strom ins Netz einspeisen. Der Inhaber des Autos ist damit nicht nur Verbraucher, sondern auch Lieferant. Der Bordcomputer im Auto registriert dies ebenso wie das Rechenzentrum des Elektrizitätsunternehmens, das den Stromkauf in der Nacht mit dem Verkauf am Tag verrechnet. Das E-Auto ist Teil des intelligenten Stromnetzes.

Bis dieses Szenario eintritt, wird noch viel Zeit vergehen, doch die Autobauer weltweit sind davon überzeugt, dass das Elek-

troauto seinen Siegeszug antreten wird – vielleicht ab 2020. Doch diese kleine Geschichte enthält neben der technischen Vision auch einige interessante Details des heutigen Alltags: Autos sind eigentlich die meiste Zeit über keine Fahrzeuge, sondern „Stehzeuge“: Sie werden in Deutschland am Tag meist weniger als ein bis zwei Stunden genutzt, wobei die durchschnittliche Fahrstrecke bei etwa 34 Kilometer liegt; zwei Drittel aller Fahrten liegen unter 50 Kilometer. Diese Entfernungen legen E-Autos schon heute problemlos mit einer „Tankfüllung“ zurück. Warum haben sie sich bislang nicht durchgesetzt und vor allem, welche Vorteile haben sie überhaupt gegenüber den heutigen benzin-, diesel- oder gasgetriebenen Autos?

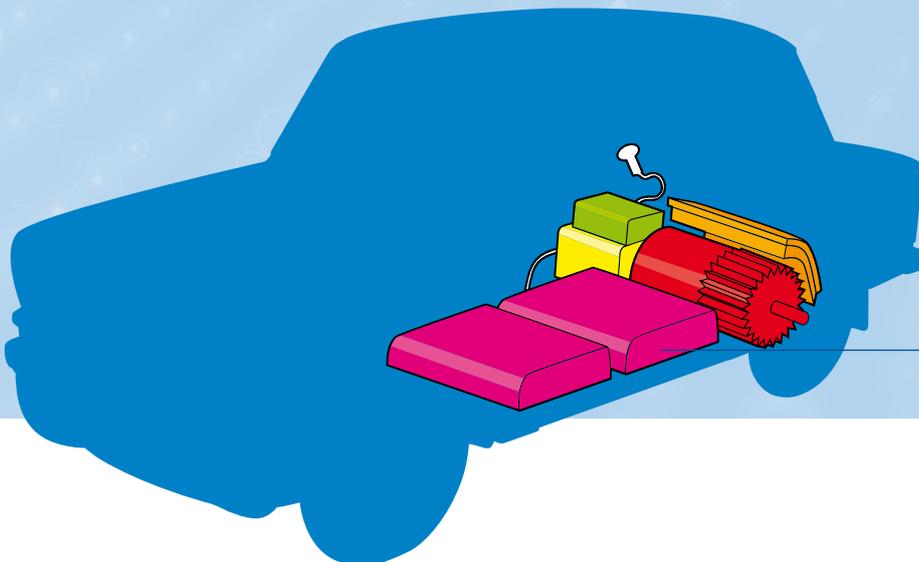
Elektromobile sind „sauberer“ – beim Fahren selbst entstehen keinerlei Abgase. Aus diesem Grund wird ein zunehmender

◀ Statt Benzin von der Tankstelle bekommen Elektroautos ihren „Treibstoff“ entweder wie hier direkt aus der Steckdose oder aber aus einer an Bord befindlichen Brennstoffzelle. (Bild: © Tesla Motors)



► Elektromobilität ist eigentlich ein alter Hut. Schon 1830 wurden Elektromotoren erstmals zur Fortbewegung eingesetzt. Bis zum ersten Weltkrieg dominierten E-Mobile sogar den Straßenverkehr. Die hier abgebildete „Elektrische Viktoria“ von 1905 diente vor allem als elegantes Hoteltaxi. (Bild: Siemens-Pressbild)

► Aufbau eines rein Batterie getriebenen Elektroautos: Über Stecker, Hochvoltleitung (beides weiß) und Ladegerät (grün) werden die Akkus (pink) mit Strom geladen. Dieser fließt während des Fahrens von den Akkus zum Elektromotor (rot), der die Hinterachse und damit das E-Mobil antreibt. Dabei wird das Antriebssystem gekühlt (orange). Wie viel Motorleistung auf die Achse übertragen wird, entscheidet die per Gaspedal gesteuerte Leistungselektronik (gelb). (Grafik: ius)



Anteil von E-Autos die Luftqualität in großen Städten erheblich verbessern. Vor allem Megastädte in aufstrebenden Staaten wie Indien und China würden hiervon stark profitieren.

Auch aus energietechnischer Sicht scheinen die lautlosen Stromer heutigen Autos überlegen. Der Grund ist der hohe Wirkungsgrad von rund 90 Prozent bei Elektromotoren im Vergleich zu höchstens 35 Prozent bei Dieselmotoren. In der Gesamtbilanz sieht es allerdings etwas anders aus. Zum einen verbraucht die Leistungselektronik Strom. Vor allem aber führen die Energieverluste bei der Stromerzeugung im Kraftwerk und beim Stromtransport in den Leitungen zu einem Gesamtwirkungsgrad des E-Autos von rund 36 Prozent – nicht wirklich besser also als ein Dieselfahrzeug. Rechnungen, die zusätzlich noch den Energieaufwand für die

Herstellung der Fahrzeuge berücksichtigen, zeigen, dass von der Wiege bis zum Schrottplatz nach 120.000 km ein heutiges Dieselfahrzeug sogar knapp besser gestellt ist als ein E-Mobil. Doch wie sieht es mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß aus?

Hier ergibt sich folgende Bilanz: Ein E-Auto der Mittelklasse benötigt etwa 0,18 kWh pro Kilometer. Im deutschen Strommix entstehen bei der Bereitstellung dieser Energie knapp 100 Gramm CO<sub>2</sub>. Das ist nur geringfügig weniger als die 120 bis 160 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer des Benzinmotors in einem vergleichbaren Auto. Nur wenn der Strom zukünftig zu einem großen Teil aus erneuerbarer Energie gewonnen wird, würden E-Autos fast ohne CO<sub>2</sub>-Ausstoß fahren.

Bei dem heutigen Strommix bräuchten wir für eine wachsende Anzahl von E-Mobilen

nicht einmal viel mehr Kraftwerke: Würden hierzulande eine Million E-Autos fahren, so stiege der Bedarf an elektrischer Energie lediglich um rund ein halbes Prozent.

### Kraftpakete von morgen

Das derzeit größte Problem bei der Entwicklung von E-Mobilen hat einen physikalischen Hintergrund: Elektrische Energie lässt sich nur schwer speichern. Am effektivsten sind heute Lithium-Ionen-Akkus. Sie besitzen eine Speicherdichte von etwa 0,15 kWh pro Kilogramm Eigengewicht. Das ist jedoch 80-mal weniger als die Energiedichte von Benzin mit etwa 12 kWh pro Kilogramm. Deshalb benötigen heutige E-Autos pro 100 Kilometer Reichweite einen rund 120 Kilogramm schweren „Elektrotank“ plus notwendige technische Geräte, um dessen Energieinhalt zu nutzen.

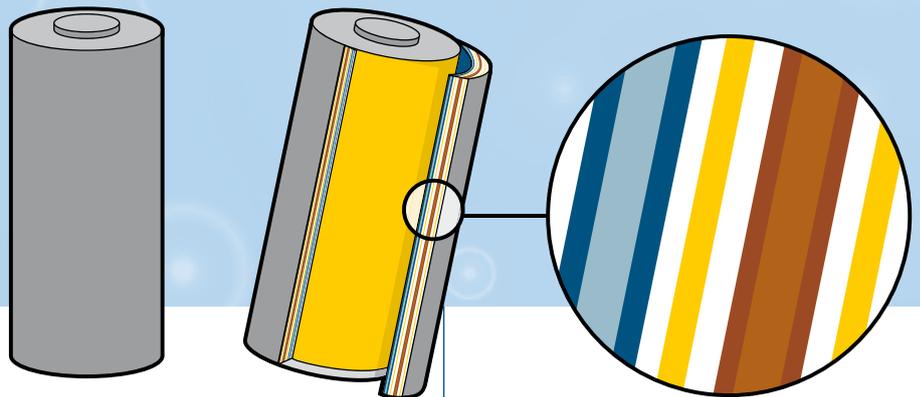


▲ Dreimal flogen Elektroautos mit zum Mond und erleichterten den Raumfahrern die Erkundung des Erdtrabanten. Diese Aufnahme vom 1. August 1971 zeigt den am „Lunar Roving Vehicle“ arbeitenden Astronauten David R. Scott. (Bild: Apollo 15, NASA)

▼ Ingenieure tüfteln auch an ganz neuen Energiespendern wie dieser „Biobatterie“. Sie wandelt Zucker in Elektrizität um. Noch ist die Energieausbeute der würfelförmigen Zellen allerdings eher bescheiden: Vier von ihnen liefern gerade einmal genügend Energie für einen MP3-Players. (Bild: picture-alliance/dpa)



► Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkus: Schichten aus Anode (blau), Separator-membran (gelb) und Kathode (braun) wechseln sich ab. Dabei besteht die Anode aus Kupfer (hellblau) und Graphit (dunkelblau), die Kathode aus Aluminium (hellbraun) und Lithium-Eisenphosphat (dunkelbraun). Die Zwischenräume sind mit flüssigem Elektrolyt (weiß) gefüllt. (Grafik: ius)



18

Bis man mit der im Elektroauto gespeicherten Energie von maximal 18 kWh auch Schwankungen im gesamten Netz ausgleichen kann, muss aber noch einiges geschehen. Beispiel Windpark alpha ventus: Seine zwölf Windräder haben eine Gesamtleistung von 60 MW. Wollte man eine 10-stündige Windflaute – in diesem Zeitraum hätte der Park bei voller Leistung 600 MWh Energie geliefert – allein durch E-Mobile ausgleichen, bräuchte man mehr als 30.000 Fahrzeuge. Und um einen Energiespeicher wie etwa das Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal mit einer Speicherkapazität von 10 GWh ersetzen zu können, wären sogar mehr als eine halbe Millionen E-Mobile nötig. Bis diese auf unseren Straßen unterwegs sind, wird es vermutlich noch eine ganze Weile dauern.

Um dem E-Auto zum Durchbruch zu verhelfen, werden zurzeit große Anstrengungen unternommen, leistungsfähigere Lithium-

ionen-Akkus zu entwickeln. Physikalische Grundlage ist der atomare Aufbau des Elements Lithium. Es steht nach Wasserstoff und Helium auf Platz drei im Periodensystem und ist das leichteste aller Metalle. Außerdem oxidiert es rasch, das heißt, es gibt sehr leicht ein Elektron ab. Aus einem neutralen Lithium-Atom wird so ein positiv geladenes Lithium-Ion und ein Elektron. In einer galvanischen Zelle entsteht dabei eine Spannung von 3,05 Volt. In der elektrochemischen Spannungsreihe ist das Lithium-Ion damit das elektropositivste aller Elemente, was sich in der Freigiebigkeit seiner Elektronen zeigt. Das geringe Atomgewicht und die leichte Elektronenabgabe nutzt man in Lithium-Batterien und -Akkus aus. Theoretisch sind damit die höchsten Batteriespannungen und Energiedichten bis zu 1000 Wh pro Kilogramm erreichbar. Doch auf welche Weise liefert ein Akku überhaupt die nötige Energie etwa für heutige Notebooks oder moderne Elektromobile?

Nehmen wir zunächst einen herkömmlichen Bleiakku. In ihm wird beim Aufladen elektrische Energie in chemische Bindungsenergie umgewandelt. Dabei laufen chemische Reaktionen ab: aus Bleisulfat wird Blei und Bleioxid. Beim Entladen kehrt sich dieser Vorgang um; beide Elektroden werden wieder zu Bleisulfat.

Auch dem **Lithium-Ionen-Akku** wird beim Entladen Strom entnommen, dabei laufen in seinem Inneren jedoch andere Reaktionen ab. Er besteht aus einer Lithium-Metalloxid- und einer Graphit-Elektrode. Eine Separatorfolie trennt die beiden Elektroden, um einen Kurzschluss zu verhindern. Sie befindet sich in einer leitenden, wasserfreien Flüssigkeit (Elektrolyt) und ist nur für die Lithium-Ionen durchlässig.

Wird ein Ladegerät angeschlossen, so werden Elektronen im äußeren Stromkreis in die Graphit-Elektrode „gepumpt“. Die positiv geladenen Lithium-Ionen lösen



◀ Zukunftsvision Speedway in Aktion – ein unter der Fahrbahn verlegter Linearantrieb erzeugt ein wanderndes Magnetfeld, das die Elektrofahrzeuge über die Straße zieht und nebenbei sogar deren Batterien wieder auflädt. (Bild: Speedway - Lumod Designagentur)

## INFO

### Strom aus dem Untergrund

Die noch begrenzte Reichweite ist ein großer Nachteil von Elektrofahrzeugen. Also warum nicht einfach die Energiequelle unter die Fahrbahnen verlegen?

Wie das gehen könnte, zeigt das Straßenbahnpilotprojekt Primove in Augsburg. Physikalische Grundlage ist die Induktion, die kontaktfreie Energieübertragung durch elektromagnetische Felder. Das Prinzip kommt in jedem Trafo oder den Induktionsfeldern moderner Küchenherde zur Anwendung. Die sonst üblichen Kabel der Oberleitungen werden unter der Oberfläche verlegt. Fließt ein Wechselstrom, erzeugt er senkrecht zur Stromrichtung um das Kabel herum ein magnetisches Wechselfeld. Eine unter dem Fahrzeug montierte Spule nimmt dieses Feld auf und wandelt es durch Induktion wieder in elektrischen Wechselstrom um, der den Elektromotor in der Bahn antreibt. Die eingespeiste Leistung kann 100 bis 500 kW (entsprechend 135 bis 670 PS) betragen.

Futuristisch mutet das Projekt Speedway an. Darin wird unter dem Asphalt von Fernstraßen (Speedways) eine Art Spule verlegt, die praktisch den abgewickelten Teil eines Elektromotors bildet. Im Innern des Fahrzeugs befindet sich dessen Gegenpart, der das Auto entlang der elektromagnetischen Wellen über die Straße treibt – wie bei heute bereits in Betrieb befindlichen Magnetschwebbahnen.

In diesem Zukunftsszenario würden E-Mobile im Nahverkehr die Energie aus der eigenen Batterie erhalten, erst auf den Fernstraßen würden sie sich in das elektromagnetische Feld auf der Fahrbahn einklinken.

▼ Durch die PRIMOVE-Technologie könnten Straßenbahnen schon bald ohne Oberleitungen auskommen. Ihre Antriebsenergie bekommen sie über die an Bord installierten Aufnahmespulen direkt aus der Fahrbahn bzw. den dort verlegten Kabeln. Bisher nur auf einem Testgelände in Bautzen unterwegs soll das PRIMOVE-System schon bald auf einem 800 Meter langen Abschnitt zum Augsburger Messegelände eingesetzt werden. (Bild: © Bombardier)



sich aus dem Metalloxidverband und wandern durch den Elektrolyten und den Separator zur Graphit-Elektrode. Dort vereinen sie sich mit den Elektronen und nisten sich in dem schichtförmigen Graphitgitter wie in einem Schwamm ein. Schaltet man den Ladestrom ab, so bleiben die Ionen in ihren „Nestern“ sitzen. Selbst im voll geladenen Zustand existiert zwischen den Elektroden kein elektrisches Feld. Die durch das Ladegerät eingespeiste elektrische Energie wurde in die Energie der neu entstandenen chemischen Verbindungen umgewandelt.

Schließt man nun einen Verbraucher wie einen Elektromotor an, so geben die Lithium-Atome ihre Elektronen wieder her. Sie fließen als Strom im äußeren Kreis beispielsweise durch die Wicklungen des Ankers des Elektromotors und leisten dort über die elektromagnetische Induktion Arbeit. Es wird mechanische Energie erzeugt, das E-Auto fährt. Gleichzeitig wan-

dern in der Zelle die Lithium-Ionen zur anderen Elektrode zurück, verbinden sich dort mit den Metalloxidmolekülen und sammeln die über den äußeren Stromkreis zurückkehrenden Elektronen wieder ein. Sind alle Lithium-Ionen wieder an ihrem Platz, so ist der Lithium-Ionen-Akku entladen.

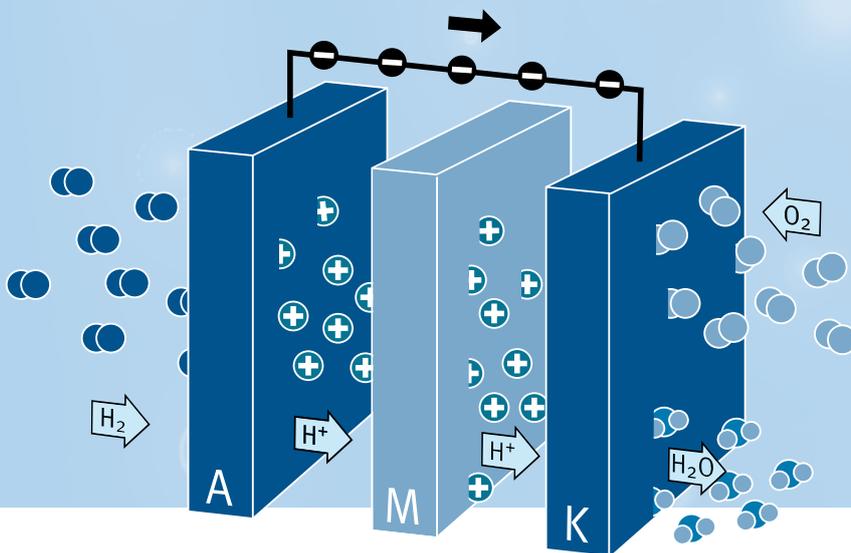
Im Detail spielen sich beim Laden und Entladen noch kompliziertere Reaktionen ab, die von den verwendeten Materialien des Elektrolyts und der beiden Elektroden abhängen. Hier öffnet sich den Forschern in aller Welt noch ein weites Feld, um die Akkus zu verbessern. Dabei geht es vor allem darum, die Energie- und Leistungsdichte zu vergrößern und die Ladedauer zu verringern. Gleichzeitig müssen die Akkus bis zu 4000 Ladezyklen überstehen und in einem weiten Temperaturbereich einsetzbar sein. Bei Kälte verlangsamen sich nämlich die chemischen Prozesse, die Ionen wandern langsamer durch den zäher werdenden Elektrolyt, so dass die



◀ Ein kurzer Stopp an der Schnellladeeinheit und dann geht es weiter – so stellen sich Experten eine mögliche Zukunft vor, in der der gesamte Verkehr rein elektrisch angetrieben wird. (Bild: Siemens Pressebild)

▶ Eine Variante der Brennstoffzellentechnologie ist die DMFC, die „Direct Methanol Fuel Cell“. Sie verwandelt Methanol und Sauerstoff in Wasser,  $\text{CO}_2$  und Elektrizität. Aufgrund ihres geringen Gewichts und Volumens könnte die DMFC z.B. in Handys zum Einsatz kommen. Das Foto zeigt ein Handy mit DMFC und Li-Ionen-Akku, das gerade mit Methanol „betankt“ wird“. (Bild: picture-alliance/dpa)

◀ Funktionsweise einer Brennstoffzelle: An der Anode (A) gibt der Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) Elektronen ab und wandert als Proton ( $\text{H}^+$ ) durch die Membran (M) zur Kathode (K). Bei geschlossenem Stromkreis fließen die Elektronen von der Anode zur Kathode und reagieren hier mit den  $\text{H}^+$  und dem Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) zu Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ). (Grafik: ius)



20

Leistung sinkt. Gängige Elektrolyte können bei Temperaturen unter minus 25 Grad Celsius sogar einfrieren. Dann geht gar nichts mehr. Entweder muss man andere Elektrolyte entwickeln oder die Akkus im tiefen Winter erwärmen.

Haltbarkeit und Speichervermögen sind nicht die einzigen Punkte der Akku-Technologie, an denen heute getüfelt wird. Fest steht: Wirklich durchsetzen können wird sich das Elektromobil erst, wenn die Ladezeiten des Akkus kürzer und die Akkus selbst günstiger werden. Heute kostet ein Akku mit 15 kWh mehr als 12.000 Euro, und ein E-mobil braucht bei 120.000 Kilometer Laufstrecke immerhin mindestens zwei davon.

Damit die Akkus in Zukunft schneller geladen werden können, schwebt den Ingenieuren eine Art elektrische „Druckbetankung“ mit bis zu 300 kW Leistung vor. Damit ließe sich ein Akku wie der oben

beschriebene innerhalb von knapp drei Minuten laden. Das wäre jedoch nur an speziellen Ladestationen möglich, weil dabei ein Strom von 750 Ampere durch die Leitungen rauscht – fast 50-mal mehr als das, was heute durch herkömmliche Leitungen in unseren Häusern maximal fließen darf.

Doch nicht nur die Tankdauer soll sich verkürzen, auch die Strecke zur nächsten Tankstation. Ein engmaschiges Netz mit Ladestationen ist ein wichtiger Eckpfeiler einer [elektromobilen Zukunft](#). Über diese können dann auch später E-Autos Strom ans Netz abgeben, um Schwankungen in der Stromlieferung der Wind- und Sonnenkraftwerke auszugleichen. Damit dies funktioniert, muss sich allerdings auch unser Stromnetz ändern. Um flexibler auf kurzfristige Leistungsschwankungen reagieren zu können, muss aus dem heutigen Netz erst ein intelligentes Netz werden (mehr dazu im Kapitel „Energie lokal“).

### Knallgas ohne Knall

Die Alternative zu einem Akku im Auto könnte eine Brennstoffzelle sein. Sie ist kein Energiespeicher, sondern ein Energiewandler. Brennstoffzellen arbeiten mit einem Effekt, der manchem aus dem Chemieunterricht bekannt sein dürfte: der Knallgasreaktion. Bringt man Wasserstoff und Sauerstoff im Verhältnis 2:1 zusammen und hält eine Flamme in dieses Gemisch, so explodiert es mit einem dumpfen Knall. Übrig bleibt Wasser.

In einer [Brennstoffzelle](#) besteht der Trick darin, die Knallgasreaktion gezügelt und kontrolliert ablaufen zu lassen. Dazu leitet man die beiden Gase getrennt voneinander ins Innere der Zelle und hält sie dort mit einer Membran auf Distanz. Die Wasserstoffatome geben ihre Elektronen ab und können nun durch die Membran hindurch zu ihren Reaktionspartnern wandern. Die Elektronen fließen derweil über



➤ SSPS-Turm (Small Solar Power System) auf der Plataforma Solar de Almería in Spanien. Deutlich zu erkennen ist die auf einen Punkt fokussierte Sonnenstrahlung, die den Reaktor der Pilotanlage auf mehr als 1000 Grad Celsius erhitzt. (Bild: DLR)

◀ Die Raumfahrt nutzte schon früh den Strom aus Brennstoffzellen. Ohne Zellen wie der hier abgebildeten hätte es die Mondlandung 1969 wohl nicht gegeben; herkömmliche Stromlieferanten fielen aufgrund ihrer großen Masse aus. Sogar die „Abgase“ wussten die Astronauten sinnvoll zu nutzen: Sie tranken das Wasser aus den Brennstoffzellen einfach. (Bild: Gina Sanfilippo)



eine Elektrode aus der Brennstoffzelle heraus und bilden einen elektrischen Strom im äußeren Stromkreis, der den Motor des E-Mobils antreibt. Auf der anderen Seite strömen sie über eine weitere Elektrode in den Sauerstofftank hinein, wo sie sich an die Atome anlagern. Diese reagieren mit den eintreffenden Wasserstoff-Ionen zu Wasser. So wird ein Teil der chemischen Reaktionsenergie mit Wirkungsgraden von 35 bis 50 Prozent direkt in elektrische Energie umgewandelt. Alles in allem eine sehr saubere Art der Stromerzeugung.

Allerdings muss der Wasserstoff erst einmal produziert werden, zum Beispiel durch Elektrolyse. Das ist genau der umgekehrte Vorgang zur Knallgasreaktion. Man leitet elektrischen Strom durch Wasser, das ergibt Wasserstoff und Sauerstoff. Für die Aufspaltung von Wasser ist Energie notwendig, entweder in Form elektrischen Stroms oder – Gegenstand aktu-

eller Forschung – in Form des Sonnenlichts in einem Sonnenofen.

Brennstoffzellenautos haben gegenüber Elektroautos einen entscheidenden Vorteil: Sie haben kein Reichweitenproblem. Ein Mittelklassewagen kommt mit 6,5 Kilogramm Wasserstoff (bei einem Druck von 700 Bar) gute 600 Kilometer weit. Außerdem lassen sich die Tanks schneller nachfüllen als Akkus. Allerdings ist das Wasserstoff-Tankstellennetz noch sehr lückenhaft: In Deutschland gibt es bisher nur 27 Stationen.

So gesehen warten sowohl in Sachen Brennstoffzellenautos als auch auf dem Gebiet der rein elektrisch betriebenen Fahrzeuge ähnliche Herausforderungen auf uns: die Weiterentwicklung der Technologie sowie der Ausbau der für den Fahrzeugbetrieb nötigen Infrastruktur.

## INFO

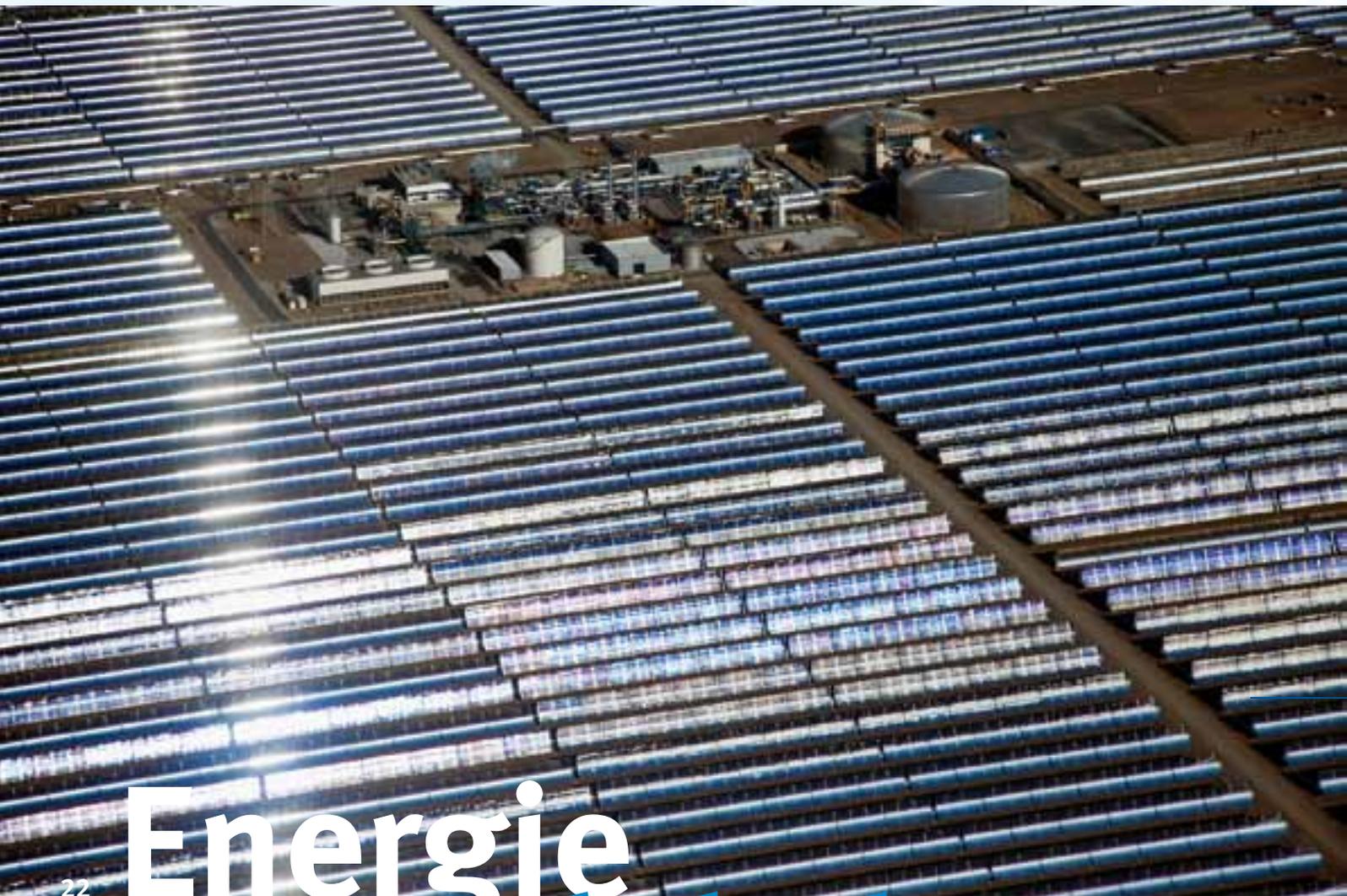
### Wasserstoff aus dem Solarofen

Es wäre ein großer Fortschritt, wenn wir unsere Autos mit Wasserstoff betreiben würden, zum Beispiel in Brennstoffzellen. An dem Grundstoff Wasser gäbe es keinen Mangel, und die Abgase enthielten nur Wasserdampf. Doch wie kann man Wasserstoff aus Wasser gewinnen?

Den klassischen Weg der Elektrolyse hat schon 1866 August Wilhelm Hoffmann beschrieben. Er tauchte zwei Platinelektroden einer Gleichspannungsquelle ins Wasser. Der durch das Wasser fließende Strom spaltet die Wassermoleküle ( $H_2O$ ) in Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) auf. Der Wasserstoff wird an der negativen und der Sauerstoff an der positiven Elektrode als Gas frei, das man einfangen und speichern kann.

Doch die Elektrolyse arbeitet großtechnisch bestenfalls mit 80 Prozent, ein Brennstoffzellenmotor mit 30 Prozent Effizienz. Damit ist der Gesamtwirkungsgrad 24 Prozent – für den mobilen Verkehr eher ein Rückschritt.

Es gibt aber noch andere Wege der Wasserstoffproduktion. Eine davon läuft in der Pilotanlage Hydrosol II auf der südspanischen Plataforma Solar de Almería. Hier konzentrieren Spiegel Sonnenlicht auf einen Reaktor, in dem sich Wasser und ein Gitter aus einem speziellen Metalloxid befinden. Das gebündelte Sonnenlicht erhitzt Wasserdampf bis auf maximal 800 Grad Celsius, der dann mit dem Metalloxid reagiert. Dabei entzieht das Metall den Wassermolekülen den Sauerstoff, der freigesetzte Wasserstoff wird aufgefangen. In einem zweiten Schritt wird das Metallgitter ebenfalls mittels Sonnenlicht bis auf 1300 Grad Celsius erhitzt. Dabei gibt es den Sauerstoff wieder ab und ist für den nächsten Zyklus bereit. Mit der Pilotanlage lassen sich pro Stunde bis zu 1200 Liter Wasserstoff herstellen – noch zu wenig für einen flächendeckenden Betrieb von Wasserstoffautos, aber immerhin ein erster Schritt.



# Energie global

Es ist das Jahr 2050. Wir befinden uns auf einem Flug über Marokko und seinen ausgedehnten Wüstengebieten. Unfern der Mittelmeerküste erblicken wir ein großes Gelände, das im Sonnenlicht glitzert. Je näher wir kommen, desto deutlicher erkennen wir lange Reihen mit rinnenförmigen Spiegeln, die das Sonnenlicht wie mit einem Brennglas auf Röhren konzentrieren und ein darin fließendes, spezielles Öl erhitzen. Ein riesiges solarthermisches Kraftwerk liegt unter uns, in dem das heiße Öl über Zwischenschritte „Solarstrom“ erzeugt. Über das ganze Gebiet verteilte Windräder liefern zusätzliche elektrische Energie.

Dieses Szenario soll einmal Wirklichkeit werden, wenn es nach der im Jahr 2009 ins Leben gerufenen Initiative Desertec geht. Ihr Plan: In den Ländern rund ums Mittelmeer sollen weit über hundert Kraftwerke entstehen, die mit Solar- und Windenergie den Eigenbedarf der lokalen Bevölkerung und zusätzlich 15 bis 20 Prozent des europäischen Stromverbrauchs decken. Für die Kraftwerke benötigte man eine Gesamtfläche von 2500 Quadratkilometern. Das entspricht etwa der Größe

des Saarlandes. Weitere 3600 Quadratkilometer müssten für Hochspannungsleitungen zur Verfügung stehen – wahrlich gigantische Ausmaße.

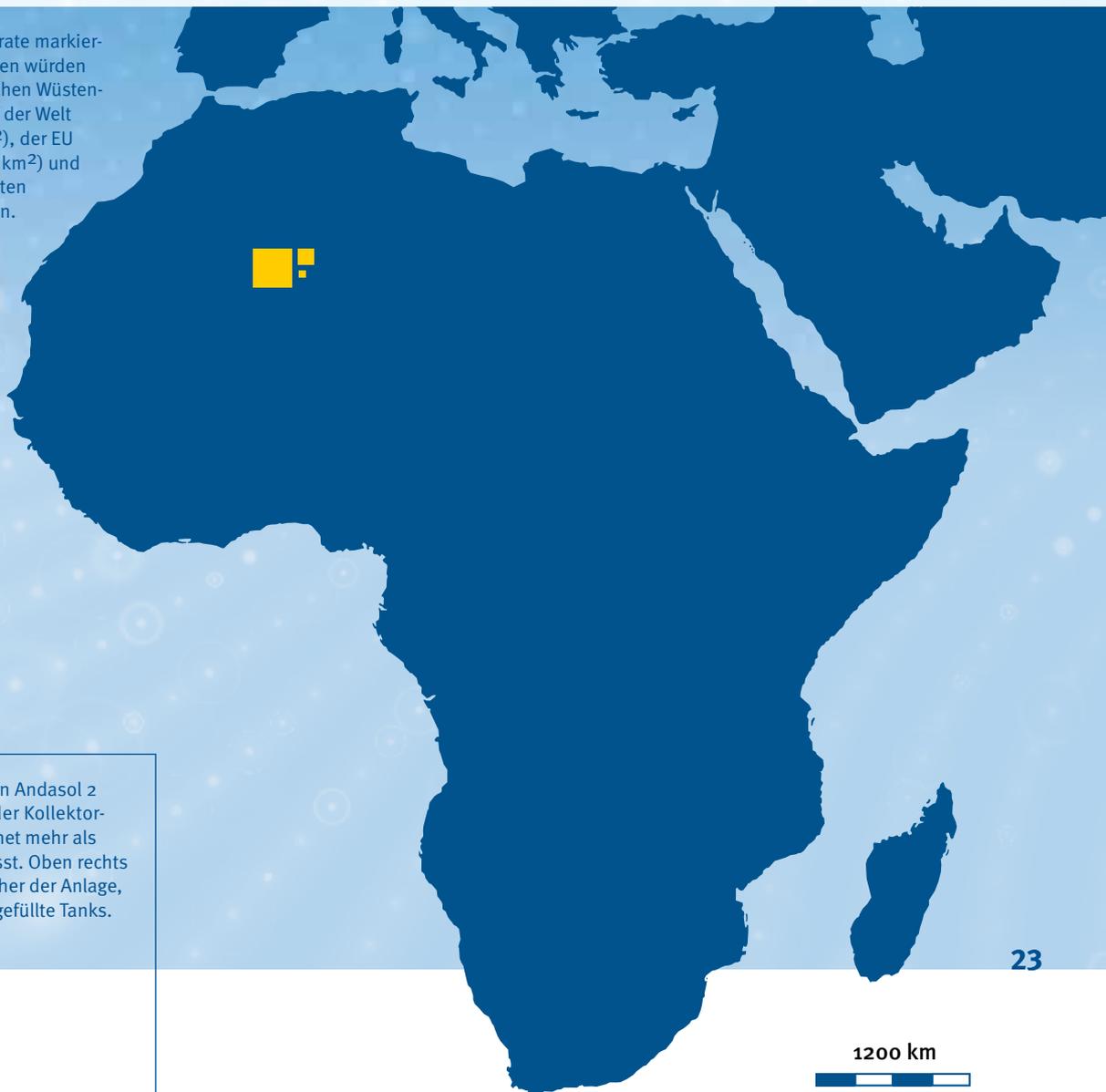
Desertec mutet futuristisch an, doch sind die technischen Voraussetzungen mit „Andasol“ in Andalusien und „Solnova“ bei Sevilla bereits geschaffen. Andasol besteht aus drei baugleichen Anlagen mit jeweils 50 MW Leistung: Andasol 1 erzeugt seit Mitte 2009 regulär Strom,

Andasol 2 befindet sich im Testbetrieb, und Andasol 3 ist noch im Bau. Jedes der Kraftwerke besteht aus rund 210.000 parabolischen Einzelspiegeln, die zu 624 je 150 Meter langen und 5,5 Meter hohen Rinnen gekoppelt sind.

Damit die Sonnenleistung möglichst effektiv genutzt wird, müssen die Spiegel der Sonnenbewegung mit Elektromotoren nachgeführt werden. Bei den Rinnenkollektoren reicht die Drehung um die Längsachse. Die Brennlinie folgt so über Tag der Sonnenhöhe.

Die Sonnenstrahlung wird in der Brennlinie etwa um das 80-fache konzentriert. Hier verlaufen die Absorberrohre, die im Prinzip wie eine doppelwandige Thermoskanne aufgebaut sind. In einem äußeren Glasrohr, durchlässig für das einfallende Sonnenlicht, absorbierend für die reflek-

► Die durch die gelben Quadrate markierten Flächen für Solarkollektoren würden genügen, um in solarthermischen Wüstenkraftwerken den Strombedarf der Welt (großes Quadrat, 90.000 km<sup>2</sup>), der EU (Quadrat oben rechts, 15.625 km<sup>2</sup>) und von Deutschland (Quadrat unten rechts, 3025 km<sup>2</sup>) zu erzeugen. (Grafik: ius)



◀ Diese Luftbildaufnahme von Andasol 2 zeigt nur einen kleinen Teil der Kollektorfläche, die zusammengerechnet mehr als 500.000 Quadratmeter umfasst. Oben rechts erkennt man die Wärmespeicher der Anlage, zwei riesige, mit Spezi­alsalz gefüllte Tanks. (Bild: © Paul-Langrock.de)

tierte Wärmestrahlung, steckt im Vakuum das metallische Absorberrohr. Seine Oberfläche hat eine Spezialbeschichtung, die das Sonnenlicht besonders gut in Wärme umwandelt. Diese erhitzt ein durch das Innere des Rohres fließendes synthetisches Öl auf knapp 400 Grad Celsius.

In einem getrennten Kreislauf erhitzt das Öl über einen Wärmetauscher Wasserdampf und treibt damit eine Turbine mit Generator an, der Strom erzeugt. Der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung auf das Öl im Rohr liegt im Jahresmittel bei etwa 50 Prozent. Bei einem gleichzeitigen Wirkungsgrad der Turbine um 30 Prozent beträgt der mittlere Wirkungsgrad von Andasol also rund 15 Prozent. Das lässt noch viel Raum für weitere Forschung.

So wird zum Beispiel mit anderen Substanzen im Absorberrohr experimentiert.

An Stelle des Öls ist auch geschmolzenes Salz möglich, das sich bis auf 550 Grad Celsius erhitzen lässt und damit einen höheren Wirkungsgrad in der Turbine erzielt. Außerdem besteht die Möglichkeit, Wasser direkt zu verdampfen. Damit erspart man sich den Wärmetauscher. In einem Teil von Andasol 3 soll diese Technik zum Einsatz kommen.

Anders als bei Solarzellen, wo die Strahlungsenergie direkt in Strom umgewandelt wird, erhält man bei der solarthermischen Betriebsvariante von Andasol in einem Zwischenschritt zunächst thermische Energie. Diese lässt sich besser speichern als elektrische Energie. In [Andasol](#) verwendet man als Wärmespeicher zwei riesige Tanks von 14 Metern Höhe und 36 Metern Durchmesser. Sie sind mit einem Spezi­alsalz gefüllt, das abends von der Absorberflüssigkeit er-

wärmt wird und so als Wärmespeicher für die Nacht dient. Mit dieser gespeicherten thermischen Energie kann das Kraftwerk dann bis zu 7,5 Stunden nach Sonnen­untergang noch Strom mit voller Leistung liefern.

Es gibt noch andere Möglichkeiten, solarthermisch Strom zu erzeugen, zum Beispiel in Turmkraftwerken. Hier konzentrieren viele ebene Spiegel das Sonnenlicht auf einen zentral auf einem Turm angebrachten Strahlungsempfänger. Dort wird die Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt, die Turbine und Generator antreibt. Auf diese Weise lassen sich höhere Wirkungsgrade erzielen als mit rinnenförmigen Spiegeln wie denen von Andasol. Die mechanische Steuerung ist jedoch aufwändiger, weil man alle Einzelspiegel in zwei Achsen dem Sonnenstand nachführen muss.



◀ Das Thema Energieversorgung ist auch Stoff vieler Kinofilme. In „Zurück in die Zukunft“ holt sich der zur Zeitmaschine umgebaute Sportwagen die für den Zeitsprung nötigen 1,21 Gigawatt aus einem eigenen kleinen Fusionsreaktor. Während in der Realität Zeitmaschinen noch reine Fiktion sind, wird das erste Fusionskraftwerk vermutlich schon 2019 den Testbetrieb aufnehmen. (Bild: picture-alliance/kpa)

▶ Das deutsche Stromnetz verzweigt sich in mehrere Spannungsebenen. Die „Autobahnen“ des Stroms liegen bei 220.000 und 380.000 Volt (220 und 380 kV). Bei dieser Höchstspannung werden die weiten Strecken quer durchs Land zurückgelegt. Eine Ebene darunter, bei 110 kV, wird der Strom dann beispielsweise an Verbraucher wie den Schienenverkehr abgegeben. Feiner verteilt, etwa an Waren- oder Bürohäuser, wird der Strom bei einer Mittelspannung von 20 kV. Danach folgt die letzte Ebene, auf der die Spannung auf 230 bzw. 400 Volt heruntersetzt wird. So gelangt der Strom schließlich in die Steckdosen unserer Wohnhäuser. (Infografik: Timo Meyer, Melina Diener)



◀ Fresnel-Kollektor auf der Forschungsstation Plataforma Solar de Almeria im spanischen Andalusien. (Bild: DLR)

Eine kostengünstigere Variante könnten Fresnel-Kollektoren sein. Sie nutzen das Prinzip der schon 1822 vom französischen Physiker Jean Fresnel erfundenen Stufenlinse, die man in Leuchttürmen verwendet. Lange Bänder aus ebenen Spiegeln werden unter entsprechenden Winkeln schräg aufgestellt, so dass sie das Sonnenlicht auf ein oberhalb von ihnen aufgehängtes Absorberrohr fokussieren. Ein Sekundärreflektor um das Rohr verstärkt den Effekt. Die Spiegel können aber, weil sie auf dem Boden liegen, nicht optimal der Sonne nachgeführt werden und besitzen deshalb um 15 bis 40 Prozent geringere Wirkungsgrade als Parabolrinnen. Ist genügend Platz vorhanden, könnten Fresnel-Kollektoren dennoch die günstigere Wahl sein.

### Stromautobahn mit 800.000 Volt

Desertec soll bis 2050 rund 100 GW an elektrischer Leistung und eine jährliche

Strommenge von 700.000 GWh liefern. Diese muss mit möglichst geringen Verlusten über Strecken von bis zu 4000 Kilometer hinweg nach Europa transportiert werden. Diesem Problem sehen sich beispielsweise auch die Betreiber von auf hoher See errichteten Windparks gegenüber. Die Standorte regenerativer Großkraftwerke richten sich eben nicht nach dem Verbraucher, sondern nach den besten Windverhältnissen oder den meisten Sonnenstunden.

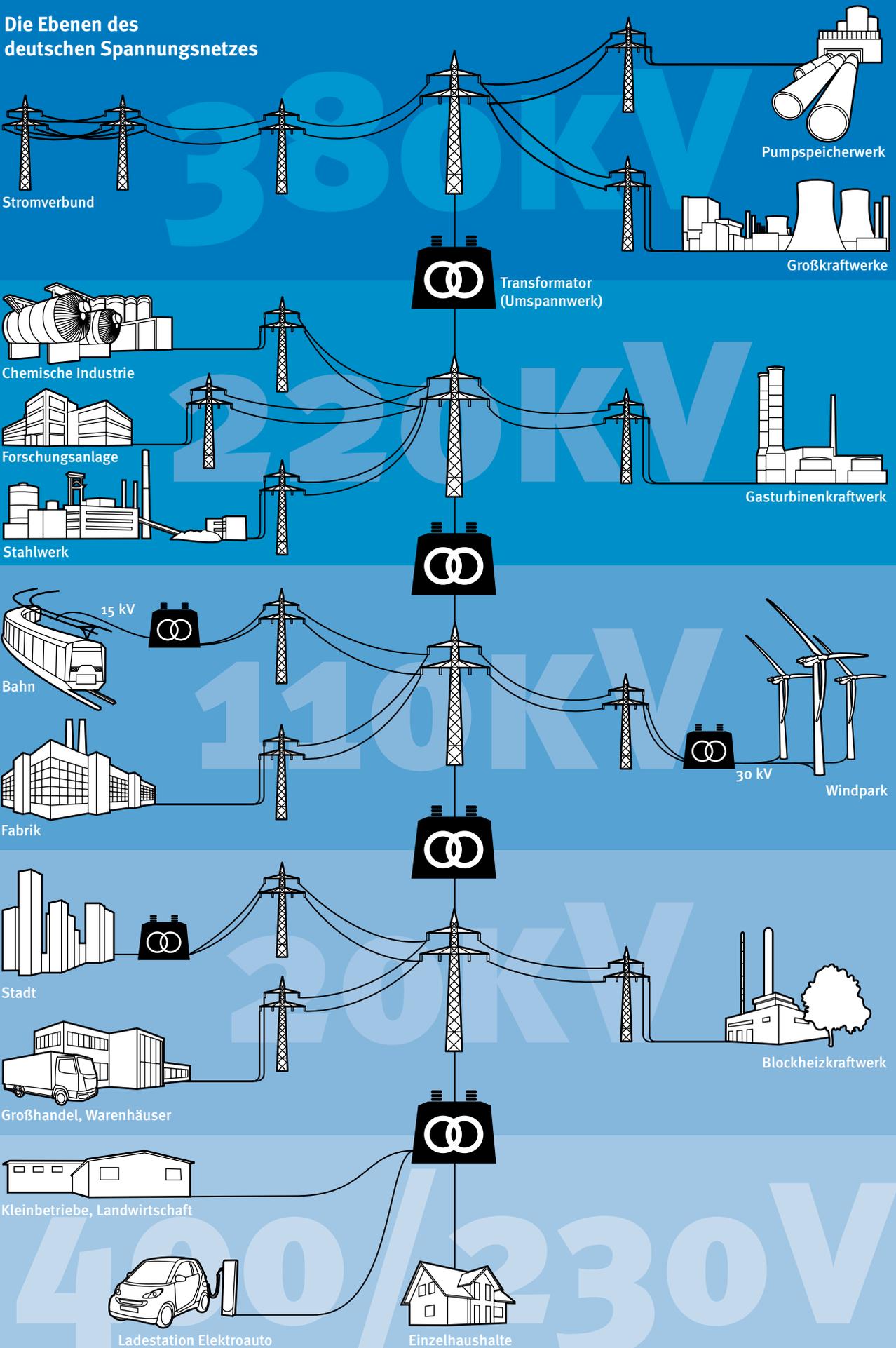
Mit unserer herkömmlichen Wechselstromtechnik und Hochspannungsleitungen mit 220.000 oder 380.000 Volt würde dabei zu viel Energie verloren gehen. Elektrische Leistung ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke. Wenn man also bei gleich bleibender Spannung mehr Leistung übertragen will, muss die Stromstärke steigen. Das erfordert dickere oder mehr parallele Leitungen und damit Kosten. Vor allem aber steigt der Verlust proportional zum

Quadrat der Stromstärke. Damit wird ein immer größerer Anteil der elektrischen Leistung in Wärme umgewandelt und geht verloren. Warum also nicht die elektrische Leistung bei höherer Spannung und somit kleinerer Stromstärke übertragen?

Bei Wechselstrom tritt ein weiterer Verlust auf: unerwünschte Blindleistung. Sie muss von dem Kraftwerk aufgebracht werden, lässt sich aber nicht verwerten. Der Grund ist folgender:

Wechselstromgeneratoren erzeugen in unserem Netz Spannung und Strom, deren Amplitude mit 50 Hertz oszilliert. Beide wechseln also 50-mal pro Sekunde ihr Vorzeichen. Nach der Erzeugung im Generator liegen zunächst Berge und Täler der sinusförmigen Strom- und Spannungskurven genau übereinander: Strom und Spannung sind phasengleich. Würde in den Leitungen nur Widerstand den Stromtransport behindern, so würde sich an der

# Die Ebenen des deutschen Spannungsnetzes





## INFO

### Strom mit Rückenwind

Jeder Kapitän weiß ein Lied davon zu singen: Auf hoher See weht eine steife Brise. Aus physikalischer Sicht bedeutet das: Dort lässt sich die Bewegungsenergie der Luft am besten in elektrische Energie umwandeln. Denn Windleistung ist proportional zur Windgeschwindigkeit in der dritten Potenz: Eine Verdoppelung der Geschwindigkeit bewirkt eine Leistungssteigerung um das Achtfache.

Heute liefern vor den Küsten Dänemarks, Schwedens, Großbritanniens und Irlands die Rotoren solcher Offshore-Anlagen zusammen etwa 600 MW. Der erste deutsche Offshore-Windpark alpha ventus mit zwölf Windrädern der Fünf-Megawattklasse wurde im April 2010 offiziell eingeweiht. Einige der aufgestellten Riesen mussten zwischenzeitlich aufgrund technischer Probleme abgeschaltet werden. Dies zeigt: Das Hochskalieren der Windradtechnik zur Stromerzeugung ist nicht trivial.

Der größte Windpark der Welt, Thanet, steht vor der Küste der englischen Grafschaft Kent. Dort drehen sich 100 Windräder mit einer Gesamtleistung von 300 MW. Weitere, noch weitaus größere Anlagen, sind bereits in Planung.

Bislang werden die Windräder in relativ seichtem Gewässer bis maximal 20 Meter Wassertiefe errichtet. Doch zukünftig soll es noch viel weiter rausgehen. Mit zunehmender Wassertiefe werden die Fundamente und Gründungsstrukturen der Windräder allerdings immer aufwendiger und teurer. Ein Ausweg: die Installation schwimmender Windräder. Eine erste Pilotanlage genannt Hywind wurde im September 2009 vor der norwegischen Küste aufgebaut.

◀ Einige der 80 Windräder des Offshore-Windparks Horns Rev vor der dänischen Küste. (Bild: Vattenfall)

▼ Hier verlegen Arbeiter ein HGÜ-Kabel. (Bild: ABB)



Phasengleichheit nichts ändern. Der zeitlich variierende Wechselstrom baut jedoch um die Leitung herum durch Induktion dauernd ein magnetisches Feld auf und ab, und dies besonders stark, wenn die Leitung im Transformator zu Spulen gewickelt ist. Das führt zu Verlusten durch induktiven Widerstand.

Bei der Übertragung verschieben sich durch diesen induktiven Widerstand Strom und Spannungskurven relativ zueinander. Je länger die Strecke wird und je höher die Spannung ist, desto mehr geraten Strom und Spannung aus dem Takt. Es gibt eine Phasenverschiebung, die eine Blindleistung zur Folge hat. Der Strom läuft der Spannung um den Phasenwinkel 90 Grad nach. Beim Nulldurchgang der Stromkurve hat die Spannungskurve also bereits ihr Maximum. Damit wechselt auch die Leistung ihr Vorzeichen. Sie wird mit der doppelten Frequenz von 100 Hertz zwischen

Erzeuger und Verbraucher hin und her geschoben und lässt sich nicht in mechanische Arbeit umsetzen. Sie vergeudet nutzlos Energie. In der Praxis müssen deshalb in bestimmten Abständen Kondensatorstationen errichtet werden, die diese Phasenverschiebung wieder „zurückrücken“, indem sie eine Phasenverschiebung genau in die entgegengesetzte Richtung bewirken.

Auf den langen Strecken von der Sahara bis nach Europa wäre das zu aufwändig. Deshalb soll die elektrische Energie von dort bei sehr hoher Spannung von 800.000 Volt als Gleichstrom übertragen werden. Diese Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, kurz **HGÜ**, erfordert allerdings zusätzliche Hightech, denn alle Generatoren erzeugen Wechselspannung mit der bei uns üblichen Frequenz von 50 Hertz und die Transformatoren arbeiten nur mit Wechselstrom.

▼ Dieser gigantische 800-Kilovolt-Ultrahochspannungs-Stromrichtertransformator kommt in der HGÜ-Anlage „Yunnan-Guangdong“ in China zum Einsatz, eine der beiden derzeit leistungsstärksten HGÜ-Anlagen der Welt. (Bild: Siemens-Pressesbild)

► Weltweit erstes Osmosekraftwerk im norwegischen Tofte. (Bild: Damian Heinisch / Statkraft)



Es müssen daher hinter dem Generator zunächst einmal **Transformatoren** eingebaut werden, die die Wechselspannung auf 800.000 Volt hoch transformieren. Danach installiert man riesige Gleichrichter, Thyristoren genannt, die aus der Wechselspannung eine Gleichspannung machen. Am Ziel muss umgekehrt die Gleichspannung zunächst wieder in eine Wechselspannung rückgewandelt und anschließend runter transformiert werden, damit wir unsere Geräte wie gewohnt betreiben können.

In der Praxis lohnt sich HGÜ mit Spannungen um 800.000 Volt ab einer Distanz von etwa 800 Kilometern und etwa 1 GW, was der Leistung eines großen Kraftwerks entspricht. Die Technik ist keineswegs neu und wird heute vielfach angewandt. Schon 1882 ging eine Gleichspannungs-Überlandleitung in Oberbayern in Betrieb. Sie war aber nur 57 Kilometer lang und wurde

bei 1400 Volt betrieben. Kein Vergleich zu den gigantischen Werten heutiger Netze.

Den HGÜ-Weltrekord hält seit Mitte 2010 eine fast 1500 Kilometer lange Leitung in China. Sie verbindet etwa ein Dutzend Wasserkraftwerke mit den Metropolen Guangzhou, Hongkong und Shenzhen mit einer Übertragungsleistung von 5 GW. Das entspricht etwa der Leistung von fünf Großkraftwerken. Die Leitungsverluste betragen nur zwei Prozent pro 1000 Kilometer, dazu kommen knapp 1,5 Prozent Verlust für die Konverterstationen auf der Sender- und Empfängerseite. Das zeigt: Die HGÜ ist perfekt geeignet für jene Großkraftwerke von morgen, die weit entfernt, etwa in der Sahara oder auf hoher See, Strom produzieren. Und vielleicht transportieren HGÜ-Kabel bereits in wenigen Jahrzehnten Energie aus Sonne und Wind vom offenen Meer oder sogar von weit entfernten Kontinenten zu uns.



## INFO

### Strom aus dem Meer

Wenn nach dem Regen Tomaten platzen oder Baumwurzeln dem Boden Wasser entziehen ist stets ein und derselbe physikalische Effekt dafür verantwortlich: Osmose. Sie spielt auch bei der Dialyse, der Herstellung von alkoholfreiem Bier und einer neuen Art der Stromgewinnung eine wichtige Rolle. Und dass obwohl die mikroskopische Funktionsweise der Osmose bis heute noch nicht ganz verstanden ist.

Osmose tritt immer auf, wenn eine halbdurchlässige Membran zwei Flüssigkeiten trennt, die Substanzen wie zum Beispiel Salz mit unterschiedlicher Konzentration enthalten. Halbdurchlässig heißt: Die Membran lässt Wasser durch, aber kein Salz. Separiert sie beispielsweise Süß- von Salzwasser, so bewegen sich die Wassermoleküle durch die Membran hindurch in das Salzwasser. Der Grund: Der Konzentrationsunterschied zwischen den beiden Flüssigkeiten kann aufgrund der Membran nicht durch das Salz, sondern nur durch das Wasser ausgeglichen werden. Durch diesen Diffusionsprozess baut sich auf der Salzwasserseite der sogenannte osmotische Druck auf. Dieser lässt sich nutzen, um eine Turbine anzutreiben, die über einen Generator Strom erzeugt. Solche Osmosekraftwerke können theoretisch überall gebaut werden, wo Flüsse ins Meer münden.

Mitte der 1970er Jahre kamen Forscher auf die Idee, die Osmose zur Energiegewinnung zu nutzen. Ende 2009 ging im norwegischen Oslofjord die weltweit erste Pilotanlage eines Osmosekraftwerks in Betrieb. Diese ist für 10 kW ausgelegt. Für 2015 plant man eine größere Variante: ein 25-MW-Kraftwerk mit insgesamt 5 Millionen Quadratmetern Membranfläche.

Das weltweite Potenzial dieser Technik wird auf bis zu 1700 TWh geschätzt. Das entspricht der Hälfte der Stromerzeugung in der EU.



Veranstalter



Partner



Klaus Tschira Stiftung  
Gemeinnützige GmbH



Medienpartner

**Augsburger Allgemeine**  
Alles was uns bewegt

Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft 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 erscheint zu den „Highlights der Physik 2010: Gigawatt“ (Augsburg, 9.10. – 14.10.2010), Infos: [www.physik-highlights.de](http://www.physik-highlights.de)

Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung

Wissenschaftsjahr 2010

**Die Zukunft der  
Energie**