

Amerikas Weg ins solare Zeitalter

Drei Forscher stellen ihren »Solar Grand Plan« vor: Mit Hilfe von Sonnenenergie könnten die Vereinigten Staaten bis 2050 unabhängig von Ölimporten werden. Gleichzeitig würde landesweit die Emission von Treibhausgasen drastisch reduziert.

Von Ken Zweibel, James Mason
und Vasilis Fthenakis

Die hohen Preise für Benzin und Heizöl werden uns erhalten bleiben. Die USA sind in kriegsrische Aktivitäten im Nahen Osten verwickelt, unter anderem auch, um ihre Ölinteressen in dieser Region zu schützen. Und da die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen etwa in China und Indien rasch anwächst, drohen auch künftig Auseinandersetzungen um den Zugang zu Energieressourcen. Unterdessen emittieren Kohle-, Öl- und Gaskraftwerke sowie Kraftfahrzeuge in aller Welt auch weiterhin Millionen Tonnen Treibhausgase jährlich und gefährden dadurch das globale Klima.

Längst haben Wissenschaftler, Ingenieure, Ökonomen und Politiker Vorschläge gemacht, wie sich der Verbrauch an fossilen Brennstoffen schrittweise reduzieren ließe. Diese reichen jedoch nicht aus. Insbesondere die USA benötigen ein umfassendes Konzept, um ihrer Abhängigkeit von fossilen Energien zu entkommen. Unsere Analysen zeigen, dass ein breit angelegter Umstieg auf Solarenergie die logische Antwort auf diese Herausforderung ist.

Solarenergie bietet ein immenses Potenzial: Durch Sonnenstrahlen gelangt binnen 40 Minuten so viel Energie auf unseren Planeten, wie wir derzeit weltweit während eines ganzen Jahres verbrauchen. Die USA befinden sich in der glücklichen Lage, allein in ihrem Südwesten über mindestens 650 000 Quadratkilometer geeigneter Fläche für die Aufstellung von



SCHOTT AG

Hier stellen wir unseren »Solar Grand Plan« vor, ein Konzept, mit dem sich im Jahr 2050 rund 70 Prozent des Strombedarfs und 35 Prozent des Gesamtenergiebedarfs einschließlich Transport- und Verkehrswesen der USA aus Solarenergie erzeugen ließe. Diese Energie könnte Endkunden zu (nicht subventionierten) Tarifen angeboten werden, die etwa denen entsprechen, die wir heute für Energie aus konventionellen Quellen bezahlen – rund 5 US-Cent pro Kilowattstunde (kWh). Nutzen wir auch Wind, Biomasse und geothermale Energiequellen, könnten erneuerbare Energien im Jahr 2100 sogar 100 Prozent des US-amerikanischen Strombedarfs und 90 Prozent des Gesamtenergiebedarfs abdecken.

Die hohen Kosten zahlen sich aus

Um unser Konzept bis zum Jahr 2050 zu realisieren, müsste die Regierung in den kommenden 40 Jahren 420 Milliarden US-Dollar (derzeit rund 280 Milliarden Euro) investieren. Die hohen Kosten werden sich aber auszahlen. Solarkraftwerke benötigen wenig oder keinen Kraftstoff, sodass Jahr für Jahr Milliarden eingespart werden. Die neue Infrastruktur könnte 300 große Kohle- und 300 noch größere Gaskraftwerke ersetzen, auch der von diesen Kraftwerken verbrauchte Brennstoff würde eingespart. Der Bedarf an Ölimporten würde auf null zurückgefahren. Gleichzeitig ließe sich das US-Handelsdefizit drastisch reduzieren, und die politischen Spannungen im Nahen Osten und anderswo würden gemildert.

Da die Gewinnung von Solarenergie fast ohne Schadstoffemissionen auskommt, würde der Ausstoß an Treibhausgasen der US-Kraftwerke um jährlich 1,7 Milliarden Tonnen verringert. Weitere 1,9 Milliarden Tonnen, wie sie derzeit Kraftfahrzeuge in die Atmosphäre blasen, ließen sich durch Verwendung von Plug-in-Hybridfahrzeugen einsparen. (Die Batterien von Plug-in-Hybriden können nicht nur vom Verbrennungsmotor geladen werden, sondern auch an der Steckdose.) Dadurch würden die CO₂-Emissionen der USA im Jahr 2050 um mehr als 60 Prozent unter denen des Jahres 2006 zu liegen kommen.

In den letzten Jahren fielen die Herstellungskosten für Solarzellen und -module deutlich. Die günstigsten der heutigen Solarzelltypen sind Dünnschichtzellen aus Kadmium-Tellurid (CdTe). Um Strom im Jahr 2020 für 5 Cent pro kWh bereitstellen zu können, müssten CdTe-Module die Sonnenenergie mit einem Wirkungsgrad von 14 Prozent umwandeln. Die Kosten für entsprechende Anlagen dürften 1,20 Dollar pro Watt Leistung betragen. Derzeitige Module wandeln 10 Prozent der Sonnenenergie um und kosten rund 4 Dollar pro Watt.

Solarkraftwerken zu verfügen. Dieses Gebiet erhält jährlich etwa 5000 Exajoule Sonnenenergie (1 EJ = 10¹⁸ Joule), das entspricht rund 1,3 Millionen Terawattstunden. (Um eine entsprechende Energiemenge zu liefern, müssten alle Kernkraftwerke der Welt mit ihren derzeit über 400 Gigawatt Leistung fast 500 Jahre lang Strom erzeugen.) Gelänge es, nur 2,5 Prozent davon in elektrische Energie umzuwandeln, ließe sich der gesamte Energiebedarf der USA im Jahr 2006 mühelos decken.

Dafür müssten große Landflächen mit Solarmodulen und thermischen Parabolrinnenanlagen überdeckt werden. Darüber hinaus müsste eine Haupttrasse für den Transport von Gleichstrom errichtet werden, um diesen effektiv im Land zu verteilen. Die nötige Technologie ist bereits anwendungsreif.

In Kürze

- ▶ Würden heutige Kohle-, Öl-, Gas- und Kernkraftwerke in den USA in großem Maßstab durch **Solarkraftwerke** ersetzt, könnten diese bis zum Jahr 2050 **rund 70 Prozent der in den Vereinigten Staaten benötigten Elektrizität** und 35 Prozent der gesamten dort benötigten Energie erzeugen.
- ▶ Dazu müssten **im Südwesten der USA weite Flächen mit Solarzellen** bedeckt werden. Überschüssige Elektrizität, die während des Tages erzeugt wird, würde in Form von komprimierter Luft in unterirdischen Kavernen gespeichert. Für den abendlichen und nächtlichen Energiebedarf wird sie dann wieder abgezapft. Auch große Parabolrinnenkraftwerke würden gebaut werden.
- ▶ **Neue Trassen für die Übertragung von Gleichstrom** sollen die Elektrizität über das ganze Land verteilen.
- ▶ Für diesen Plan werden zwischen 2011 und 2050 **rund 420 Milliarden Dollar an staatlichen Subventionen** benötigt, damit die solare Infrastruktur etabliert und konkurrenzfähig gemacht werden kann.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

HEUTIGE ENERGIEVERSORGUNG IN ZAHLEN

gesamte Primärenergieversorgung weltweit	478,7 Exajoule ¹
gesamte Primärenergieversorgung USA	98,0 Exajoule ¹
gesamte Primärenergieversorgung Deutschland	14,4 Exajoule ¹
Stromverbrauch weltweit	16 695 TWh ¹
Stromverbrauch USA	4047 TWh ¹
Stromverbrauch Deutschland	586 TWh ¹
Kraftwerkskapazität USA (Elektrizität)	957 GW ²
Kraftwerkskapazität Deutschland (Elektrizität)	119 GW ³
Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch USA	9,5 Prozent (2006) ²
Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch Deutschland	14,3 Prozent (2007) ⁴

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit beziehen sich alle Daten auf das Jahr 2005 (Ausnahmen sind gekennzeichnet). Sie sind nicht unbedingt identisch mit der Datenbasis der Autoren des nebenstehenden Artikels (Quellen: ¹IEA; ²EIA; ³BDEW/VDEW; ⁴BEE)

Weitere Fortschritte sind also nötig. Doch im vergangenen Jahr stieg der durchschnittliche Wirkungsgrad kommerzieller Module von 9 auf 10 Prozent. Auch Fotovoltaikanlagen auf Dächern, die tagsüber einen Teil des häuslichen Stromverbrauchs abdecken, werden im Zuge dieser Entwicklung wettbewerbsfähiger werden.

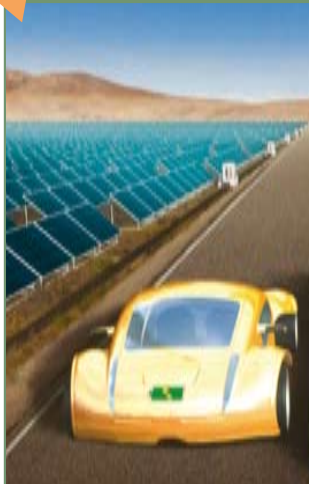
Im Jahr 2050, so sieht unser Konzept vor, sollen Fotovoltaikmodule insgesamt 3000 Gigawatt Leistung erzeugen. Dazu müssten Mo-

dule mit einer Gesamtfläche von rund 80000 Quadratkilometern installiert werden. Dieses Vorhaben mutet gigantisch an. Bereits existierende Anlagen deuten aber darauf hin, dass im amerikanischen Südwesten die für die Erzeugung einer Gigawattstunde benötigte Landfläche kleiner ist als jene, die durchschnittlich von Kohlekraftwerken benötigt wird, wenn man auch das für den Kohleabbau verwendete Land in Rechnung stellt. Untersuchungen des Nationalen Labors für erneuerbare Energien (NREL) in Golden (US-Bundesstaat Colorado) zeigen, dass im Südwesten der USA mehr als genug Land zur Verfügung steht, ohne dass man auf ökologisch empfindliche Regionen, dicht besiedelte Gebiete oder auf schwer zugängliches Terrain zurückgreifen müsste. Jack Lavelle, Sprecher der Wasserschutzbehörde in Arizona, merkte dazu an, dass sich über 80 Prozent des Bundesstaats nicht in Privateigentum befinden und Arizona sehr daran interessiert sei, sein solares Potenzial zu entwickeln.

Die wichtigste anstehende Aufgabe ist daher, den Wirkungsgrad von Solarmodulen auf 14 Prozent zu erhöhen. Zwar wird die Effizienz kommerziell erhältlicher Zellen nie die von Laborprodukten erreichen. Doch die



Die US-ENERGIEVERSORGUNG IM JAHR 2050

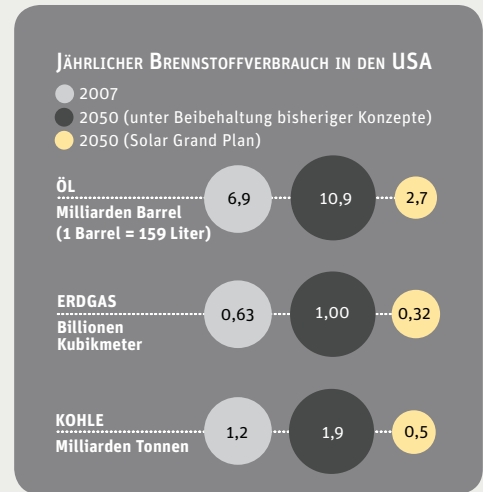


Bis 2050 könnten sich die USA von der Notwendigkeit von Ölimporten befreien. Strom würde auf riesigen Fotovoltaikfarmen im Südwesten des Landes erzeugt. Energie, die nicht sofort verbraucht wird, würde in unterirdischen Hohlräumen gespeichert. Große Solarfarmen, die mittels konzentriertem Sonnenlicht Wasser erhitzen, generieren ebenfalls Strom.

Ein neues Gleichspannungsnetz liefert den erzeugten Strom in alle Bundesstaaten. Die erforderliche Technologie, kritische Faktoren für ihren Erfolg sowie die noch benötigten Fortschritte sind in der Grafik rechts dargestellt. Außerdem ist gezeigt, welche Leistung die unterschiedlichen neuen Kraftwerkstypen im Jahr 2050 werden liefern müssen. Die Umsetzung des Solar Grand Plan würde den Verbrauch an fossilen Brennstoffen in USA deutlich reduzieren, ebenso die Emission von Treibhausgasen (unten).

Bei unseren Berechnungen gingen wir von einer jährlichen Nettoverbrauchssteigerung in Höhe von einem Prozent aus; zudem rechneten wir mit einer hohen Umstellungsrate auf Hybridfahrzeuge. Wir berücksichtigten nur mögliche Verbesserungen in der Solartechnologie, die wir bis zum Jahr 2020 erwarten. Anschließende Effizienzsteigerungen würden unser Szenario daher positiv beeinflussen.

K. Z., J. M. und V. F.



GRAFIK: JEN CHRISTENSEN; ILLUSTRATIONEN: KEVIN BROWN UND CHRIS WREN, MONOLITHIC STUDIOS

CdTe-Zellen des NREL erreichen bereits 16,5 Prozent und sollen noch besser werden. Und mindestens ein kommerzieller Hersteller, nämlich First Solar in Perrysburg (Ohio), erhöhte den Wirkungsgrad seiner CdTe-Module in den Jahren 2005 bis 2007 von 6 auf 10 Prozent und will bis 2010 11,5 Prozent erreichen.

Bei bewölktem Himmel erzeugen Solar-kraftwerke natürlich nur wenig und nachts überhaupt keine Elektrizität. Daher muss in sonnenreichen Stunden zusätzliche Energie als Abend- und Nachtreserve gespeichert werden. Die meisten Energiespeichersysteme wie etwa Batterien sind jedoch teuer oder wenig effizient. Als sehr gute Alternative hat sich die Speicherung von Energie in Form von komprimierter Luft bewährt. Dabei wird Luft mit Hilfe von Solarstrom in unterirdische Kavernen, verlassene Minen, Aquifere (poröse Gesteine, die Grundwasser leiten) oder erschöpfte natürliche Gaslager gepresst.

Bei Bedarf wird die Luft wieder abgelassen und durch eine Strom erzeugende Turbine geleitet. Zuvor wird sie durch das Verbrennen kleinerer Mengen von Gas noch erhitzt. Bereits seit 1978 wird ein Druckluftspeicher-kraftwerk erfolgreich im niedersächsischen

Huntorf betrieben, und in McIntosh (Alabama) ging 1991 ein weiteres Werk ans Netz. Ihre Turbinen verbrauchen nur 40 Prozent der Gasmenge, die sie bei reinem Gasbetrieb benötigen würden. Zusätzliche Technologie zur Wärmerückgewinnung könnte diesen Wert auf 30 Prozent senken.

Ein Netz von Druckluftspeichern

Untersuchungen des Electric Power Research Institute (EPRI) in Palo Alto (Kalifornien) ergaben, dass die Kosten für Druckluftspeicherung etwa halb so hoch sind wie die entsprechenden Kosten für Bleiakumulatoren. Den Studien zufolge würden sich die Kosten für Fotovoltaikstrom durch die Speicherung um 3 bis 4 Cent pro kWh erhöhen, die Gesamtkosten im Jahr 2020 lägen also bei 8 bis 9 Cent pro kWh. Über Gleichstrom-Hochspannungsleitungen würde die von den Solarfarmen im Südwesten erzeugte Elektrizität zu Druckluftenergiespeichern im ganzen Land weitergeleitet. Dort installierte Turbinen könnten dann ganzjährig unterbrechungsfrei Strom erzeugen. Entscheidend sind die Standorte. Feldstudien der US-Gasindustrie und des EPRI ergaben, dass in drei Vierteln des Lan-

TECHNOLOGIE	KRITISCHER EINFLUSSFAKTOR	2007	2050	ERFORDERLICHE MASSNAHMEN UND TECHNOLOGIEN
FOTOVOLTAIK	Landfläche	26 km ²	80 000 km ²	Genehmigungen zur baulichen Entwicklung großer staatlicher Gebiete transparentere Materialien zur Verbesserung des Wirkungsgrads; Module mit höherer Spannung; größere Module, um inaktive Flächen zu verringern Verbesserung des Wirkungsgrads; Preisvorteile durch Massenfertigung keine; Reduzierung ergibt sich aus niedrigeren Installationskosten nationales solares Energieversorgungskonzept
	Wirkungsgrad von Dünnschichtmodulen	10 %	14 %	
	Installationskosten	4 \$/W	1,20 \$/W	
	Strompreis	16 US-Cent/kWh	5 US-Cent/kWh	
	Gesamtkapazität	0,5 GW	2940 GW	
DRUCKLUFTENERGIE-SPEICHERUNG (mit Energie aus Fotovoltaikstrom)	Volumen	0	15 Mrd. m ³	Anlagenentwicklung ist mit Erdgasindustrie zu koordinieren Preisvorteile durch Massenfertigung; billigerer Fotovoltaikstrom keine; Reduzierung ergibt sich aus niedrigeren Installationskosten nationales solares Energieversorgungskonzept
	Installationskosten	5,80 \$/W	3,90 \$/W	
	Strompreis	20 US-Cent/kWh	9 US-Cent/kWh	
	Gesamtkapazität	0,1 GW	558 GW*	
PARABOLRINNEN-KRAFTWERKE	Landfläche	26 km ²	41 000 km ²	Genehmigungen zur baulichen Entwicklung großer staatlicher Gebiete Wärme tragende Flüssigkeiten, die Hitze effektiver transportieren effizientere thermische Speichersysteme; Preisvorteile durch Massenfertigung keine; Reduzierung ergibt sich aus niedrigeren Installationskosten nationales solares Energieversorgungskonzept
	Wirkungsgrad	13 %	17 %	
	Installationskosten	5,30 \$/W	3,70 \$/W	
	Strompreis	18 US-Cent/kWh	9 US-Cent/kWh	
	Gesamtkapazität	0,5 GW	558 GW*	
GLEICHSTROMNETZ	Länge	800 km	150 000 bis 800 000 km	neues HVDC-Netz, das den Südwesten der USA mit dem gesamten Land verbindet

*Die tatsächliche Leistung ist sehr variabel. Die Leistungsdaten wurden daher »normalisiert«, sind jetzt also direkt mit denen konventioneller Kraftwerke vergleichbar.

FOTOVOLTAIK



Der Plan der Autoren sieht vor, dass bis 2050 riesige Fotovoltaikfarmen auf rund 80 000 Quadratkilometer anderweitig nicht nutzbarem Ödland im Südwesten der USA errichtet werden. Sie würden ähnlich aussehen wie die 4,6-Megawatt-Anlage der Tucson Electric Power Company im US-Bundesstaat Arizona, die im Jahr 2000 den Betrieb aufnahm (Bild links). Hier sind einzelne Solarzellen zu Modulen zusammengeschaltet, die wiederum in Feldern gruppiert sind. Gleichstrom aus den Feldern fließt in Stromrichter und wird dann in Hochspannungsleitungen des Stromnetzes eingespeist. In einer Dünnschichtzelle (rundes Bild) setzen eintreffende Photonen Elektronen in der Kadmium-Tellurid-Schicht frei. Von dort bewegen sie sich in die obere leitfähige Schicht, um schließlich als nutzbarer Strom in die Schicht aus Metall auf der Rückseite zu fließen.

Vorteile

- ▶ Abhängigkeit von ausländischem Öl sinkt von 60 auf 0 Prozent
- ▶ Globale politische Spannungen werden abgemildert, Kosten für Militäreinsätze sinken
- ▶ Das hohe US-Handelsdefizit sinkt stark
- ▶ Die Emission von Treibhausgasen sinkt stark
- ▶ In den USA werden neue Arbeitsplätze geschaffen

des geeignete geologische Formationen vorhanden sind, oft nahe an Ballungsgebieten. Äußerlich ähnelten die Druckluftspeichersysteme den Verteilstationen für Gas, wie sie in den USA üblich sind. Gas wird hier in 400 unterirdischen Reservoirs mit einem Gesamtvolumen von rund 230 Milliarden Kubikmetern gelagert. Unser Projekt würde bis 2050 ein Volumen von nur 15 Milliarden Kubikmetern erfordern, wenn man die Luft auf einen Druck von 7500 Kilopascal (75 Bar) bringt. Die Entwicklung solcher Anlagen ist zwar eine Herausforderung, aber es gibt zahlreiche verfügbare Reservoirs und genügend Gründe für die Gasindustrie, um in den Aufbau eines Druckluftspeichernetzes zu investieren.

Unser Konzept setzt auch auf eine weitere Technologie: Parabolrinnenkraftwerke könnten ein weiteres Fünftel der benötigten Solarenergie liefern. In solchen Anlagen wird Sonnenlicht von langen Metallreflektoren auf ein mit Wärme tragender Flüssigkeit gefülltes Rohr fokussiert. Dabei wird die Flüssigkeit erhitzt und strömt anschließend durch einen Wärmetauscher, in dem Dampf zum Antrieb von Turbinen entsteht. Um die Energie zu speichern, kann die Flüssigkeit auch durch große isolierte Tanks geleitet werden, wo geschmolzenes Salz die Wärme aufnimmt und mindestens einige Stunden speichert. Nachts wird die Energie dann wieder abgezapft und zur Dampferzeugung genutzt.

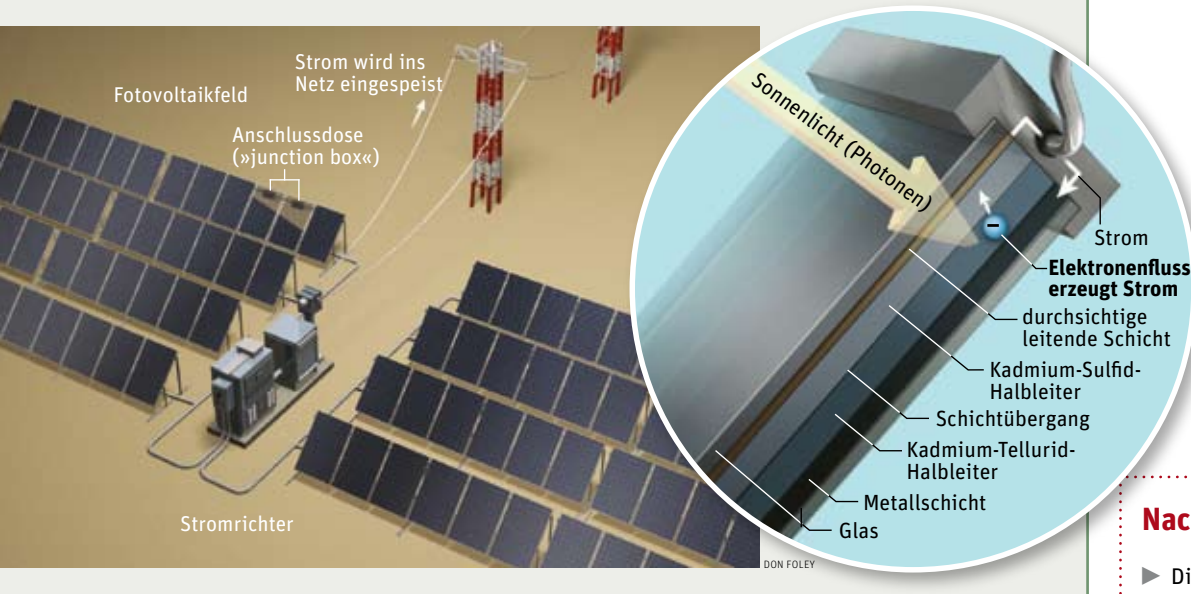
Bereits seit vielen Jahren erzeugen neun Parabolrinnenkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 354 MW verlässlich Strom. Im März 2007 ging in Nevada auch ein neues 64-MW-Kraftwerk ans Netz. Einen Wärmespei-

cher besitzen diese Anlagen allerdings nicht. Das erste kommerzielle Kraftwerk mit Salzspeicher – er kann die 50-MW-Anlage sieben Stunden lang mit Betriebswärme versorgen – wird zurzeit in Spanien errichtet; weitere entstehen in aller Welt. Für unser Projekt hingegen werden 16 Stunden Speicherkapazität benötigt, damit rund um die Uhr Strom erzeugt werden kann.

Massenproduktion senkt Preise

Parabolrinnenkraftwerke funktionieren also, doch die Kosten müssen noch gesenkt werden, unter anderem durch die Produktion größerer Stückzahlen. Ein Team von Solarenergiespezialisten der Western Governors' Association, einer Organisation, in der sich die Gouverneure von 19 westlichen US-Bundesstaaten unter anderem zum Zweck des Umweltschutzes zusammengeschlossen haben, kam zu dem Ergebnis, dass Parabolrinnenkraftwerke bis 2015 Strom für 10 Cent pro kWh (oder weniger) erzeugen könnten, wenn Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 4 GW (Gigawatt, Milliarden Watt) errichtet würden.

Gelänge es, die Hitzebeständigkeit der Wärme tragenden Flüssigkeiten zu erhöhen, ließe sich die Effizienz noch steigern. Bislang lassen sie sich nur auf etwa 400 Grad Celsius erhitzen, ohne dass sie sich zersetzen – in den Parabolrinnen könnten aber weit höhere Temperaturen erzeugt werden. Ingenieure untersuchen zudem, ob auch das geschmolzene Salz selbst als Medium der Wärmeübertragung dienen könnte. So ließen sich Wärmeverluste ebenso wie Anlagenkosten reduzieren. Für das korrosionsfördernde Salz müssten jedoch auch



Nachteile

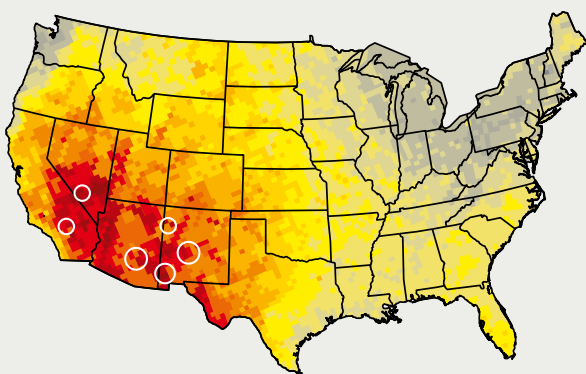
- ▶ Die erforderlichen Subventionen bis 2050 betragen 420 Milliarden Dollar
- ▶ Der politische Wille ist erforderlich, um die Finanzmittel aufzubringen (Steuer auf Strom aus fossilen Energieträgern?)
- ▶ Ein neues Hochspannungsnetz für Gleichspannungen muss von privaten Unternehmen errichtet werden

widerstandsfähigere Rohrleitungssysteme entwickelt werden.

Weder Parabolrinnen- noch Solarzellentechnik sind derzeit voll entwickelt, gemäß unserem Plan sollten sie also noch bis 2020 Zeit zur Reifung erhalten, um dann in großem Umfang eingesetzt zu werden. Bis dahin könnten aber auch andere solare Technologien zur Verfügung stehen, die den ökonomischen Rahmenbedingungen genügen. Ohnehin werden sich Vor- und Nachteile der jeweiligen Ansätze allmählich immer besser abschätzen lassen, auch Investoren werden die Entwicklung beeinflussen.

Die geografische Struktur eines solaren Energieversorgungssystems wird sich vom bestehenden System deutlich unterscheiden. Während Kohle-, Öl-, Gas- und Kernkraftwerke überall in den USA relativ nahe an den Verbrauchszentren errichtet sind, stünden die meisten Solaranlagen im Südwesten. Das bestehende Wechselspannungsnetz ist allerdings nicht leistungsfähig genug, um den Strom von dort zu Endkunden im ganzen Land zu transportieren. Zudem käme es auf langen Strecken zu großen Verlusten. Das Oak Ridge National Laboratory im Bundesstaat Tennessee fand aber bei Tests heraus, dass in Hochspan-

REICHE RESSOURCEN IN DEN USA

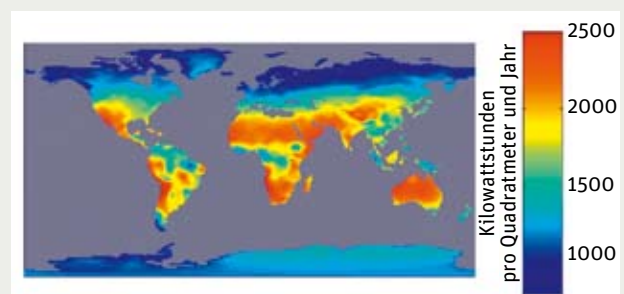


durchschnittliche tägliche Einstrahlung
in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Tag

8	7	6	5	4	3	2
---	---	---	---	---	---	---

NACH: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (WWW.NREL.GOV)

Insbesondere der Südwesten der USA erhält reichlich Sonnenlicht. 120 000 Quadratkilometer müssten hier mit Fotovoltaikmodulen und Parabolrinnen bedeckt werden, um den Solar Grand Plan bis 2050 zu verwirklichen. Dies kann in unterschiedlichen Gebieten geschehen. Eine Möglichkeit ist hier maßstabsgetreu dargestellt (links). Die Weltkarte (unten) zeigt jährliche Einstrahlungsdaten (zehnjähriger Mittelwert von 1983 bis 1992).



GREGOR CZISCH, IEE-RE, UNIVERSITÄT KASSEL

SOLARSTROM ZWISCHEN NORDKAP UND TSCHAD

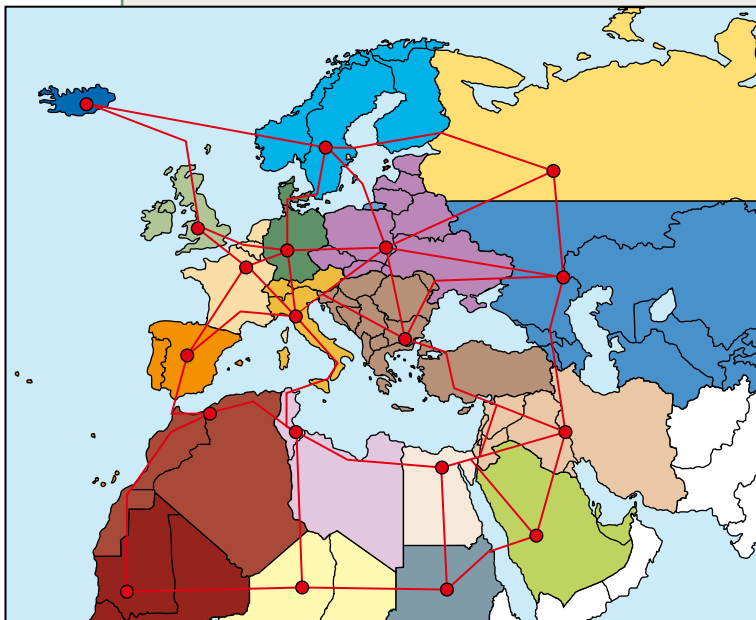
In Europa ließe sich die Energiewende – zumindest beim Strom – bereits in 20 Jahren erreichen. Die Fotovoltaik würde dabei jedoch keine Rolle spielen.

Von Gerhard Samulat

Zumindest behauptet das Gregor Czisch vom Institut für Elektrische Energietechnik der Universität Kassel. Die oft gestellte Frage, ob die regenerativen Energien es überhaupt schaffen können, die fossilen zu ersetzen, beantwortet er damit mit einem eindeutigen Ja. In seiner Dissertation untersuchte der Kasseler Physiker Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung Europas unter Einschluss einiger nordafrikanischer Staaten sowie weiter Teile Vorderasiens und Russlands. Dieses Gebiet, das vom Nordkap bis in den Tschad und von Island bis zum Ural reicht, beheimatet über eine Milliarde Menschen. Ihren derzeitigen jährlichen Stromverbrauch beziffert Czisch mit rund 4000 Terawattstunden. Dieser lässt sich nach Analysen des Wissenschaftlers vollständig durch regenerative Quellen decken.

Mit computergestützten Algorithmen suchte Czisch nach der ökonomisch günstigsten Versorgungsstruktur. Überraschenderweise kommt die Fotovoltaik dabei nicht zum Zuge. Denn unter der konservativen Annahme seines Grund Szenarios, in dem ausschließlich bereits entwickelte Technologien zu heutigen Preisen eingesetzt werden, ist die Gewinnung von Strom aus Solarzellen verhältnismäßig teuer. Zu teuer: Czisch kalkuliert Preise zwischen 27 und 49 Euro-Cent pro Kilowattstunde. In seinem Szenario kommt der hessische Energieexperte hingegen auf durchschnittliche Stromkosten von 4,65 Euro-Cent pro Kilowatt-

So könnten Europa und angrenzende Staaten in Gregor Czichs Szenario mit Strom versorgt werden. Die roten Linien deuten die Trassenverläufe für ein mögliches künftiges Gleichstromnetz an, das 19 Regionen miteinander verbindet.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: GREGOR CZISCH, IEE-RE, UNIVERSITÄT KASSEL

stunde. Das ist überraschend günstig. Beispielsweise erlösten die deutschen Stromkonzerne laut Angaben des Statistischen Bundesamts im Jahr 2006 10,46 Cent pro Kilowattstunde. Private Haushalte zahlten im gleichen Zeitraum im Mittel sogar 15,36 Cent. Ökostrom wäre nach Berechnungen des Energieforschers daher preiswerter als die heute vorzugsweise aus fossilen Quellen gewonnene Elektrizität.

Laut Czisch könnten Wasserkraft, Biomasse und Solarthermie künftig ein Drittel des Strombedarfs decken. Der Löwenanteil mit gut zwei Dritteln würde hingegen aus Windkraftanlagen stammen, die in Nordafrika, Russland, Kasachstan oder beispielsweise auf den britischen Inseln ständen. Bemerkenswert ist, dass sein Grund Szenario sogar auf Offshore-Windenergie-Parks verzichtet – sie wären ebenfalls zu teuer.

Doch ist für die Energiewende zunächst einmal eine neue Infrastruktur zu schaffen. Für die etwa zwei Jahrzehnte dauernde Anlaufphase rechnet der Kasseler Analytiker mit jährlichen Investitionen von rund 78 Milliarden Euro. Das entspricht jeweils grob sechs Promille des Bruttoinlandsprodukts (BIP) des Jahres 2002 im Szenariogebiet. Zum Vergleich: Jedes Jahr investieren die EU-15-Länder, die USA oder Japan brutto zwischen 16 und 25 Prozent, also um das 25- bis 40-Fache mehr, in ihre Industrieanlagen. Ein Zusatzposten für die Energieinfrastruktur scheint also verkraftbar. Zudem schätzen Experten des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, dass Europa bis zum Jahr 2020 ohnehin 370 Milliarden Euro für neue Kraftwerke und den Ausbau der Netzinfrastruktur aufbringen muss. Der weltweite Investitionsbedarf für neue Kraftwerke bis zum Jahr 2030 liegt nach Schätzungen der Internationalen Energieagentur in ihrem »World Energy Outlook 2006« sogar bei 11 Billionen US-Dollar.

In rund 20 Jahren könnte die neue Infrastruktur stehen und Europa einen großen Teil der Öl- und Gasimporte sparen. Das lohnte sich, schließlich gibt die EU laut einem Bericht des Europäischen Parlaments vom 5. Januar 2007 bei einem Preis von 50 Euro pro Barrel jährlich allein 250 Milliarden Euro für Ölimporte aus, was 2,3 Prozent des EU-BIPs entspricht.

Am teuersten käme in diesem Szenario der Bau neuer Windräder. Doch auch das mit Gleichstrom betriebene Hochspannungsnetz, das ähnlich wie bei dem im nebenstehenden Beitrag dargestellten US-Szenario eine zentrale Rolle spielt, kostet Milliarden. Es müsste mit den nationalen Wechselspannungsnetzen verbunden werden und würde fast die Hälfte des in verschiedenen Regionen erzeugten Stroms zu entfernten Abnehmern transportieren. Ein ausgeklügeltes Lastenmanagement müsste schließlich dafür sorgen, dass es nirgendwo in Europa oder bei seinen ans Netz angeschlossenen Nachbarn dunkel wird. <<

Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

Literaturhinweis: Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung. Kostenoptimierte Variationen zur Versorgung Europas und seiner Nachbarn mit Strom aus erneuerbaren Energien. Von Gregor Czisch, 2006. Online unter <https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/handle/urn:nbn:de:hebis:34-200604119596>

nungs-Gleichstromleitungen (HVDC, High Voltage Direct Current) über lange Distanzen hinweg weniger Energieverluste anfallen als in Wechselstromleitungen. Ein HVDC-Netz würde vom Südwesten strahlenförmig bis an die Grenzen des Landes verlaufen und jeweils an Konverterstationen enden, die den Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln, sodass er über herkömmliche regionale Leitungen zum Endverbraucher transportiert werden kann.

Weil das heutige Wechselstromnetz überlastet ist, kam es bereits zu Stromausfällen in Kalifornien und anderen Regionen. Gleichstromleitungen sind billiger zu errichten und benötigen weniger Grundfläche als entsprechende Wechselstromleitungen. In den USA sind heute bereits etwa 800 Kilometer HVDC-Leitungen in Betrieb und erweisen sich als zuverlässig und effizient. Größere technische Fortschritte scheinen daher nicht mehr vonnöten, lediglich der laufende Betrieb ließe sich mit

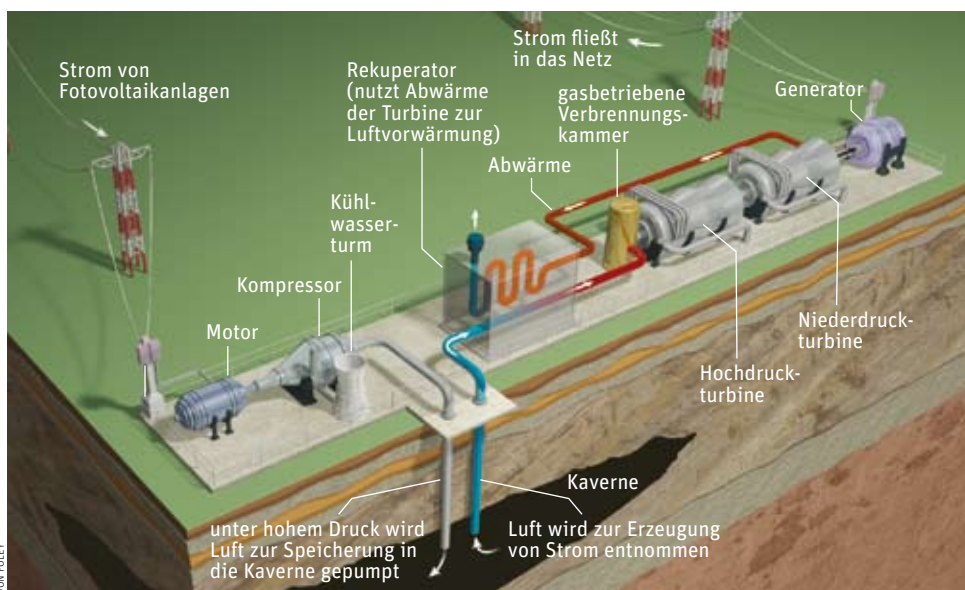
mehr Erfahrung noch optimieren. Derzeit entwickelt der Southwest Power Pool in Texas, dem die Aufsicht über die Zuverlässigkeit der Stromtransportleitungen in der Region obliegt, ein integriertes System aus Gleich- und Wechselstromleitungen, das es erlauben soll, Windkraftanlagen mit einer Leistung von 10 GW im westlichen Texas zu errichten. Und das kanadische Unternehmen Transcanada will eine 3500 Kilometer lange HVDC-Leitung bauen, die Windenergie aus den Bundesstaaten Montana und Wyoming in südliche Richtung nach Las Vegas und darüber hinaus transportiert.

Die Möglichkeiten zur Realisierung des Solar Grand Plan haben wir mit besonderer Sorgfalt geprüft. Geeignet erscheint uns ein Zwei-Phasen-Vorgehen. In der ersten Phase, die von jetzt bis 2020 dauert, sollen Solaranlagen zu preisgünstigen Massenerzeugnissen werden. Dafür muss die US-Regierung über 30 Jahre laufende Darlehen gewähren, sich

Gleichstromleitungen sind billiger zu errichten, zudem ist das heutige US-Wechselstromnetz ohnehin bereits überlastet

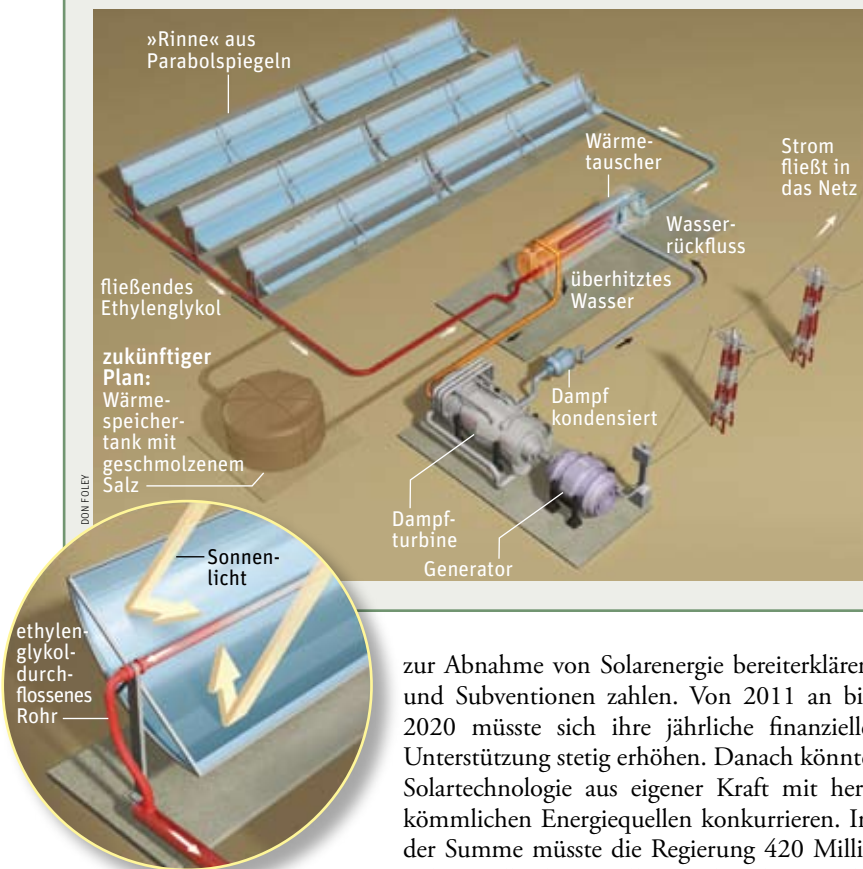


Überschüssige Elektrizität, die Fotovoltaikanlagen tagsüber erzeugen, kann mit Hilfe von Überlandleitungen zu Druckluftenergiespeichern in der Nähe großer Städte geleitet werden. Diese Technologie ist bereits verfügbar. Die Anlage der PowerSouth Energy Cooperative in McIntosh im US-Bundesstaat Alabama ist schon seit 1991 in Betrieb.



Bei Konzepten wie dem der oben genannten Anlage setzt eintreffender Strom Motoren und Kompressoren in Gang. Sie verdichten die Luft und pumpen sie in leere Kavernen oder stillgelegte Minen. Diesen Speicher kann man nachts anzapfen. Man lässt die komprimierte Luft wieder ausströmen und erhitzt sie zusätzlich durch das Verbrennen kleiner Mengen von Erdgas. Schließlich treibt die heiße, expandierende Luft eine Strom erzeugende Turbine an.

PARABOLRINNENKRAFTWERK



Große Parabolrinnenkraftwerke sollen die Fotovoltaikfarmen im Südwesten ergänzen. Das Kramer-Junction-Kraftwerk in der kalifornischen Mojave-Wüste, errichtet von der Firma Solel mit Sitz im israelischen Beit Shemesh, ist seit 1989 in Betrieb. Bei diesem Anlagentyp fokussieren bewegliche Parabolspiegel, die dem Stand der Sonne folgen, deren Strahlung auf ein Rohr. Dabei erhitzt sich die darin befindliche Flüssigkeit, zum Beispiel Ethylenglykol. Die heißen Rohre führen zu einem Wärmetauscher, wo die Wärme auf ein zweites, wassergefülltes Rohrsystem übergeht. Das Wasser verdampft dabei und der Dampf treibt eine Turbine an. Zukünftige Kraftwerke dieses Typs werden die heiße Flüssigkeit auch durch einen Speichertank mit geschmolzenem Salz leiten, das die Wärme kurzzeitig speichert. Nachts wird sie dann »abgezapft«, um ebenfalls die Turbine anzutreiben.

zur Abnahme von Solarenergie bereiterklären und Subventionen zahlen. Von 2011 an bis 2020 müsste sich ihre jährliche finanzielle Unterstützung stetig erhöhen. Danach könnte Solartechnologie aus eigener Kraft mit herkömmlichen Energiequellen konkurrieren. In der Summe müsste die Regierung 420 Milliarden Dollar bereitstellen (woher dieses Geld kommen könnte, zeigen wir später).

In dieser ersten Phase müssten Fotovoltaik- und Parabolrinnenkraftwerke mit einer Gesamtleistung von rund 84 GW installiert werden. Parallel dazu wäre das Gleichstromnetz auszubauen, und zwar entlang der amerikanischen »Interstate«-Autobahnen, wo bereits entsprechende Durchleitungsrechte bestehen. Die Notwendigkeit für Landkäufe ebenso wie für das Einholen behördlicher Genehmigungen lässt sich dadurch minimieren. Die Haupttrasse soll große Abnahmegebiete wie Phoenix, Las Vegas, Los Angeles und San Diego im Westen sowie San Antonio, Dallas, Houston, New Orleans, Birmingham (Alabama), Tampa (Florida) und Atlanta im Osten versorgen.

In den ersten fünf Jahren kämen jährlich 1,5 GW an installierter Leistung aus Fotovoltaikanlagen hinzu, dieselbe Leistung steuerten neue Parabolrinnenkraftwerke bei. Für viele Hersteller wäre dies ein Anreiz, ihre Kapazitäten auszubauen. In den folgenden fünf Jahren wird der Ausbau auf jährlich 5 GW pro Kraftwerkstyp hochgefahren. Das Wachstum hilft den Firmen bei der Optimierung ihrer Produktion, sodass der Preis für Solarstrom deutlich sinkt. Der Zeitplan ist durchaus realistisch. Allein von 1972 bis 1987 wurden in

den USA jährlich durchschnittlich über 5 GW Leistung aus Kernkraftwerken installiert. Solaranlagen hingegen können viel schneller hergestellt und errichtet werden – wegen ihres vergleichsweise einfachen Aufbaus, aber auch, weil Umwelt- und Sicherheitsprobleme eine viel geringere Rolle spielen.

Unserem Szenario für die Jahre zwischen 2020 und 2050 legten wir konservative Annahmen zu Grunde. Technologische und kosten-senkende Verbesserungen, die nach 2020 zum Tragen kommen könnten, ließen wir unberücksichtigt. Wir gingen zudem davon aus, dass die Stromnachfrage landesweit um ein Prozent pro Jahr ansteigt. In diesem Szenario liefern Solarkraftwerke im Jahr 2050 rund 70 Prozent der in den USA erzeugten Elektrizität und decken 35 Prozent des gesamten Energiebedarfs. Diese Zahlen schließen auch den Strom für den Betrieb von 344 Millionen Hybridfahrzeugen ein. Benzinbetriebene Fahrzeuge würden verdrängt, was entscheidend zur Verringerung der Abhängigkeit von Öleinfuhren und zur Reduzierung von Treibhausgasen beitrüge. Und schließlich entstünden rund 3 Millionen neue Arbeitsplätze, vor allem in der Herstellung von Komponenten für Solarkraftwerke – ein Vielfaches der Jobs, die in der dann schrumpfenden Öl-, Gas- und Kohle-Industrie verloren gingen.

Durch die sinkenden Ölimporte würde sich die US-Außenhandelsbilanz um jährlich 300 Milliarden Dollar verbessern (bei einem Rohölpreis von 60 Dollar pro Barrel, der Durchschnittspreis für 2007 liegt allerdings schon bei etwa 74 Dollar). Zwar müssen auch Solarkraftwerke gewartet und repariert werden, doch die

Nach fünf Jahren wird der Ausbau auf jährlich 10 Gigawatt Leistung aus Solarkraftwerken hochgefahren



NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (WWW.NREL.GOV)

GENIALER PLAN ODER TRÄUMEREI?

- ▶ **Diskutieren Sie mit!** Auf unserem Online-Blogportal www.wissenslogs.de lädt Sie Chefredakteur Reinhard Breuer ein, über den Solar Grand Plan, die Zukunft der Solarenergie und über ihre Alternativen nachzudenken.
- ▶ **Hier geht's zur Diskussion:** Surfen Sie im Internet zu www.wissenslogs.de/solargrandplan. Dort müssen Sie nur Ihre E-Mail-Adresse angeben und können sofort mitmachen.

Sonnenenergie selbst bleibt auf Dauer kostenlos, sodass sich die Einsparungen beim Öl Jahr für Jahr wiederholen werden. Außerdem erhöhen die Solaranlagen die Sicherheit der nationalen Stromversorgung, reduzieren Kosten für das Militär und verringern dank umwelt- und klimaschonender Arbeitsweise auch die gesellschaftlichen Folgekosten. Der Solar Grand Plan dürfte den Energieverbrauch sogar mindern. Selbst wenn die Nachfrage um ein Prozent pro Jahr wüchse, *fielen* der Verbrauch von 105 Exajoule im Jahr 2006 auf 98 EJ im Jahr 2050! Der Grund: Heute wenden wir einen beträchtlichen Teil der Energie auf, um fossile Brennstoffe zu gewinnen und aufzubereiten; weitere Energie geht bei ihrer Verbrennung und bei der Emissionskontrolle verloren.

Wie sieht die Welt in 100 Jahren aus?

Um die Vorgaben für 2050 zu erreichen, werden rund 120 000 Quadratkilometer Fläche für die Installation von Fotovoltaik- und Parabolrinnenkraftwerken benötigt. Diese Zahl erscheint riesig, entspricht aber lediglich knapp 20 Prozent der im Südwesten geeigneten Landfläche, die meist unwirtlich ist und sich anderweitig nicht nutzen lässt. Damit es nicht zu gegenseitigen Abschattungen kommen kann, sehen wir bei unseren Flächenberechnungen genügend Platz vor: Wir multiplizieren die Modulfläche mit dem Faktor 2,5, um die insgesamt benötigte Landfläche zu ermitteln. Bei Parabolrinnenkraftwerken beträgt dieser Faktor 3.

Verteilte Fotovoltaikanlagen, etwa auf Firmengeländen oder Hausdächern, liefern im

Jahr 2050 nur 10 Prozent der Solarenergie. Je nachdem, wie stark die Preise sinken, könnten sie aber auch eine größere Rolle spielen.

Exakte Prognosen, die 50 oder mehr Jahre in die Zukunft reichen, sind natürlich unmöglich. Versuchsweise führten wir dennoch Hochrechnungen durch, um das volle Potenzial der Solarenergie im Jahr 2100 darzustellen. Wir gingen von einem Gesamtenergieverbrauch (inklusive Transport) von knapp 150 EJ aus und davon, dass die Stromerzeugungskapazitäten in jenem Jahr unsere heutigen um das Siebenfache übertreffen werden.

Zunächst schätzten wir die installierte Leistung von Solarkraftwerken ab, die zur Erzeugung dieser Energie nötig wäre. Um weiterhin konservativ zu rechnen, gingen wir von einem historischen Tiefststand der Sonneneinstrahlung auf den Südwesten aus. Ein solcher Tiefststand wurde im Winter von 1982 auf 1983 und in den Jahren 1992 und 1993, im Anschluss an die Eruption des philippinischen Vulkans Pinatubo von 1991, verzeichnet. Dies lässt sich aus der Nationalen US-Datenbank für Sonnenstrahlung ermitteln, die den Zeitraum von 1961 bis 2005 umfasst. Außerdem nahmen wir wiederum an, dass es nach 2020 zu keinen weiteren technologischen oder ökonomischen Verbesserungen kommt, obwohl in den verbleibenden 80 Jahren damit ziemlich sicher zu rechnen ist. Unter diesen Annahmen könnte der US-Strombedarf mit folgenden Kraftwerkskapazitäten gedeckt werden: 2,9 Terawatt aus Fotovoltaikkraftwerken würden direkt in die Netze eingespeist, weitere 7,5 TW in Druckluftspeicher geleitet.



Ken Zweibel (oben), **James Mason** (links) und **Vasilis Fthenakis** (rechts) lernten sich vor zehn Jahren kennen, als sie gemeinsam an einem Projekt zur Ermittlung der Lebensdauer von Solarzellen arbeiteten. Zweibel ist Chef der Firma Prime-Star Solar in Golden (Colorado). 15 Jahre lang war er Manager am ebenfalls in Golden angesiedelten Nationalen Labor für erneuerbare Energien und dort für Dünnschicht-Technologien verantwortlich. Mason ist Gründer des Unternehmens Solar Energy Campaign und Direktor des Instituts für Wasserstoffforschung in Farmingdale im US-Bundesstaat New York. Fthenakis leitet ein Forschungszentrum für Fotovoltaik am Brookhaven National Laboratory in Upton (New York) sowie ein Zentrum an der New Yorker Columbia-Universität, das sich mit Lebenszyklusanalysen von Energieerzeugungssystemen beschäftigt. Hier lehrt er auch als Professor.

Eine ausführliche Fassung des »Solar Grand Plan« durchläuft derzeit die Begutachtungsverfahren bei Fachzeitschriften. Online werden diese und weitere Publikationen zu gegebener Zeit unter www.clca.columbia.edu/publications.html zu finden sein.

Jahrbuch Erneuerbare Energien 2007. Von Frithjof Staib. Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg (Hg.). Biebrich-Verlag, Radebeul 2007

Wer im Treibhaus sitzt. Wie wir der Klima- und Energiefalle entkommen. Von Konrad Kleinknecht. Piper, München 2007

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940406.

Hinzu kämen 2,3 TW aus Parabolrinnenkraftwerken sowie 1,3 TW aus verteilten Fotovoltaikanlagen. Ergänzt würde die Versorgung durch 1 TW aus Windfarmen und 0,2 TW aus geothermischen Kraftwerken. Die Produktion von Biotreibstoff auf Basis von Biomasse setzten wir mit 0,25 TW an. Die solaren Anlagen würden rund 430 000 Quadratkilometer Land überdecken – immer noch weniger, als der Südwesten bietet.

2100 könnten diese regenerativen Energiequellen 100 Prozent des US-Strombedarfs und 90 Prozent des Gesamtenergiebedarfs decken. Im Frühjahr und Sommer könnte die solare Infrastruktur genug Wasserstoff erzeugen, um 90 Prozent des Kraftstoffbedarfs im gesamten Transport- und Verkehrswesen zu liefern. Wasserstoff könnte dann auch das Erdgas ersetzen, das beim Betrieb der von Druckluftspeichern angetriebenen Turbinen eingesetzt werden muss. Zusätzlich würden 180 Milliarden Liter Biokraftstoff den verbleibenden Bedarf an Transportenergie decken. CO₂-Emissionen, die bei Energieerzeugung und -verbrauch anfallen, sanken um 92 Prozent unter ihr Niveau von 2005. All dies trotz des von uns veranschlagten jährlichen Wachstums des Energiebedarfs um ein Prozent.

»Solar Grand Plan« ist billiger als Agrarsubventionen

Die wohl wichtigste Frage ist indessen die nach der Finanzierung der solaren Infrastruktur. Eine der verbreitetsten Ideen hierzu ist die Einführung einer Steuer auf Kohle. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass sie 40 bis 90 Dollar pro Tonne Kohle betragen müsste, damit sie Stromproduzenten dazu anregt, mittels Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung die Emission von Kohlendioxid zu verringern. Diese Steuer entspricht einer Strompreiserhöhung um 1 oder 2 Cent pro kWh. Unser Plan ist billiger. Die 420 Milliarden Dollar, die der Staat zuschießen muss, können durch eine Steuer von 0,5 Cent auf jede kWh Strom eingenommen werden, die aus fossilen Energien erzeugt wurde. Bei heutigen Kosten von 6 bis 10 Cent pro kWh scheint dies tragbar.

Ein Subventionsprogramm für die US-Landwirtschaft wurde mit dem Argument der nationalen Sicherheit gerechtfertigt – schließlich müssten Lebensmittelversorgung und Preisstabilität gewährleistet sein. Ein National Renewable Energy Plan (Nationaler Plan für erneuerbare Energien) würde die Energieversorgung der USA sicherstellen und wäre damit ein zentrales Element des künftigen Wohlergehens der Nation. Die Beihilfen

würden sukzessive im Zeitraum von 2011 bis 2020 ausgezahlt. Bei einer Laufzeit von üblicherweise 30 Jahren endet die Förderung zwischen 2041 und 2050. Für den Aufbau des HVDC-Netzes durch Privatfirmen würden keine Subventionen fließen müssen, da sie Netztrassen und Konverterstationen in gleicher Weise finanzieren würden wie das heutige Wechselspannungsnetz – durch Einkünfte, die sie bei der Lieferung von Strom erzielen.

420 Milliarden Dollar sind zwar sehr viel Geld. Die jährlich anfallenden Kosten würden jedoch geringer sein als die Subventionen, die derzeit in die US-Landwirtschaft fließen. Sie wären auch geringer als die steuerfinanzierten Subventionen, die in den vergangenen 35 Jahren in den Ausbau der Infrastruktur für die Hochgeschwindigkeitstelekkommunikation investiert wurden. Und nicht zuletzt würde die USA durch diese Ausgaben unabhängiger von internationalen Energiekonflikten und ihren politischen und finanziellen Konsequenzen. Zu dem Schluss, dass der Solar Grand Plan ohne Subventionen nicht realisierbar ist, kamen unterdessen auch andere Nationen. Japan arbeitet bereits an der Errichtung einer großen, subventionierten solaren Infrastruktur; in Deutschland gibt es ein Gesetz, das feste Vergütungssätze für Energie aus erneuerbaren Energien garantiert.

Kritiker trugen verschiedene Bedenken vor wie etwa die Möglichkeit, dass Engpässe in der Materialversorgung die Großfertigung hemmen. Vorübergehend kann das durchaus der Fall sein. Doch es existieren verschiedene Typen von Solarzellen, die unterschiedliche Materialkombinationen einsetzen; außerdem wird der Materialverbrauch durch effizientere Produktionsprozesse sinken. Langfristig werden alte Solarzellen zudem zu neuen Zellen recycelt werden können.

Doch das größte Hindernis für die Umstellung der US-Energieversorgung auf erneuerbare Energien ist weder Technologie noch Geld, sondern der Mangel an öffentlichem Bewusstsein dafür, dass solare Energie eine praktikable Alternative darstellt und sogar die Energie für Transport und Verkehr liefern kann. Menschen mit Weitblick sollten daher versuchen, die Bürger der USA ebenso wie führende Persönlichkeiten aus Politik und Wirtschaft für das fast unglaubliche Potenzial der Solarenergie zu begeistern. Ist den Amerikanern dieses Potenzial erst einmal bewusst, dann wird ihr Wunsch nach nachhaltiger Energieversorgung und reduzierten CO₂-Emissionen sie schließlich davon überzeugen, dass wir die US-weite Einführung von Solarenergie auf den Weg bringen müssen. <