

## 25. Leben von den Erneuerbaren anderer Länder?

*Es wird für unsere gemeinsame Sicherheit von strategischer Bedeutung sein, ob das Mittelmeer im 21. Jahrhundert zu einem Raum der Kooperation oder der Konfrontation wird.*

Joschka Fischer, deutscher Außenminister, Februar 2004

◦Wir haben herausgefunden, dass es schwierig ist, aus den fossilen Brennstoffen auszusteigen und dabei von eigenen Erneuerbaren zu leben. Auch Kernkraft hat ihre Probleme. Was können wir sonst noch machen? OK, wie sieht es denn aus, wenn wir von den Erneuerbaren Energiequellen anderer leben würden? (Nicht dass wir irgendeinen Anspruch auf jemandes Erneuerbare hätten, sicher, aber vielleicht wäre dieser Jemand ja interessiert, sie uns zu verkaufen.)

Die meisten Ressourcen nachhaltiger Lebensführung erfordern Landfläche: Wenn Sie Solarmodule wollen, brauchen Sie Land um sie darauf aufzustellen; wenn Sie Raps anbauen wollen, brauchen Sie ebenfalls Land. Jared Diamond beobachtet in seinem Buch *Collapse*, dass zwar viele Faktoren zum Kollaps der Zivilisation führen, diese aber alle eine gemeinsame Wurzel in der Tatsache haben, dass die Bevölkerungsdichte zu groß wird.

Regionen wie Deutschland oder Europa haben ein Problem, weil sie eine große Bevölkerungsdichte haben und all die verfügbaren Erneuerbaren so diffus sind – sie haben eine geringe Leistungsdichte (Tabelle 25.1). Wenn wir nach Hilfe suchen, sollten wir uns an Länder wenden, auf die folgende drei Dinge zutreffen: a) geringe Bevölkerungsdichte; b) große Landfläche ; c) Erneuerbare Energiequellen mit hoher Leistungsdichte.

Leistung pro Flächeneinheit Land oder Meer	
Wind	2W/m <sup>2</sup>
Offshore Wind	3W/m <sup>2</sup>
Gezeitenbecken	3W/m <sup>2</sup>
Gezeitenstrom	6W/m <sup>2</sup>
Solare PV Module	5–20W/m <sup>2</sup>
Pflanzen	0.5W/m <sup>2</sup>
Regenwasser (highlands)	0.24W/m <sup>2</sup>
Wasserkraftwerk	11W/m <sup>2</sup>
Solarkamin	0.1W/m <sup>2</sup>
Concentrating Solar Power (Wüste)	15W/m <sup>2</sup>

Region	Bevölkerung	Fläche (km <sup>2</sup> )	Dichte (Pers. pro km <sup>2</sup> )	Fläche p. Person (m <sup>2</sup> )
Libyen	5 760 000	1 750 000	3	305 000
Kasachstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Saudi Arabien	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Algerien	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Sudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Welt	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Schottland	5 050 000	78 700	64	15 500
Europ. Union	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Bayern	12 500 000	70 600	178	5 620
Deutschland	81 800 000	357 000	229	4 370
Großbritannien	59 500 000	244 000	243	4 110
England (country)	49 600 000	130 000	380	2 630

Tabelle 25.1:  
(oben) Erneuerbare Anlagen müssen Landesgröße haben, weil Erneuerbare so diffus sind.

Tabelle 25.2:  
(links) Einige Regionen, geordnet nach aufsteigender Bevölkerungsdichte (vgl. auch S.335)

Tabelle 25.2 enthält einige Länder, die diese Bedingungen erfüllen. Libyens Bevölkerungsdichte beispielsweise ist 70mal geringer als die von Deutschland und seine Fläche 5mal größer. Andere große, flächenreiche Länder sind Kasachstan, Saudi Arabien, Algerien und Sudan.

In all diesen Ländern halte ich Solarenergie für am vielversprechendsten, insbesondere solarthermische Kraftwerke mit *Bündelung* der Direktstrahlung (sog. *Concentrating-Solar-Power*- oder CSP-Anlagen), die Spiegel oder Linsen zum Fokussieren des Sonnenlichts verwenden. CSP-Anlagen gibt es in einer Vielzahl verschiedener Anordnungsgeometrien der beweglichen Spiegel und mit unterschiedlichen Techniken bei der Umwandlung der Leistung im Brennpunkt - Stirlingmotor, Druckwasser, Flüssigsalz zum Beispiel. Sie alle liefern nahezu dieselbe mittlere Leistung pro Flächeneinheit, in der Größenordnung von **15 W/m<sup>2</sup>**.

### Eine Technologie mit nennenswertem Beitrag

„Der gesamte Weltenergiebedarf kann auf einer Fläche von 100km x 100km in der Sahara erzeugt werden.“ Stimmt das? CSP in der Wüste liefert etwa 15 W/m<sup>2</sup>. Wenn in obiger Fläche also nichts anderes erlaubt ist, liegt die erzeugte Gesamtleistung bei 150 GW. Das ist nicht dasselbe wie der aktuelle gesamte Weltenergiebedarf. Das ist noch nicht einmal der gesamte Weltbedarf an *Elektrizität*, der bei 2.000 GW liegt. Der Weltenergiebedarf beträgt heute 15.000 GW. Die richtige Aussage über die Sahara-Energieversorgung wäre also, dass auf einer Fläche von 1000km x 1000km den Weltenergiebedarf erzeugt werden könnte. Das ist dreimal die Fläche Deutschlands. Und wenn wir in einer Welt der Gleichberechtigung leben wollen, sollten wir vermutlich mehr als den gegenwärtigen Verbrauch ansetzen. Um jeden Menschen weltweit mit dem mittleren europäischen Verbrauch (125 kWh/d) versorgen wollen, brauchen wir zwei 1000km x 1000km Quadrate in der Wüste.

Zum Glück ist die Sahara nicht die einzige Wüste, deshalb ist es vielleicht realistischer, die Welt in kleinere Regionen aufzuteilen und herauszufinden, welche Fläche jeweils in der lokalen Wüste einer solchen Region erforderlich wäre. Um sich also auf Europa zu konzentrieren: Welche Fläche in der nördlichen Sahara ist erforderlich, um jeden in Europa und Nordafrika mit dem mittleren europäischen Bedarf zu versorgen? Nehmen wir die Bevölkerung von Europa und Nordafrika zu 1 Milliarde an, geht der Flächenbedarf auf 340.000 km<sup>2</sup> zurück, was einem Quadrat von 600 km mal 600 km entspricht, ist ziemlich genau der Fläche von Deutschland.



Fig.25.3: Stirling-Maschine. Diese formschönen Reflektoren liefern eine Leistungsdichte pro Landfläche von 14 W/m<sup>2</sup>. Foto mit freundlicher Genehmigung von Stirling Energy Systems. [www.stirlingenergy.com](http://www.stirlingenergy.com)



Fig.25.4: Andasol, Spanien – ein „100MW“ Solarkraftwerk in Bau. Übrige thermische Energie, die tagsüber produziert wird, wird in Flüssigsalztanks bis zu sieben Stunden gelagert, was eine kontinuierliche und stabile Netzversorgung gewährleistet. Das Kraftwerk soll voraussichtlich 350 GWh im Jahr (40 MW) liefern. Die Paraboltröge belegen 400 Hektar, die Leistungsdichte pro Landfläche ist also 10 W/m<sup>2</sup>. Foto oben: ABB, Foto unten: IEA SolarPACES.

Der für den Energiebedarf von Deutschland erforderliche Anteil an dieser deutschlandgroßen Fläche wäre gut ein Zwölftel davon, etwa die Fläche von Brandenburg: Eine 170 km mal 170 km Fläche der Sahara würde den gesamten Primärenergiebedarf Deutschlands decken können. Diese Flächen sind in Fig.25.5 eingezeichnet. Obwohl das gelbe Quadrat „klein“ im Vergleich zu Afrika wirkt, hat es die Fläche Deutschlands.

### **Der DESERTEC-Plan**

°Eine Organisation namens DESERTEC [[www.desertec.org](http://www.desertec.org)] vermarktet einen Plan, der vorsieht, CSP-Anlagen in sonnigen Mittelmeerländern zur Stromerzeugung zu nutzen und diesen Strom über Hochspannungs-Gleichstromleitungen (auch als HGÜ- oder HVDC-Kabel bezeichnet, siehe Fig.25.7) in die wolkenreicheren nördlichen Teile zu übertragen. HVDC-Technik ist seit 1954 im Einsatz, um Leistung über Überlandleitungen und Tiefseekabel (so wie die Verbindungsleitung zwischen Frankreich und England) zu transportieren. Man überträgt bereits auf diese Weise Elektrizität über Strecken von 1000 km in Südafrika, China, Amerika, Kanada, Brasilien und Kongo. Eine typische 500kV-Leitung überträgt eine Leistung von 2 GW. Ein HVDC-Leitungspaar in Brasilien überträgt 6,3 GW.

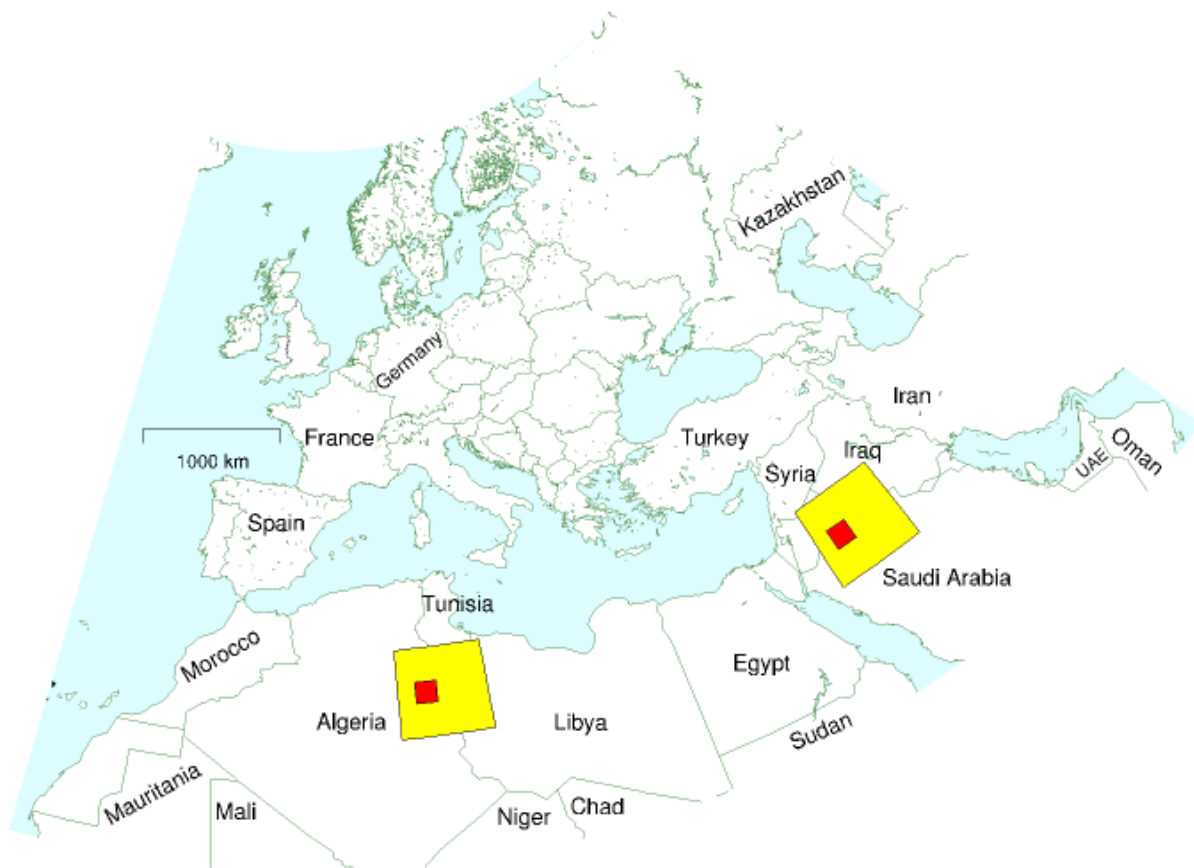


Fig.25.5: Das vielzitierte kleine Quadrat. Die Karte zeigt ein 600km x 600km Quadrat in Afrika, ein anderes in Saudi Arabien, Jordanien und Irak. CSP-Anlagen, die ein solches Quadrat vollständig ausfüllen, erzeugen genug Energie, um eine Milliarde Leute mit dem mittleren europäischen Verbrauch von 125 kWh/d/p zu versorgen. Die Fläche eines solchen Quadrats entspricht der Fläche Deutschlands oder 16mal der Fläche von Wales. In jedem großen Quadrat ist noch ein kleineres mit 170km x 170km eingezeichnet, das in der Sahara benötigt wird, um die gesamte deutsche Energieversorgung zu gewährleisten.

HVDC wird traditionellen Wechselstrom-Hochspannungsleitungen vorgezogen, weil weniger Material und weniger Landfläche benötigt wird und die Leitungsverluste geringer sind. Der Leistungsverlust auf einer 3.500 km langen HVDC Leitung, einschließlich der Umwandlung von Wechsel- auf Gleichstrom und wieder zurück, liegt bei etwa 15%. Ein weiterer Vorteil ist, dass HVDC-Systeme die Stromnetze, mit denen sie verbunden sind, stabilisieren helfen.

Land	ökonomisches Potential (TWh/y)	Küstenpotential (TWh/y)
Algerien	169 000	60
Libyen	140 000	500
SaudiArabien	125 000	2 000
Ägypten	74 000	500
Irak	29 000	60
Marokko	20 000	300
Oman	19 000	500
Syrien	10 000	0
Tunesien	9 200	350
Jordanien	6 400	0
Jemen	5 100	390
Israel	3 100	1
VAE	2 000	540
Kuwait	1 500	130
Spanien	1 300	70
Qatar	800	320
Portugal	140	7
Türkei	130	12
gesamt	620 000 (70 000GW)	6 000 (650GW)

Tabelle 25.6: Solarenergie-Potential der Länder in und um Europa. Das „ökonomische Potential“ ist die Leistung, die produziert werden könnte an geeigneten Orten, an denen die normale Einstrahlungsleistung über 2000 kWh/m<sup>2</sup>/y liegt. Das „Küstenpotential“ ist die Leistung, die in Küstengebieten bis 20 m über dem Meeresspiegel erzeugt werden kann. Dies ist besonders vielversprechend wegen der möglichen Kombination mit Entsalzungsanlagen. Zum Vergleich: Die gesamte erforderliche Leistung, um 1 Milliarde Menschen 125 kWh/d/p zu liefern, liegt bei 46.000 TWh/y (5.200 GW). 6.000 TWh/y (650 GW) liefern 16 kWh/d/p für 1 Milliarde Menschen.

In den Plänen von DESERTEC werden vor allem Küstenregionen zum Bau von Kraftwerken in Betracht gezogen, weil die Kraftwerke dort als Nebenprodukt entsalztes Meerwasser liefern, das als Trinkwasser oder für die Landwirtschaft genutzt werden könnte.

Tabelle 25.6 zeigt die DESERTEC-Schätzungen für das Potential an Kraftwerksleistung, das in den jeweiligen Ländern Europas und Nordafrikas vorhanden ist. Dieses „ökonomische Potential“ summiert sich zu mehr als nötig ist, um 1 Milliarde Menschen mit 125 kWh/d/p zu versorgen. Das gesamte „Küstenpotential“ reicht für 16 kWh/d/p für eine Milliarde Menschen. Lassen Sie uns an Hand einer Karte entwickeln, wie ein realistischer Plan aussehen könnte. Nehmen wir an, wir bauen Solaranlagen mit je 1.500 km<sup>2</sup> Größe – das ist fast zweimal die Größe von Berlin (Berlin umfasst etwa 890 km<sup>2</sup>) oder fünfmal das Stadtgebiet München (München umfasst 310 km<sup>2</sup>, der Landkreis München hat 670 km<sup>2</sup>. Der Münchner



Fig.25.7: Verlegen eines HVDC Kabels zwischen Finnland und Estland. Ein solches Kabelpaar überträgt 350 MW Leistung. Foto: ABB



Autobahnring A99 hat meist um die 25 km Durchmesser, also grob abgeschätzt 500 km<sup>2</sup> gedachte Innenfläche). °Wir nennen eine solche Anlage ein „Blob“. Wir nehmen weiter an, dass in jedem Blob die Hälfte der Fläche für CSP-Spiegellinsen reserviert ist (mittlere Leistungsdichte 15 W/m<sup>2</sup>) und dazwischen Platz wäre für Ackerbau, Gebäude, Straßen, Eisenbahnen, Rohre und Kabel. Lassen wir 10% Kabelverluste auf dem Weg zwischen dem Blob und dem Verbraucher zu, liefert jeder Blob ein mittlere Leistung von 10GW.

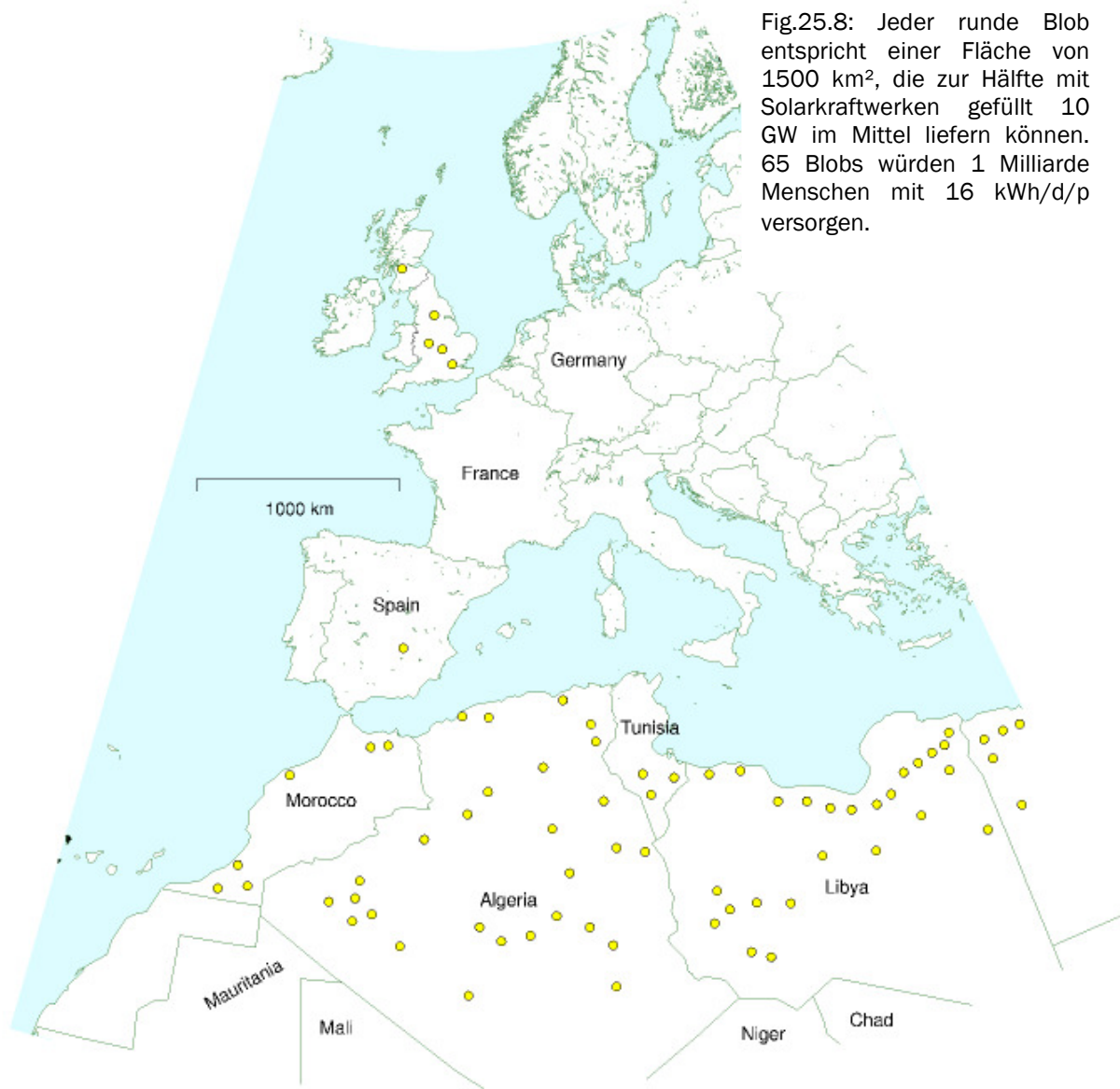


Fig.25.8: Jeder runde Blob entspricht einer Fläche von 1500 km<sup>2</sup>, die zur Hälfte mit Solarkraftwerken gefüllt 10 GW im Mittel liefern können. 65 Blobs würden 1 Milliarde Menschen mit 16 kWh/d/p versorgen.

Fig.25.8 zeigt einige Blobs maßstäblich in einer Karte eingezeichnet. Um ein Gefühl für die Größe zu vermitteln, sind ein paar auch in Europa eingezeichnet. Fünf dieser Blobs liefern einen Output vergleichbar mit dem deutschen Gesamtelektrizitätsverbrauch (16 kWh/d/p für 80 Millionen Menschen). Fünfundsechzig Blobs würden alle 1-Milliarde Menschen in Europa und Nordafrika mit 16 kWh/d/p versorgen. Fig.25.8 zeigt 68 Blobs in der Wüste.

### **Photovoltaik mit Lichtbündelung**

Eine Alternative zu CSP in der Wüste sind großflächige PV-Module mit Lichtbündelung. Um ein solches Modul herzustellen, setzt man eine hochwertige PV-Solarzelle in den Brennpunkt von kostengünstigen Linsen oder Spiegeln. Faiman et al. (2007) sagen, dass „Solarenergie, in ihrer Ausführung als PV mit Lichtbündelung,

komplett kosten-vergleichbar mit fossilen Brennstoffen sein kann [in Wüstenstaaten wie Kalifornien, Arizona, New Mexico oder Texas] und keine Subventionen irgendwelcher Art erforderlich wären“.

Nach Angaben des Herstellers Amonix hat diese Form der gebündelten Solarenergie eine Leistungsdichte pro Landfläche von **18 W/m<sup>2</sup>**.

Ein anderer Ansatz, ein Gefühl für die erforderliche Anlagenhardware zu bekommen, ist, sie zu personalisieren. Einer der „25 kW“(peak) Kollektoren (Fig.25.9) erzeugt im Mittel 138 kWh pro Tag; der amerikanische Lebensstil verbraucht aktuell 250 kWh pro Tag pro Person. Um die USA mit Solarkraft frei von fossilen Brennstoffen zu machen, bräuchte man also etwa zwei dieser 15 m x 15 m Kollektoren pro Person.



Fig.25.9: Ein 25 kW(peak) PV-Kollektor mit Lichtbündelung des kalifornischen Herstellers Amonix. Eine 225 m<sup>2</sup> Lichtfläche enthält 5760 Fresnellinsen mit einer optischen Konzentration von x 260, von denen jede eine 25%-effiziente Siliziumzelle beleuchtet. In einer geeigneten Wüstengegend liefert dieser Kollektor 138 kWh pro Tag, genug für den Energiekonsum eines halben Amerikaners. Beachte den Menschen als Größenvergleich. Foto von David Faiman.

## Fragen

*Ich bin verwirrt. In Kapitel 6a sagten Sie, dass die besten PV-Module über 20 W/m<sup>2</sup> im Mittel produzierten, an einem Ort mit europäischen Sonnenverhältnissen. In der Wüste würden die vermutlich 40 W/m<sup>2</sup> schaffen. Wie kommt es dann, dass trotz der Lichtbündelung diese Anlagen nur 15-20 W/m<sup>2</sup> generieren? Durch Lichtbündelung sollte sich doch die Ausbeute verbessern gegenüber einfachen flachen Modulen?*

Gute Frage. Die kurze Antwort ist nein. CSP erreicht keine bessere Leistungsdichte pro Landfläche als flache Module. Die Fokussierungseinheiten müssen der Sonne folgen, sonst wird der Brennpunkt nicht korrekt ausgeleuchtet; sobald Sie Land mit nachgeführten Fokussierungseinheiten zubauen, müssen Sie zwischen ihnen Platz lassen. Ein Teil des Sonnenlichts fällt in diese Zwischenräume und ist verloren. Der Grund, warum man dennoch Systeme mit Lichtbündelung herstellt und erforscht, ist, dass die heutigen flachen Module sehr teuer sind und Lichtbündelung kostengünstigere Systeme ermöglicht. Das Ziel der CSP-Ingenieure ist nicht große Leistungsdichte pro Landfläche, denn Landfläche ist (aus ihrer Sicht) billig zu haben. Das Ziel ist, viel Leistung pro Dollar zu erzeugen.

*Wenn flache Module die größere Leistungsdichte haben, wieso planen wir dann nicht, die Sahara mit diesen zu bedecken?*

Weil ich versuche, die praktikablen Optionen für großangelegte nachhaltige Energieerzeugung zu diskutieren, für Europa und Nordafrika bis 2050. Ich schätze, dass auch 2050 noch Spiegel billiger als PV-Module sein werden, deshalb sollten wir uns auf die Technologien mit Lichtbündelung konzentrieren.

### Was ist mit Thermikkraftwerken (solar chimneys)?

Ein Thermikkraftwerk nutzt Sonnenkraft auf sehr einfache Weise. Ein großer Kamin wird in der Mitte einer Fläche errichtet, die mit einem durchsichtigen Dach aus Glas oder Folie überdacht wird. Weil warme Luft aufsteigt, zieht die Luft, die wie in einem Glashaus unter dem Dach erwärmt wird, im Kamin nach oben und kältere Luft strömt am äußeren Rand der überdachten Kollektorfläche nach. Aus diesem Luftstrom wird durch eine Turbine am Fuß des Kamins Energie erzeugt. Thermikkraftwerke sind relativ einfach aufzubauen, doch liefern sie nicht sehr beeindruckend viel Leistung pro Flächeneinheit. Eine Pilotanlage in Manzanares, Spanien, war sieben Jahre von 1982 bis 1989 in Betrieb. Der Kamin hatte eine Höhe von 195 m und einen Durchmesser von 10 m. Der Kollektor hatte einen Durchmesser von 240 m, sein Dach eine Fläche von 6.000 m<sup>2</sup> Glas und 40.000 m<sup>2</sup> Plastikfolie. Sie erzeugte 44 MWh pro Jahr, was einer Leistungsdichte pro Flächeneinheit von 0,1 W/m<sup>2</sup> entspricht. Theoretisch wird die Leistung eines Thermikkraftwerks um so höher, je größer der Kollektor und je höher der Kamin ist. Die Ingenieure von Manzanares rechneten hoch, dass ein 1000 m hoher Kamin umgeben von einem Kollektor mit 7 km Durchmesser eine Leistung von 680 GWh pro Jahr erzeugen könnte. Das ist eine Leistungsdichte pro Landfläche von etwa 1,6 W/m<sup>2</sup>,



Fig.25.10: Der Thermikkraftwerk-Prototyp in Manzanares. Fotos von solarmillennium.de

### **Stromimport von Island nach England?**

◦Wie wäre es, wenn Großbritannien Energie aus Island beziehen würde, wo Geothermie und Wasserkraft so reichlich vorhanden sind?

Tatsächlich exportiert Island bereits Energie, indem es Industrie unterhält, die energieintensive Produkte herstellt. Island produziert beispielsweise fast eine Tonne Aluminium pro Einwohner! Aus isländischer Sicht sind hier große Profite zu machen. Doch kann Island Europa retten? Es würde mich wundern, wenn Islands Energieproduktion so weit hochskaliert werden könnte, dass sie auch nur für die Nachbarn Irland oder England nennenswerte Elektrizitätsexporte tragen würde. Als Vergleichsskala nehmen wir einfach mal die Verbindungsleitung Frankreich-England, die 2 GW über den Ärmelkanal liefern kann. Diese Maximalleistung entspricht 0,8 kWh pro Tag pro Brite, etwa 5% des mittleren britischen Elektrizitätsbedarfs. Islands mittlere Geothermie-Stromleistung ist lediglich 0,3 GW, was unter 1% des britischen Durchschnitts-Stromverbrauchs liegt. Islands mittlere Elektrizitätsproduktion ist 1,1 GW. Um eine Verbindung mit Stromimporten vergleichbar mit denen aus Frankreich zu beschicken, müsste Island seine Stromproduktion verdreifachen. Um England mit 4 kWh/d/p zu versorgen (etwa der Anteil britischer Kernkraftwerke), müsste sich Islands Elektrizitätsproduktion verzehnfachen. Es ist wahrscheinlich eine gute Idee, eine Verbindungsleitung nach Island zu bauen, doch erwarten Sie nicht, dass darüber nennenswerte Beiträge fließen werden.



Fig.25.11: Mehr Geothermie in Island. Foto von Rosie Ward.



ähnlich der Leistungsdichte von Windfarmen in England, und etwa ein Zehntel der Leistungsdichte der oben erwähnten CSP-Anlagen. Es wird behauptet, dass Strom aus Thermikkraftwerken zu einem ähnlichen Preis wie aus konventionellen Kraftwerken bereitgestellt werden kann. Ich schlage vor, dass Länder mit genug Landfläche und Sonnenschein einen großen Wettbewerb zwischen Thermikkraftwerken und CSP-Anlagen veranstalten sollten, gesponsert von ölproduzierenden und ölverbrauchenden Ländern.

## Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

199 **Joschka Fischer** siehe [3ofyamc].

200 **CSP in der Wüste liefert etwa 15 W/m<sup>2</sup>** Meine Quellen für diese Zahlen sind zwei Firmen, die CSP-Anlagen herstellen. [www.stirlingenergy.com](http://www.stirlingenergy.com) sagt, einer ihrer Spiegel mit einer 25 kW Stirlingmaschine im Brennpunkt könne in einer guten Wüstengegend 60.000 kWh/y erzeugen. Man könnte sie bis zu einem Spiegel pro 500 m<sup>2</sup> dicht packen. Das gibt eine Durchschnittsleistung von **14 W/m<sup>2</sup>**. Laut Hersteller ist diese Maschine die beste Landnutzung, was Energieausbeute betrifft. [www.ausra.com](http://www.ausra.com) benutzt flache Spiegel, um Wasser auf 285 °C zu erhitzen und eine Dampfturbine zu betreiben. Der erhitzte und verdichtete Wasserdampf kann in tiefen metallverstärkten Kavernen gelagert werden, um Energieerzeugung auch nachts zu ermöglichen. In ihrer Beschreibung eines „240 MW(el)“ Kraftwerks für Australien (Mills and LiÈvre, 2004) behaupten die Planer, dass 3,5 km<sup>2</sup> Spiegel 1,2 TWh(el) liefern könnten, das sind 38 W pro m<sup>2</sup> Spiegelfläche. Um dies auf die Leistung pro Landfläche umrechnen zu können, müsste man die Zwischenräume der Spiegel kennen. Ausra sagt, dass sie eine Fläche von 153 km mal 153 km in einer Wüste benötigen, um die gesamte Elektrizität für die USA zu erzeugen (Mills and Morgan, 2008). Die gesamte US-Elektrizität beträgt 3.600 TWh/y, also folgt aus der Behauptung eine Energiedichte pro Landfläche von **18 W/m<sup>2</sup>**. Diese Technologie wird unter dem Namen *Compact Linear Fresnel Reflector* (Mills and Morrison, 2000; Mills et al., 2004; Mills and Morgan, 2008) beschrieben. Die Firma Ausra bevorzugt statt *Concentrating Solar Power* (CSP) den Ausdruck *Solar Thermal Electricity* (STE); sie betonen den Vorteil der thermischen Lagerung im Vergleich mit konzentrierter Photovoltaik, wo es keine intrinsische Speichermöglichkeit gibt. Trieb and Knies (2004), große Verfechter der CSP-Technik, schätzen für die verschiedenen CSP-Technologien folgende Leistungsdichten pro Landfläche ab: Parabolwannen, **14–19 W/m<sup>2</sup>**; Linear Fresnel Collector, **19–28 W/m<sup>2</sup>**; Turm mit Heliostaten, **9–14 W/m<sup>2</sup>**; Stirling-Spiegel, **9–14 W/m<sup>2</sup>**. In Europa gibt es drei Demonstrationskraftwerke für CSP: Andasol – mit Parabolwannen; Solúcar PS10, ein Turm nahe Sevilla; und Solartres, ein Turm, der geschmolzenes Salz zur Wärmespeicherung benutzt. Das Parabolwannen-System von Andasol (Fig.25.4) soll **10 W/m<sup>2</sup>** erzeugen. Solúcars “11 MW”-Solarturm hat 624 Spiegel zu je 121 m<sup>2</sup>. Diese Spiegel konzentrieren das Sonnenlicht zu einer Strahlungsdichte von bis zu



Fig.25.12: Zwei Ingenieure bauen ein eSolar-Kraftwerk mit Heliostaten (Spiegel, die sich drehen und neigen können um der Sonne zu folgen) auf. [esolar.com](http://esolar.com) stellt mittelgroße Kraftwerke her: eine 33MW(peak) Anlage auf 64 Hektar. Das sind 51 W/m<sup>2</sup> (peak), in typischer Wüstenlage könnten, würde ich schätzen, etwa 25% davon als Dauerleistung geliefert werden: 13 W/m<sup>2</sup>.



650 kW/m<sup>2</sup>. Der Empfänger im Turm erhält in der Spitze eine Leistung von 55 MW. Das Kraftwerk kann 20 MWh thermische Energie speichern, was die Elektrizitäts-Produktion über 50 Minuten Bewölkung aufrechterhält. Es sollte 24,2 GWh Strom pro Jahr produzieren, auf 55 Hektar. Das ergibt eine mittlere Leistung pro Landfläche von 5 W/m<sup>2</sup>. (Quelle: Abengoa Annual Report 2003.) Solartres wird 142 Hektar belegen und soll 96,4 GWh pro Jahr liefern; das entspricht einer Leistungsdichte von 8 W/m<sup>2</sup>. Andasol und Solartres werden beide im Normalbetrieb mit Erdgas betrieben.

- 201 Man überträgt bereits mit HVDC Elektrizität über Strecken von 1000 km Quellen: Asplund (2004), Bahrman and Johnson (2007). Weiterführende Literatur on HVDC: Carlsson (2002).
- 202 Der Leistungsverlust auf einer 3.500 km langen HVDC Leitung, einschließlich der Umwandlung von Wechsel- auf Gleichstrom und wieder zurück, liegt bei etwa 15%. Quellen: Trieb and Knies (2004); van Voorthuysen (2008).
- 204 Nach Angaben des Herstellers Amonix hat diese Form der gebündelten Solarenergie eine Leistungsdichte pro Landfläche von 18 W/m<sup>2</sup>. Die Annahmen von [www.amonix.com](http://www.amonix.com) sind: Die Linse transmittiert 85% des Lichts; 32% Zellen-Wirkungsgrad; 25% Kollektor-Wirkungsgrad und 10% zusätzlichen Verlust wegen Verschattung. Apertur/Land-Verhältnis ist 1/3. Normale direkte Einstrahlung: 2222 kWh/m<sup>2</sup>/Jahr. Sie erwarten pro kW Peak-Kapazität 2000 kWh/y Output (im Mittel 0,23 kW). Ein Kraftwerk mit 1 GW Peak Kapazität würde 12 km<sup>2</sup> Land erfordern und 2000 GWh pro Jahr liefern. Das sind 18 W/m<sup>2</sup>.
- 205 Ein Thermikkraftwerk – *Solar chimneys*. Quellen: Schlaich J (2001); Schlaich et al. (2005); Dennis (2006), [www.enviromission.com.au](http://www.enviromission.com.au), [www.solarairpower.com](http://www.solarairpower.com).
- 205 Islands mittlere Elektrizitätsproduktion ist 1,1 GW Dies sind die Werte von 2006: 7,3 TWh Wasserkraft und 2,6 TWh Elektrizität aus Geothermie, mit Nennkapazitäten von 1.16 GW bzw. 0.42 GW. Quelle: Orkustofnun National Energy Authority [[www.os.is/page/energystatistics](http://www.os.is/page/energystatistics)].

Weiterführende Literatur:

European Commission (2007), German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment (2006), [www.solarmillennium.de](http://www.solarmillennium.de).



Fig.25.13: Eine HVDC Anlage in China. Foto: ABB