



## Plan für eine **EMISSIONSFREIE** **WELT** bis 2030

### In Kürze

- ▶ Wind, Sonne und Wasser liefern an zugänglichen Standorten weit mehr als **ausreichend Energie** für die gesamte Erdbevölkerung.
- ▶ Die Autoren haben einen Plan zur Umstellung des weltweiten Energiesystems auf **regenerative Quellen** bis 2030 entwickelt. Er sieht 3,8 Millionen Windturbinen, 90 000 große Solaranlagen, zahlreiche Erdwärme-, Wasser- und Gezeitenkraftwerke sowie Fotovoltaikmodule auf allen dafür geeigneten Dächern vor.
- ▶ Schon im Jahr 2020 würde derart erzeugte Energie einschließlich ihres Transports zu den Verbrauchern **weniger kosten** als die veranschlagten 5,5 Eurocents pro Kilowattstunde bei herkömmlichen Kraftwerken.
- ▶ Als größtes Hindernis erscheint der **mangelnde politische Wille**; allerdings könnte es auch bei einigen speziellen Rohstoffen wie Lithium für die Batterien von Elektrofahrzeugen Engpässe geben.

Wind, Wasser und Sonne könnten schon in 20 Jahren den gesamten Energiebedarf der Erde decken und fossile Brennstoffe komplett überflüssig machen. Hier erfahren Sie, wie das ginge.

Von Mark Z. Jacobson und  
Mark A. DeLucchi

**D**iesen Monat treffen sich in Kopenhagen Staatsoberhäupter aus der ganzen Welt, um Zielvorgaben zur Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen in den kommenden Jahrzehnten zu beschließen. Eine solche Reduktion lässt sich ohne deutliche Verlagerung des Gewichts von den fossilen Brennstoffen hin zu sauberen, erneuerbaren Energiequellen wohl kaum erreichen. Wenn die in Kopenhagen versammelten Politiker darauf vertrauen können, dass das machbar ist, ringen sie sich vielleicht zu einer historischen Übereinkunft durch. Wir möchten zeigen, dass dieses Vertrauen gerechtfertigt ist.

Vor einem Jahr formulierte der einstige Vizepräsident der USA und Friedensnobelpreisträger, Al Gore, ein visionäres Ziel: Amerika innerhalb von zehn Jahren komplett auf kohlenstofffreien Strom umzustellen. Als wir zu prüfen begannen, ob das machbar wäre, hatten wir die Idee, uns einer noch größeren Herausforderung zu stellen. Wir wollten herausfinden, wie der weltweite Energiebedarf bis zum Jahr 2030 vollständig aus Wind, Wasser und Sonnenenergie gewonnen werden könnte. Hier präsentieren wir den von uns entwickelten Plan.

Erst unlängst klassifizierte eine Studie der Stanford University die verschiedenen Energiesysteme nach Umweltkriterien wie Auswirkungen auf Erderwärmung, Luftverschmutzung, Wasserversorgung, Landverbrauch oder Tierwelt. Kraftwerke auf der Basis von Wind, Wasser und Sonne (WWS) sowie Erdwärme schnitten am besten ab. Kernenergie, Kohle mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Äthanol erwiesen sich als schlechtere Optionen, gefolgt von Erdgas und Öl. Die Untersuchung bestätigte außerdem, dass elektrisch oder mit Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge, wenn sie auf WWS-Basis wieder aufgeladen beziehungsweise betankt werden, die Luftverschmutzung im Transportsektor praktisch beseitigen.

Unser Plan sieht deshalb Millionen Windturbinen, Erdwärme-, Wasser- und Gezeitenkraftwerke sowie Solaranlagen vor. Die Zahlen mögen hoch erscheinen, bedeuten aber keine unüberwindliche Hürde; die Menschheit hat schon Herausforderungen ähnlichen Kalibers gemeistert. So rüsteten die Vereinigten Staaten im Zweiten Weltkrieg Autofabriken um und produzierten damit 300 000 Flugzeuge; andere Länder steuerten weitere 486 000 bei. 1956 begannen die USA mit dem Bau der Interstate Highways. Das Netz dieser Autobahnen war nach 35 Jahren auf 47 000 Meilen (76 000 Kilometer) angewachsen und hatte Handel und Gesellschaft grundlegend verändert.

Ist ein Umbau der weltweiten Energiesysteme möglich? Lässt er sich in nur zwei Jahrzehnten bewerkstelligen? Die Antwort hängt davon ab, ob die nötigen Technologien zur Verfügung stehen und wichtige Grundstoffe vorhanden sind. Aber auch wirtschaftliche und politische Faktoren gilt es zu berücksichtigen.

## NUR SAUBERE TECHNOLOGIEN

Erneuerbare Energie lässt sich aus drei Quellen gewinnen:

- Wind und den von ihm hervorgerufenen Wellen,
- Wasser in Form von Wasserkraft, Gezeitenströmung und Erdwärme (wenn Wasser von heißem unterirdischem Gestein erwärmt wird) und
- Sonnenlicht, das entweder mittels Fotovoltaik direkt in Strom umgewandelt wird oder bei der Solarthermie dazu dient, eine Flüssigkeit zu erhitzen, die dann eine Turbine antreibt.

Wir berücksichtigen nur Technologien, die heute schon im industriellen Maßstab nutzbar sind oder zumindest an der Schwelle dazu stehen, und keine, die es vielleicht erst in 20 oder 30 Jahren gibt.

Um zu gewährleisten, dass unser Energiesystem auch sauber ist, ziehen wir ausschließlich solche Quellen in Betracht, die auf jeder Stufe ihrer Nutzung – also auch bei der Konstruktion oder Stilllegung der benötigten Anlagen – nur minimale Mengen an Treibhausgasen oder Schadstoffen freisetzen. Dadurch scheidet Äthanol zum Beispiel aus; auch wenn er ökologisch noch so verträglich ist, verschmutzt er bei der Verbrennung in Motoren die Luft genauso wie Benzin, was dieselbe Sterblichkeitsrate bedingt.

Kernenergie verursacht im Betrieb zwar keine Kohlendioxidemissionen, wohl aber beim Bau des Reaktors sowie bei der Anreicherung und dem Transport des Urans. Hinzu kommen die ungelöste Entsorgung der radioaktiven Abfälle und das Terrorismusrisiko. Zudem ist Kernkraft nicht erneuerbar.

Dasselbe gilt für Kohle, auch wenn es sie noch reichlich gibt. Obwohl Kohlenstoffabscheidung und -speicherung in Kohlekraftwerken die Emission von Kohlendioxid verringern, erhöhen sie die Luftverschmutzung und verstärken die schädlichen Effekte von Abbau, Transport und Verarbeitung der Kohle; denn es muss mehr davon verbrannt werden, um die Energieverluste durch das Verfahren auszugleichen.

Gemäß unserem Plan liefern Wind, Wasser und Sonnenlicht auch elektrische Energie für Heizungs- und Transportsysteme. Beide nut-



zen bisher – mit Ausnahme des Schienenverkehrs – ganz überwiegend fossile Brennstoffe. Sie müssen jedoch auf eine neue Grundlage gestellt werden, wenn die Chance bestehen soll, den Klimawandel zu verlangsamen. Elektroöfen gibt es heute schon. Bei Fahrzeugen haben alle großen Hersteller inzwischen Prototypen entwickelt, die von Batterien oder Brennstoffzellen angetrieben werden. Wasserstoff aus der Elektrolyse (Spaltung) von Wasser mit WWS-Strom müsste künftig eine zentrale Rolle spielen. Er würde nicht nur in Brennstoffzellen Strom erzeugen, sondern auch das Kerosin als Treibstoff für Flugzeuge ersetzen und für Heizzwecke in der Industrie dienen.

**Wind-, Wasser- und Solarkraft sind die Säulen eines nachhaltigen und umweltfreundlichen Energiesystems, das bis 2030 den kompletten weltweiten Energiebedarf decken könnte.**

## MEHR ALS GENUG ENERGIE

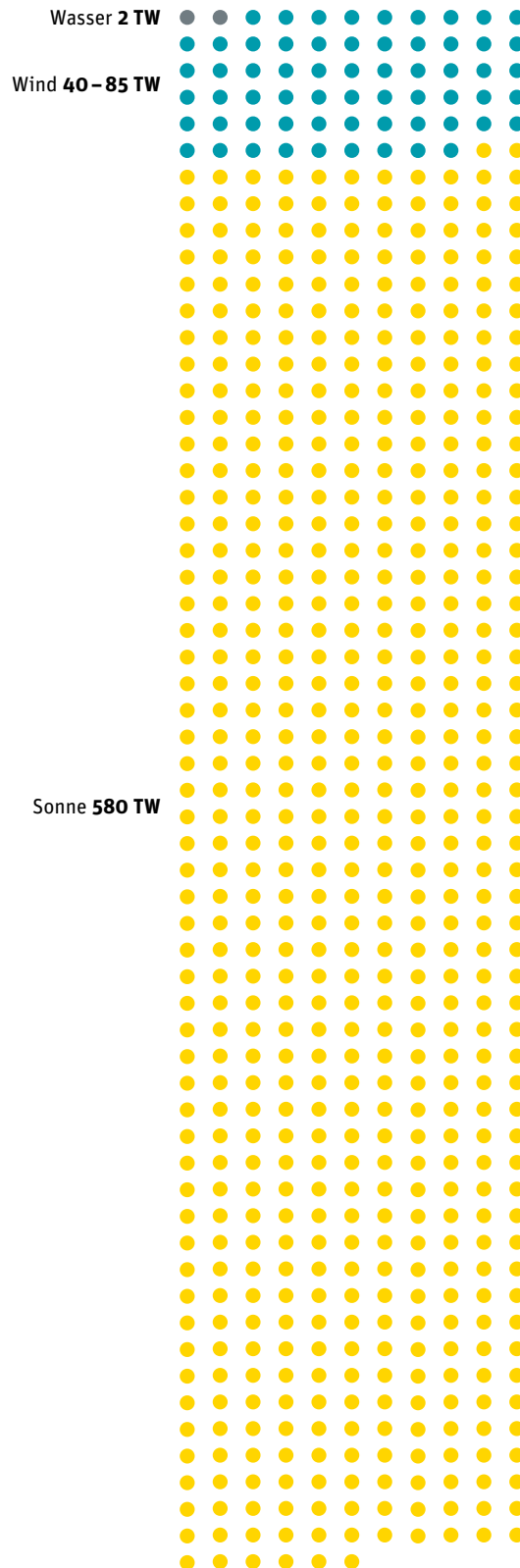
Nach Berechnungen der U. S. Energy Information Administration beträgt der weltweite Energieverbrauch heute in der Spitze 12,5 Billionen Watt oder Terawatt (TW). Die Behörde prognostiziert bis 2030 einen Anstieg auf 16,9 TW, weil Weltbevölkerung und Lebensstandard zunehmen werden. Dabei unterstellt sie einen Energiemix, in dem wie heute fossile Brennstoffe dominieren. Würde die Erde aber vollständig mit WWS-Energie versorgt und auch keine Biomasse verfeuert, ergäben sich erhebliche Einsparungen. Der weltweite Energiebedarf säne auf 11,5 TW, und derjenige der USA betrüge 1,8 statt 2,8 TW.

Der Grund dafür ist, dass Elektrizität in den meisten Fällen einen höheren Wirkungsgrad hat als jede andere Energieform. So wird im Auto maximal ein Fünftel der chemischen Energie im Benzin zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt und der Rest als Wärme verschwendet. Ein Elektrofahrzeug setzt dagegen 75 bis 86 Prozent des Stroms in Bewegung um.

Selbst wenn der Energiebedarf auf 16,9 TW steigen sollte, könnten Wind, Wasser und Sonne weit mehr als das liefern. Nach eingehenden Untersuchungen von uns und anderen Forschern beträgt allein die weltweit verfügbare Windenergie 1700 TW. Bei der Solarenergie sind es sogar 6500 TW. Natürlich lassen sich Wind und Sonne über dem Meer, im Hochgebirge und in Naturschutzgebieten nicht nutzen. Ohne diese Regionen und Areale mit geringem Windaufkommen, deren Erschließung nicht lohnt, bleiben aber immer noch zwischen 40 und 85 TW an Wind- und 580 TW an Sonnenenergie. Beides übersteigt den künftigen Energiebedarf der Erdbevölkerung bei Weitem. Derzeit erzeugen wir nur 0,02 TW an Wind- und 0,008 TW an Sonnenenergie. Beide Quellen besitzen also ein riesiges ungenutztes Potenzial.

Die anderen WWS-Technologien könnten nur einen kleineren Beitrag leisten und für Flexibilität sorgen. Zum Beispiel wird der Einsatz der Wellenkraft dadurch beschränkt, dass sie aus praktischen Gründen nur in Küstenregionen nutzbar ist. Erdwärmequellen wiederum liegen oft zu tief, um sich wirtschaftlich anzapfen zu lassen. Auch wenn die Wasserkraft heute noch alle anderen WWS-Energien in den Schatten stellt, ist es mangels geeigneter Standorte für große Stauseen nicht möglich, sie sehr viel stärker auszubauen.

## VERFÜGBARE ERNEUERBARE ENERGIE AN ZUGÄNGLICHEN STANDORTEN



## WELTWEITER ENERGIEBEDARF BIS 2030



### ODER



MW – Megawatt = 1 Million Watt  
 GW – Gigawatt = 1 Milliarde Watt  
 TW – Terawatt = 1 Billion Watt



## ZU INSTALLIERENDE LEISTUNG FÜR DIE VERSORGUNG DER WELT MIT ERNEUERBARER ENERGIE

Wasserkraft **1,1 TW**  
(9 Prozent Anteil)

**490 000**

Gezeitenturbinen – **1 MW\*** –  
< 1 Prozent vorhanden  
\* NENNLEISTUNG EINER ANLAGE

**5350**

Erdwärmekraftwerke – **100 MW** –  
2 Prozent vorhanden

**900**

Wasserkraftwerke – **1300 MW** –  
70 Prozent vorhanden

**3 800 000**

Windturbinen – **5 MW** –  
1 Prozent vorhanden

**720 000**

Wellenkonverter – **0,75 MW** –  
< 1 Prozent vorhanden

**1700 000 000 000**

Fotovoltaikanlagen auf Dächern\* – **3 KW** –  
< 1 Prozent vorhanden

\* FÜR EIN NORMALES HAUS; AUF FABRIKDÄCHERN HÄTTEN DUTZENDE SOLCHER ANLAGEN PLATZ

**49 000**

Solarthermiekraftwerke – **300 MW** –  
< 1 Prozent vorhanden

**40 000**

Fotovoltaikkraftwerke – **300 MW** –  
< 1 Prozent vorhanden

Windkraft **5,8 TW**  
(51 Prozent Anteil)

Solkraft **4,6 TW**  
(40 Prozent Anteil)

## DIE ENERGIE-INFRASTRUKTUR DER ZUKUNFT

An erneuerbarer Energie herrscht also kein Mangel. Aber wie erreicht man, dass sie 11,5 TW für die Welt im Jahr 2030 liefert? Welche neue Infrastruktur könnte das leisten? Wir haben uns für einen Technologiemarkt entschieden, bei dem Wasser nur ungefähr neun Prozent des Bedarfs deckt. Das geschieht mit 900 Wasserkraftwerken weltweit, von denen 70 Prozent schon existieren. Die Windkraft kommt für 51 Prozent des Bedarfs auf. Dazu müssen 3,8 Millionen Anlagen weltweit installiert werden, jede mit einer Kapazität von fünf Megawatt (MW). Das hört sich nach ungeheuer viel an, doch sei daran erinnert, dass derzeit Jahr für Jahr rund um den Globus 73 Millionen Automobile und Kleinlaster gebaut werden. Nur 0,8 Prozent der projektierten Windkraftanlagen sind derzeit in Betrieb.

Rund 40 Prozent der benötigten Energie schließlich steuern Fotovoltaik und Solarthermie bei. Davon sollen 30 Prozent über Kleinanlagen auf den Dächern von Häusern und Bürogebäuden produziert werden. Daneben bräuchte man ungefähr 90 000 Fotovoltaik- und Solarthermiekraftwerke mit einer durchschnittlichen Kapazität von 300 MW je Anlage.

Die 3,8 Millionen Windturbinen würden insgesamt nur eine Fläche von knapp 50 Quadratkilometern einnehmen (das Stadtgebiet von Stuttgart ist mehr als viermal so groß). Zählt man den erforderlichen Abstand zwischen ihnen hinzu, dürften sie immer noch weniger als ein Prozent der Landfläche der Erde beanspruchen; der freie Raum zwischen den Turbinen ließe sich zudem für Landwirtschaft oder Viehhaltung nutzen. Offshore-Anlagen könnten den Platzbedarf weiter verringern. Fotovoltaik- und Solarthermiekraftwerke würden weniger als 0,33 Prozent der irdischen Landfläche benötigen.

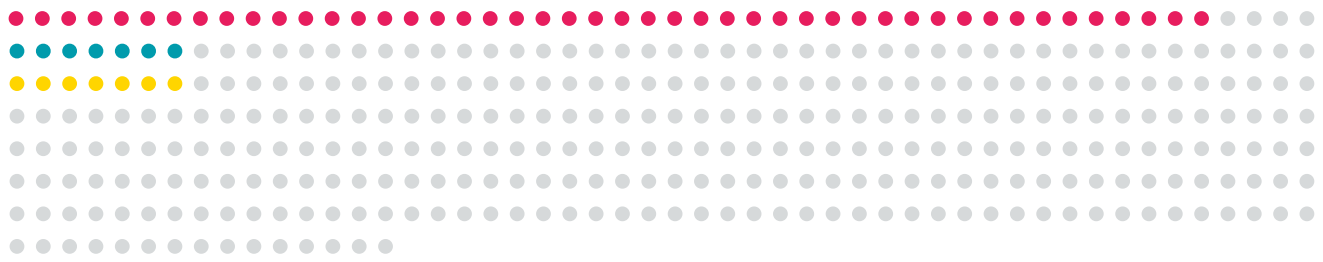
Zur Erinnerung: Wenn wir an den fossilen Brennstoffen festhalten, steigt der Energiebedarf bis 2030 auf 16,9 TW. Dafür bräuchten wir 13 000 neue, große Kohlekraftwerke. Diese würden weit mehr Land beanspruchen als unser WWS-System, von den Bergwerken für den Abbau der benötigten Kohle ganz abgesehen.



GETTY IMAGES / NICHOLAS EVELEIGH

## DURCHSCHNITTLICHE ABSCHALTZEITEN FÜR INSTANDHALTUNG UND REPARATUREN

Tage im Jahr



● Kohlekraftwerk 12,5 Prozent (46 Tage)      ● Windturbine 2 Prozent (7 Tage)      ● Fotovoltaikanlage 2 Prozent (7 Tage)

In Sachen **Zuverlässigkeit** stehen **Wind-, Solar- und Wasserkraft** herkömmlichen Energiesystemen keineswegs nach

### DIE FRAGE DER ZUVERLÄSSIGKEIT

Eine neue Infrastruktur muss mindestens so zuverlässig Energie liefern wie die jetzige. WWS-Technologien brauchen da jedoch keinen Vergleich zu scheuen: Ihre Auszeiten sind sogar geringer als bei herkömmlichen Systemen. Kohlekraftwerke gehen wegen planmäßiger Wartungsarbeiten und notwendiger Reparaturen im Durchschnitt 12,5 Prozent des Jahres vom Netz. Bei modernen Windturbinen beträgt die Stillstandzeit dagegen nicht einmal zwei Prozent an Land und unter fünf Prozent auf See. Auch Fotovoltaik-Anlagen sind weniger als zwei Prozent des Jahres wegen Instandhaltung oder Ausfällen außer Betrieb. Zudem betrifft die Abschaltung eines einzelnen Wind-, Wasser- oder Solarkraftwerks nur einen kleinen Teil der Produktion. Wenn hingegen ein Kohle-, Kern- oder Erdgaskraftwerk vom Netz geht, bedeutet das einen großen Ausfall bei der Stromproduktion.

Das Hauptproblem für WWS besteht darin, dass am Standort einer Anlage der Wind nicht immer weht und die Sonne nicht immer scheint. Daraus resultierende Unterbrechungen lassen sich aber durch ein geschicktes

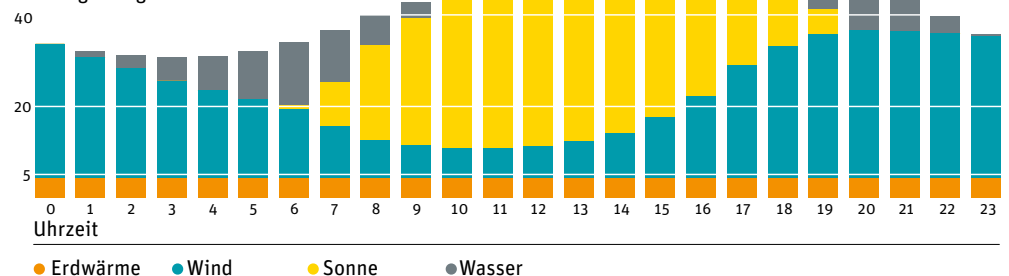
Austarieren der Ressourcen abfangen. Zum Beispiel kann man eine Basisversorgung mit Erdwärme oder Gezeitenenergie sichern; nachts liefert der Wind, der dann meist stärker weht, den Löwenanteil und tagsüber die Sonne. Eine verlässliche Quelle wie die Wasserkraft, die sich schnell an- und abschalten lässt, gleicht Versorgungslücken aus oder deckt Bedarfsspitzen ab. Weil der Wind gewöhnlich bei schlechtem Wetter weht, wenn sich die Sonne nicht blicken lässt, und die Sonne in der Regel an ruhigen Tagen scheint, wenn sich kaum ein Lüftchen regt, sollten beide Energieformen kombiniert werden.

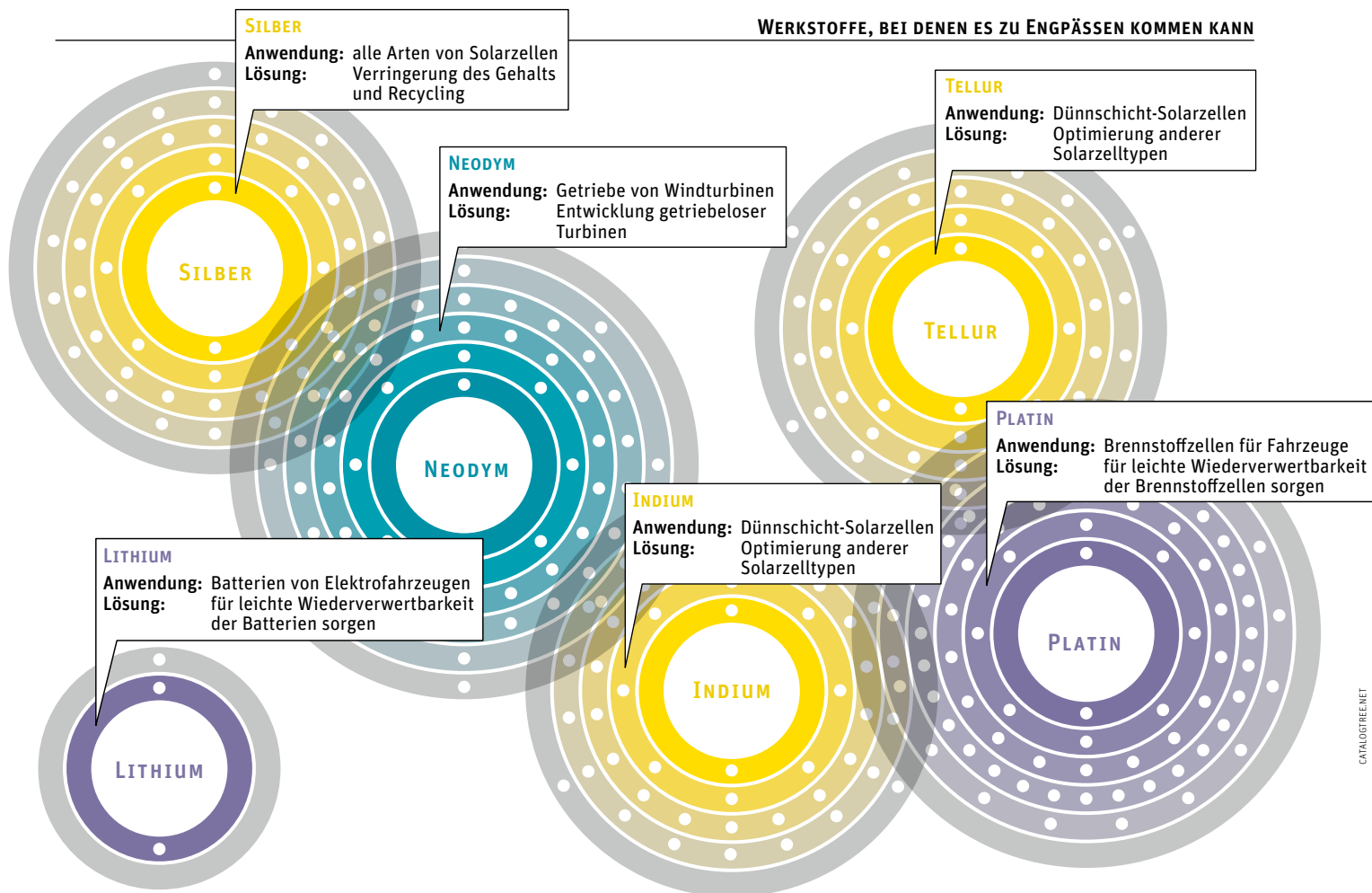
Sinnvoll ist auch die Verbindung geografisch getrennter Kraftwerke, damit sie einander aushelfen können, wenn bei einem Flaute herrscht oder Wolken den Himmel bedecken. Desgleichen wäre der Bau von Systemen möglich, die Energie zu späterer Verwendung zwischenspeichern. In Wohnhäusern ließen sich intelligente Stromzähler installieren, über die zum Beispiel Elektrofahrzeuge automatisch aufgeladen werden, sobald die Stromentnahme aus dem Netz niedrig ist.

### SAUBERER STROM RUND UM DIE UHR

Als Beispiel für die mögliche komplette Umstellung auf erneuerbare Energien zeigte Graeme Hoste von der Stanford University kürzlich, wie sich Kalifornien im Jahr 2020 an einem typischen Julitag mit einer Kombination von vier Energiearten zu 100 Prozent mit Strom versorgen ließe. Die nötigen Wasserkraftwerke existieren heute schon.

Leistung in Gigawatt





## REICHEN DIE ROHSTOFFE?

Die Dimensionen der WWS-Infrastruktur bilden also kein unüberwindliches Hindernis. Doch zu ihrer Errichtung braucht es Werkstoffe, und die könnten knapp werden oder Preismanipulationen unterliegen.

Für die Millionen Windkraftanlagen gibt es ausreichend Stahl und Beton, zumal beide Stoffe vollständig wiederverwertbar sind. Am kritischsten erscheinen Seltenerdmetalle wie Neodym, das in den Getrieben der Turbinen verwendet wird. Sie sind zwar nicht wirklich knapp, doch liegen die meisten preiswerten Vorkommen in China, so dass der Westen statt von Öl aus dem Nahen eventuell von Metallen aus dem Fernen Osten abhängig wird. Die Hersteller von Windkraftanlagen forschen jedoch bereits an Turbinen ohne Getriebe.

Fotovoltaik-Zellen bestehen aus Silizium, Kadmiumtellurid oder Kupferindiumselenid und -sulfid. Begrenzte Vorkommen von Tellur und Indium könnten sich auf einige Typen von Dünnschicht-Solarzellen negativ auswirken, jedoch nicht auf alle; mit den anderen ließe sich die Lücke schließen. Zu einem Engpass für die Massenproduktion von Solarzellen führt möglicherweise auch das erforderliche Silber; doch sollte es möglich sein, den Anteil dieses Edelmetalls zu verringern. Außerdem ließen sich Materialprobleme durch die Wiederverwertung von Bestandteilen alter Zellen entschärfen.

Wenn Millionen von Elektrofahrzeugen gebaut werden, gibt es bei drei Komponenten möglicherweise Schwierigkeiten: Seltenerdmetallen für die Elektromotoren, Lithium für die Batterien und Platin für die Brennstoffzellen. Mehr als die Hälfte der gewinnbaren Lithiumvorkommen weltweit befinden sich in Bolivien und Chile. Die Konzentration auf zwei Länder könnte, zusammen mit der schnell wachsenden Nachfrage, den Preis in die Höhe treiben. Schwerer noch wiegt die Behauptung der Beratungsfirma Meridian International Research in Martainville (Frankreich), dass es nicht annähernd genug wirtschaftlich gewinnbares Lithium für all die Batterien gebe, die bei einer Umstellung der weltweiten Autoflotte auf Elektrobetrieb gebraucht würden. Dem ließe sich durch Recycling begegnen; dafür müssen die Batterien allerdings für leichte Wiederverwertbarkeit ausgelegt sein – eine Problematik, der sich die Industrie durchaus bewusst ist.

Auch der Einsatz von Platin über längere Zeit hinweg funktioniert nicht ohne Recycling; die derzeit verfügbaren Reserven, wenn man andere gebräuchliche Verwendungen in der Industrie berücksichtigt, würden zwar eine Jahresproduktion von 20 Millionen Fahrzeugen mit Brennstoffzellen erlauben, aber nur noch für knapp 100 Jahre.

Versorgungsschwierigkeiten bei **knappen Rohstoffen** wie Seltenerdmetallen, Lithium und Platin ließe sich mit **Recycling** begegnen

### BILLIG WIE KOHLE

Der Mix aus WWS-Energien in unserem Plan kann demnach Wohnungen, Handel, Industrie und den Transportsektor zuverlässig versorgen. Doch ist das alles auch bezahlbar? Um das zu ermitteln, haben wir für jede Technologie errechnet, wie teuer es wäre, Strom damit zu erzeugen und zum Verbraucher zu bringen. Dabei wurden auf das Jahr umgerechnete Kosten für das benötigte Kapital und Land, für den Betrieb der Anlage und ihre Instandhaltung sowie für die Zwischenspeicherung des Stroms zur Überbrückung von Ausfallzeiten und für seine Übertragung im Leitungsnetz berücksichtigt.

Wie sich zeigte, kosten Windenergie, Erdwärme und Wasserkraft heute schon durchweg weniger als sieben Dollar-Cent pro Kilowattstunde (¢/kWh), während Gezeiten- und Sonnenenergie teurer kommen (1 Dollar entspricht momentan etwa 1,5 Euro). Im Jahr 2020 sollten Wind-, Wellen- und Wasserkraft sogar bei höchstens 4 ¢/kWh liegen. Zum Vergleich: Die durchschnittlichen Kosten der

konventionellen Energieerzeugung und -übertragung betragen 2007 in den USA 7 ¢/kWh und dürften laut Schätzungen bis 2020 auf 8 ¢/kWh steigen.

Windturbinen können also jetzt schon beim Strompreis mit neu errichteten Kohle- oder Erdgaskraftwerken mithalten. In Zukunft dürften sie die billigste Energie überhaupt liefern. Die geringen Kosten von Windstrom haben ihm sogar in den wenig umweltbewussten USA einen Boom beschert. Bei den Kraftwerken, die in den vergangenen drei Jahren neu errichtet wurden, rangiert Wind als Quelle an zweiter Position – hinter Erdgas und vor Kohle.

Solarenergie ist zwar noch relativ teuer, aber auch sie sollte bis 2020 konkurrenzfähig sein. In einer ebenso umfassenden wie gründlichen Analyse kam Vasilis M. Fthenakis vom Brookhaven National Laboratory zu dem Schluss, dass die Kosten von Strom aus Fotovoltaik-Systemen innerhalb der nächsten zehn Jahre auf 10 ¢/kWh fallen könnten. Dabei sind die Starkstromfernübertragung und die Druckluftspeicherung von Energie aus Leistungsspitzen zur Nachtnutzung mit einkalkuliert. Laut derselben Untersuchung wären 2020 auch Solarthermie-Kraftwerke, die ausreichend Wärme zur Stromerzeugung rund um die Uhr speichern können, in der Lage, von Frühling bis Herbst Elektrizität zum Preis von 10 ¢/kWh oder weniger zu liefern.

In einer WWS-Welt werden alle motorisierten Fortbewegungsmittel von Batterien oder Brennstoffzellen angetrieben. Wie schneiden diese Elektromobile in Sachen Wirtschaftlichkeit gegenüber heutigen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ab? Einer von uns (DeLucchi) hat zusammen mit Tim Lipman von der University of California in Berkeley einen detaillierten Vergleich angestellt. Demnach könnten serienproduzierte Elektrofahrzeuge mit ausgereiften Lithium-Ionen- oder Nickel-Metallhydrid-Batterien, über ihre gesamte Lebensdauer (einschließlich eines nötigen Batteriewechsels) gerechnet, Kosten pro Kilometer erreichen, die geringer sind als die von herkömmlichen Autos, sofern der Benzinpreis über 35 Eurocent pro Liter liegt, was inzwischen sogar in den USA der Fall ist. Der Vergleich fällt noch wesentlich günstiger aus, wenn man auch die so genannten externen Kosten der Nutzung fossiler Brennstoffe berücksichtigt (den Geldwert der dadurch verursachten Schädigungen von Gesundheit, Umwelt und Klima).

Für den Aufbau eines WWS-Systems, die Infrastruktur zur Verteilung des Stroms nicht mitgerechnet, wären schätzungsweise weltweit etwa 100 Billionen Dollar aufzuwenden, ver-

#### KOSTEN DER ERZEUGUNG VON VERTEILUNG VON ERNEUERBARER ENERGIE IN 2020

US-Cent pro Kilowattstunde (2007er Dollar)



CATALOGTREE.NET



teilt über 20 Jahre. Dabei handelt es sich aber nicht um Geld, das Regierungen oder Konsumenten ausgeben müssen. Es sind Investitionen, die sich durch den Verkauf von Strom und Energie amortisieren.

Noch einmal: Das Festhalten an der traditionellen Energieerzeugung würde den Bedarf von 12,5 auf 16,9 TW erhöhen und tausende weitere Kraftwerke erforderlich machen, die um die zehn Billionen Dollar kosten dürften; hinzu kämen mehrere zehn Billionen Dollar für die Sicherheit sowie die Behebung von Gesundheits- und Umweltschäden. Für nicht viel mehr Geld, als der Erhalt und Ausbau des alten, überholten, schmutzigen und ineffizienten Energiesystems verschlingen würde, schenkt der WWS-Plan der Welt ein neues, sauberes und effizientes.

## DER POLITISCHE WILLE

In 20 Jahren können sich die Kosten dieses Systems, wie unsere Analyse belegt, mit denen der traditionellen Energieerzeugung messen. Bis dahin sind einzelne Komponenten allerdings deutlich teurer. Das erfordert für eine gewisse Zeit eine Kombination aus WWS-Subventionen und Kohlesteuern.

Ein besonders wirksames Instrument zur Förderung nachhaltiger Technologien ist, den Energieversorgungsunternehmen vorzuschreiben, für ins Leitungsnetz eingespeisten Strom aus erneuerbaren Quellen eine Mindestvergütung zu zahlen, welche die Differenz zwischen den Erzeugungskosten und dem Großhandelspreis ausgleicht. In Deutschland ist das mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz aus dem Jahr 2000 geschehen. Es hat der Solarenergie einen kräftigen Schub gegeben und wurde inzwischen von 47 Staaten nachgeahmt.

Die zusätzliche Einführung einer »absteigenden Auktion«, bei der das Recht zum Verkauf von Strom für das Versorgungsnetz an den niedrigsten Bieter geht, schafft parallel dazu beständige Anreize zur Kostensenkung bei den WWS-Entwicklern. Dadurch lässt sich die Mindestvergütung sukzessive absenken und kann schließlich völlig entfallen.

Auch die Besteuerung fossiler Brennstoffe oder ihrer Verwendung als Ausgleich für die durch sie hervorgerufenen Umweltschäden erscheint sinnvoll und wird vielfach schon praktiziert. Zumindest aber sollten noch bestehende Subventionen für Energie aus solchen herkömmlichen Quellen – in den USA sind das etwa Steuervorteile für die Erkundung und Ausbeutung fossiler Brennstofflagerstätten –, abgeschafft werden, damit gleiche Bedingungen für alle herrschen. Dasselbe gilt für die Förderung von Alternativen, die weniger vorteilhaft als WWS sind – insbesondere Biobrennstoffe;

Subventionen dafür verzögern nur den Einsatz sauberer Systeme. Natürlich wird die Lobby der traditionellen Energieversorger dafür kämpfen, dass deren Privilegien erhalten bleiben. Doch der Gesetzgeber muss einen Weg finden, dieser Einflussnahme zu widerstehen.

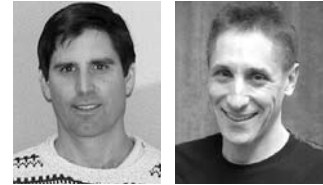
WWS-Energie ist oft in entlegenen Gebieten am reichlichsten vorhanden; bei Solarstrom sind das Wüsten wie die Sahara und bei Windkraft ausgedehnte Ebenen wie die Great Plains in den USA. Von dort müssen große Strommengen über weite Entfernungen in die Verbrauchszentren – in der Regel Großstädte und industrielle Ballungsräume – transportiert werden. Das erfordert Investitionen in ein robustes Leitungssystem. Desgleichen muss ein intelligentes Stromnetz, das Erzeugern und Kunden zu allen Zeiten mehr Kontrolle und Flexibilität beim Stromverbrauch gibt, dafür sorgen, dass sich der Energiebedarf in Stoßzeiten verringern lässt.

Ein weltweites Energiesystem auf der Basis von Wind, Wasser und Sonne wäre ein enormer Gewinn für das Klima und käme auch der Umwelt – speziell der Luftreinheit und Wasserqualität – sowie der Versorgungssicherheit zugute. Wie wir gezeigt haben, sind die Hindernisse primär politischer Natur. Eine Kombination aus Netzeinspeisungsvergütungen, Anreizen zur Kostensenkung bei den Erzeugern, Streichungen von Subventionen im fossilen Sektor sowie der Erweiterung und intelligenten Ausgestaltung des Stromnetzes sollte für eine schnelle Realisierung ausreichen.

Natürlich wäre die 1:1-Umsetzung unseres Plans sehr ehrgeizig und würde vielleicht mehr Entschlossenheit erfordern, als die Menschheit derzeit aufbringen mag. Als vernünftiges Ziel könnten die Länder der Erde aber immerhin anstreben, bis 2020 oder 2025 zumindest 25 Prozent ihrer Energieversorgung auf WWS umzustellen und dann in 40 bis 50 Jahren 100 Prozent zu erreichen.

Auch das funktioniert freilich nur mit klaren politischen Vorgaben. Anderenfalls werden weiterhin viele überholte Technologien eingesetzt oder Alternativen ausprobiert, von denen sich die Energieversorger maximale Profite versprechen, während die Expertise der Wissenschaft unbeachtet bleibt.

Vor zehn Jahren stand noch dahin, ob ein globales WWS-System technisch oder wirtschaftlich machbar wäre. Nachdem wir nun den Beweis dafür erbracht haben, hoffen wir, dass die Staatsoberhäupter der Welt einen Weg finden, diese Erkenntnis auch politisch umzusetzen. In Kopenhagen könnten sie damit anfangen, indem sie sich auf weit gesteckte Ziele zum Schutz des Klimas und zur Einführung erneuerbarer Energien einigen. ◀



**Mark Z. Jacobson** (links) ist Professor für Umwelt- und Bauingenieurwesen an der Stanford University sowie Direktor des dortigen Atmosphere/Energy Program. Er entwickelt Computermodelle, mit denen sich die Auswirkungen von Energietechnologien auf Klima und Luftverschmutzung untersuchen lassen.

**Mark A. DeLucchi** beschäftigt sich am Institute of Transportation Studies der University of California in Davis mit energetischen, wirtschaftlichen und Umweltdaten fortgeschrittener, nachhaltiger Treibstoffe, Fahrzeuge und Transportsysteme.

### Archer, C. L., Jacobson, M. Z.:

Evaluation of Global Wind Power. In: Journal of Geophysical Research 110, D12110, 30. Juni, 2005.

**Fthenakis, V. et al.:** The Technical, Geographical, and Economic Feasibility of Solar Energy to Supply the Energy Needs of the U.S. In: Energy Policy 37, S. 387–399, 2009.

**Jacobson, M. Z.:** Review of Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security. In: Energy and Environmental Science 2, S. 148–173, 2009.

**Pacala, S., Socolow, R.:** Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. In: Science 305, S. 968–972, 2004.

**Sovacool, B. K., Watts, C.:** Going Completely Renewable: Is It Possible (Let Alone Desirable)? In: The Electricity Journal 22(4), S. 95–111, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1010840](http://www.spektrum.de/artikel/1010840).