

30. Energiepläne für Europa, Amerika und die Welt

◦Fig.30.1. zeigt den Energiebedarf vieler Länder und Regionen, aufgetragen über dem Bruttonettoprodukt (BSP). Es wird weithin angenommen, dass Entwicklung und Wachstum der Menschheit eine gute Sache wären, wenn ich also die Weltpläne für nachhaltige Energie umreißer, werde ich annehmen, dass alle Länder mit niedrigem BSP pro Kopf sich in Fig.30.1 nach rechts entwickeln. Und mit ihrem BSP werden diese Länder unausweichlich auch ihren Energieverbrauch erhöhen. Es ist nicht klar, welches Verbrauchsverhalten wir dafür einplanen sollten, doch denke ich, der europäische Mittelwert (125 kWh pro Tag pro Person) ist eine realistische Annahme; alternativ könnten wir auch davon ausgehen, dass Effizienz steigernde Maßnahmen, wie wir sie in Kapitel 19-28 für das vereinfachte Deutschland aufgezeigt haben, allen Ländern europäischen Lebensstandard mit geringerem Energieverbrauch erlauben. Im Plan für den Verbrauch auf Seite 227 fiel der Verbrauch im vereinfachten Deutschland auf etwa **68 kWh/d/p**. Behalten wir im Gedächtnis, dass im vereinfachten Deutschland kaum industrielle Aktivitäten vorhanden waren, wäre es vielleicht angebracht, eine etwas höhere Zielvorgabe anzunehmen, vielleicht **80 kWh/d/p** wie in Hong Kong.

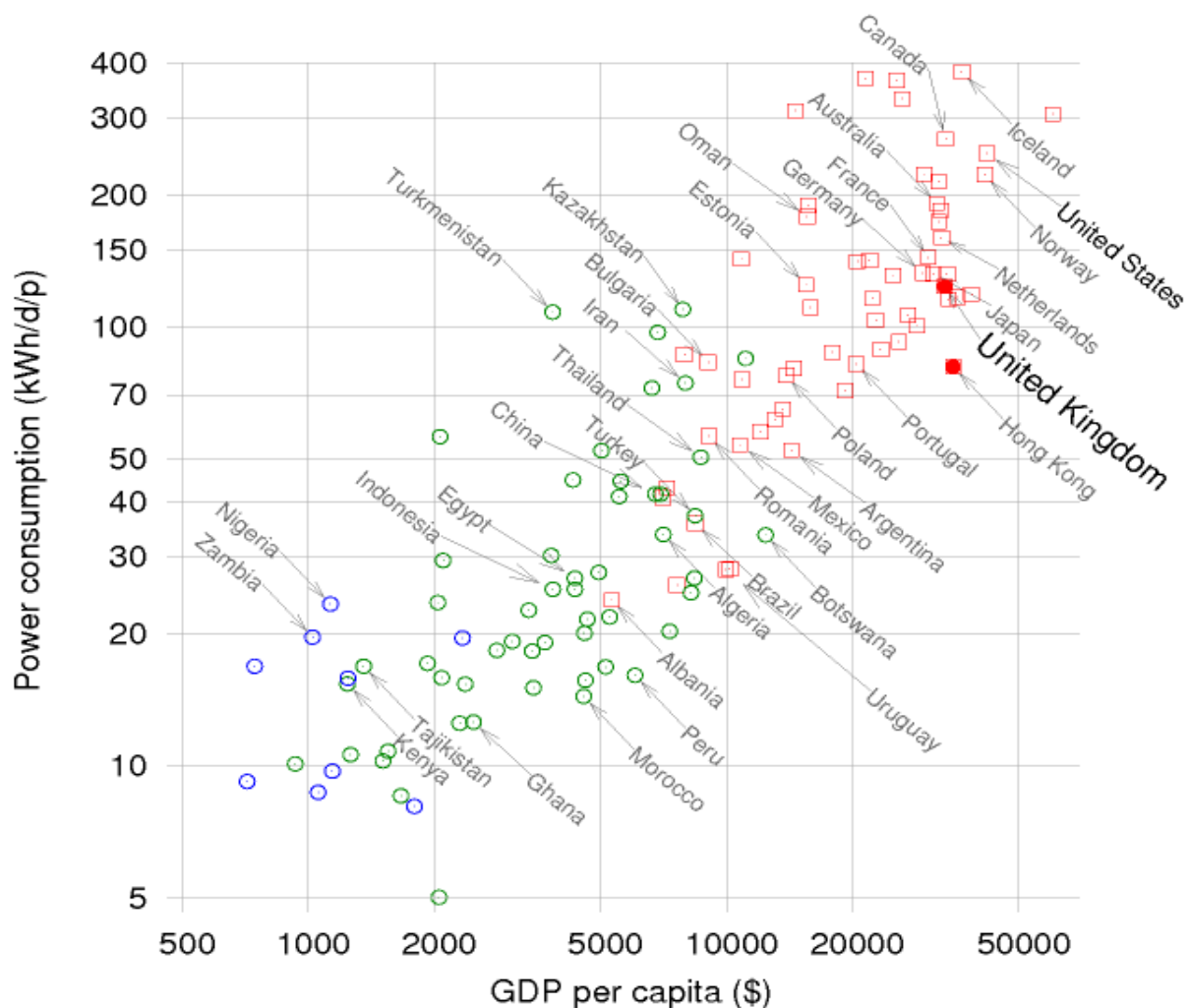


Fig.30.1: Energieverbrauch pro Kopf vs. BSP pro Kopf, in Kaufkraft-Äquivalent US-\$. Daten von UNDP Human Development Report, 2007. Quadrate zeigen Länder mit "hohem Entwicklungsstand", Kreise mit „niederm“ oder „mittlerem“. Beide Achsen sind in logarithmischem Maßstab. Fig.18.4 zeigt dieselben Daten in linearem Maßstab.

Wiederholung der Berechnungen für Europa

◦Kann Europa von seinen Erneuerbaren leben?

Europas Bevölkerungsdichte ist etwa halb so groß wie Deutschlands, ◦ also steht mehr Land zur Verfügung, um große Anlagen für Erneuerbare zu platzieren. Die Fläche der EU ist etwa 9000 m² pro Person. Allerdings haben viele Erneuerbare in Europa eine geringere Energiedichte (pro Fläche) ♦als in Deutschland: ◦Der Großteil Europas hat weniger Wind, viele Länder haben keine Seeküste für Offshore-Wind, Wellen- oder Gezeitenkraft. Einige Teile haben aber mehr Wasserkraft (in Skandinavien und Zentraleuropa); und manche haben mehr Solar. Lassen Sie uns die groben Zahlen bestimmen.

Wind

Das Herz des kontinentalen Europas hat niedrigere typische Windgeschwindigkeiten als Norddeutschland – in einem Großteil Italiens beispielsweise liegen die Windgeschwindigkeiten unter 4 m/s. Nehmen wir an, dass ein Fünftel Europas genügend hohe Windgeschwindigkeiten für ökonomische Windfarmen aufweist, mit einer Leistungsdichte von 2 W/m², und nehmen wir weiter an, wir behandeln diese Regionen wie Deutschland in Kapitel 4 und füllen sie zu 10% mit Windfarmen. Die Gesamtfläche der EU ist etwa 9000 m² pro Person, also liefert der Wind

$$1/5 \times 10\% \times 9000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ W},$$

was 9 kWh/d pro Person bedeutet.

Wasserkraft

Die derzeitige Produktion von Wasserkraft liegt bei insgesamt 590 TWh/y oder 67 GW. Auf 500 Millionen Menschen verteilt sind das 3,2 kWh/d/p. Die Produktion ist hauptsächlich in Norwegen, Frankreich, Schweden, Italien, Österreich und der Schweiz. Würde jedes Land seine Wasserkraft-Kapazität verdoppeln – was wohl nicht einfach wäre – würde Wasserkraft einen Beitrag von 6,4 kWh/d pro Person liefern.

Wellen

Nehmen wir die gesamte Atlantikküste (etwa 4000 km) und multiplizieren das mit einer mittleren Produktionsrate von 10 kW/m, erhalten wir 2 kWh/d pro Person. Ostsee und Mittelmeer haben keine erwähnenswerten Wellenressourcen.

Gezeiten

Nehmen wir das Doppelte des für England abgeschätzten Gezeitenpotentials, sollte dies die französischen, irischen und norwegischen Gezeitenkraft-Ressourcen berücksichtigen. Aufgeteilt auf 500 Millionen Menschen erhalten wir 2,6 kWh/d pro Person. Ostsee und Mittelmeer haben keine erwähnenswerten Gezeitenressourcen.

Photovoltaik und Solarthermie auf den Dächern

Weite Flächen Europas liegen südlicher ♦als Deutschland, ◦und PV-Module liefern in Südeuropa auch entsprechend mehr Leistung. Im Gegenzug werden PV-Module in England oder Skandinavien weniger ertragreich ♦als in Deutschland sein. Wir nehmen als Mittelwert die in Kap. 6a für Deutschland abgeschätzten Werte: 10 m² erzeugen etwa 7 kWh/d. ◦Genauso können Warmwasser-Module auf 2 m² im Mittel 3,6 kWh/d niederstufige Wärmeenergie liefern. (Ich sehe keine Veranlassung, mehr als 2 m² Solarthermie pro Person anzusetzen, weil diese Kapazität bereits ausreicht, den typischen Warmwasserbedarf abzudecken. ♦Solarthermische Heizungsunterstützung

durch zusätzliche Warmwasser-Module könnte aber für manche Gegenden auch über diesen Ansatz hinaus sinnvoll sein.)

Was noch?

◦Die bisherige Summe ist $9 + 6,4 + 2 + 2,6 + 7 + 3,6 = 30,6$ kWh/d pro Person. Die einzigen bisher noch unberücksichtigten Ressourcen sind Geothermie und großflächige Solarfarmen (mit Spiegeln, Modulen oder Biomasse).

Geothermie könnte funktionieren, ist aber noch im Forschungsstadium. Ich denke, man sollte sie behandeln wie die Fusion: Eine gute Investition aber noch nicht verlässlich.

Aber was ist mit Solarfarmen? Wir könnten uns 5% Europas (450 m^2 pro Person) an Freiflächen-PV-Anlagen vorstellen, etwa wie die in Bayern aus Fig.6.7 (mit einer Leistungsdichte von 5 W/m^2). Dies würde eine mittlere Leistung von

$$5 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ m}^2 = 54 \text{ kWh/d pro Person}$$

erbringen. PV würde damit einen substanziellen Beitrag leisten. ♦Bei einem so großen Anteil des Solarstroms an der Gesamtstromerzeugung werden große Anstrengungen zum Ausgleich der jahreszeitlichen Schwankungen erforderlich: Etwa 75% der Gesamtleistung einer PV-Anlage fällt in den Sommermonaten an, nur 25% im Winter. Ein Viertel der Jahresstrommenge müsste deshalb regelmäßig für etwa sechs Monate gespeichert werden. Eine Lösung wäre, die in Kap. 26 beschriebene Methanisierung (Windgas) auch mit PV-Strom zu betreiben, also „Solargas“ in die bestehenden Erdgas-Netze und -Speicher einzuspeisen. Diese Speicherung ist aber nur 30% effizient, so dass die Verluste beim Speichern von 25% des Jahresertrags diesen Ertrag um $70\% \times 25\% = 18\%$ schmälern. Um im Winter genauso viel elektrische Energie bereitstellen zu können wie im Sommer, müssen wir zum Ausgleich der Verluste sogar mehr als die betrachteten 25% der Jahresmenge speichern, so dass die gesamten Speicherverluste sich weiter erhöhen und uns von den betrachteten 54 kWh/d/p nur noch 40 kWh/d/p bedarfsgerecht über das Jahr verteilt übrigbleiben. Doch ist das immer noch mehr als die $30,6 \text{ kWh/d/p}$, die uns die Abschätzung aller anderen Erneuerbaren Energien lieferte.

◦Energiepflanzen? Pflanzen fangen nur $0,5 \text{ W/m}^2$ (Fig.6.11). Geht man davon aus, dass Europa sich selbst ernähren soll, kann der Energiebeitrag europäischer Pflanzen jenseits der Verwendung als Nahrung nicht enorm sein. Ja, es wird hier und da Rapsölfelder, Biogasanlagen und Forstwirtschaft geben, doch kann ich mir nicht vorstellen, dass die non-food-Anteile der Pflanzen mehr als $12 \text{ kWh/d pro Person}$ ausmachen.

Die Grundlast

Lassen Sie uns realistisch sein: Genau wie ♦Deutschland◦ hätte es Europa sehr schwer, müsste es von seinen eigenen Erneuerbaren leben. Wenn das Ziel also der Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen ist, braucht Europa Kernkraft oder Solarfarmen in den Wüsten anderer Leute (wie in Fig.25.5 auf Seite 201), oder beides.



Fig.30.2: Ein solares Warmwassermodul, das heißes Wasser für eine Familie in Michigan bereitstellt. Die Pumpe des Systems wird von dem kleinen PV-Modul links angetrieben.

Wiederholung der Berechnungen für Nordamerika

Der Durchschnittsamerikaner verbraucht 250 kWh pro Tag. Können wir diese Vorgabe mit Erneuerbaren erreichen? Was, wenn wir schockierende Effizienz-Maßnahmen einführen (wie sparsame Autos oder Hochgeschwindigkeitszüge), so dass die Amerikaner ins Elend des Lebensstandards eines Europäers oder Japaners von lediglich 125 kWh/d gestürzt würden?

Wind

Eine Studie von Elliott et al. (1991) eruierte das Windenergiepotential der USA. Die windigsten Gebiete sind North Dakota, Wyoming und Montana. Sie berechneten, dass über die gesamten Staaten 435.000 km² Windfläche ausgebeutet werden könnte, ohne dass dadurch zu vielen die Nackenhaare aufstehen müssten, und dass die dort erzeugte Elektrizität 4.600 TWh pro Jahr wäre, etwa 42 kWh/d/p gleichmäßig auf 300 Millionen Amerikaner verteilt. Die Berechnungen gingen von einer mittleren Energiedichte von 1,2 W/m² aus – weniger als die 2 W/m², die wir in Kapitel 4 zu Grunde legten. Die Fläche dieser Windfarmen, 435.000 km², ist etwa die Fläche Kaliforniens. Die erforderlichen Wind-Anlagen (bei einem Load-Faktor von 20%) hätten eine Kapazität von 2.600 GW, was einen 200fachen Zuwachs gegenüber dem Bestand der USA bedeutet.

Offshore-Wind

Wenn wir die seichten Küstengewässer mit einer Fläche etwa gleich der Summe von Delaware und Connecticut (20.000 km², ein substantieller Anteil der gesamten flachen Küstengewässer der US-amerikanischen Ostküste) mit Windparks füllen, die eine Leistungsdichte von 3 W/m² erreichen, erhalten wir eine mittlere Leistung von 60 GW. Das sind 4,8 kWh/d/p auf 300 Millionen Menschen verteilt. Die erforderlichen Anlagen wären 15mal so viel wie die derzeit bestehenden Anlagen der USA.

Geothermie

Ich habe die MIT Geothermie-Studie (Massachusetts Institute of Technology, 2006) in Kapitel 16 erwähnt. Die Autoren sind überzeugt vom Geothermie-Potential Nordamerikas, besonders in den westlichen Staaten, wo es heißeren Fels gibt. „Mit einer vernünftigen Investition in F&E sollten Hot-dry-Rock-Verfahren (HDR, auch enhanced geothermal system, EGS, bezeichnet) 100GW(el) oder mehr an Generatorkapazität bereitstellen, die in den nächsten 50 Jahren zu wettbewerbsfähigen Kosten arbeiten können. Darüber hinaus bieten HDR-Verfahren eine zuverlässige Energiequelle auf sehr lange Sicht.“ Nehmen wir an, sie hätten recht. 100 GW Elektrizität sind 8 kWh/d/p bei 300 Millionen Menschen.

Wasserkraft

Die Wasserkraftwerke in Kanada, USA und Mexiko erzeugen etwa 660 TWh pro Jahr. Verteilt auf 500 Millionen Menschen sind das 3,6 kWh/d/p. Könnte die Wasserkraft in Nordamerika verdoppelt werden? Dann wären das 7,2 kWh/d/p.

Was noch?

Bisher haben wir 42 + 4,8 + 8 + 7,2 = 62 kWh/d/p abgedeckt. Nicht einmal genug für ein europäisches Existenzminimum! Ich könnte verschiedene andere Optionen anführen wie nachhaltiges Verbrennen der kanadischen Wälder in Heizkraftwerken. Doch statt das Leiden zu verlängern, wenden wir uns doch dem fetten Brocken zu: CSP – Sonnenkraftwerke. Fig.30.3 zeigt die Fläche in Nordamerika, die jeden dort (500 Millionen Menschen) mit einer mittleren Leistung von 250 kWh/d versorgt.

Die Grundlast

Nordamerikanische Erneuerbare ohne Solar reichen nicht zum Überleben. Nordamerika braucht also Solarkraftwerke in seinen Wüsten oder Kernkraft, oder beides.

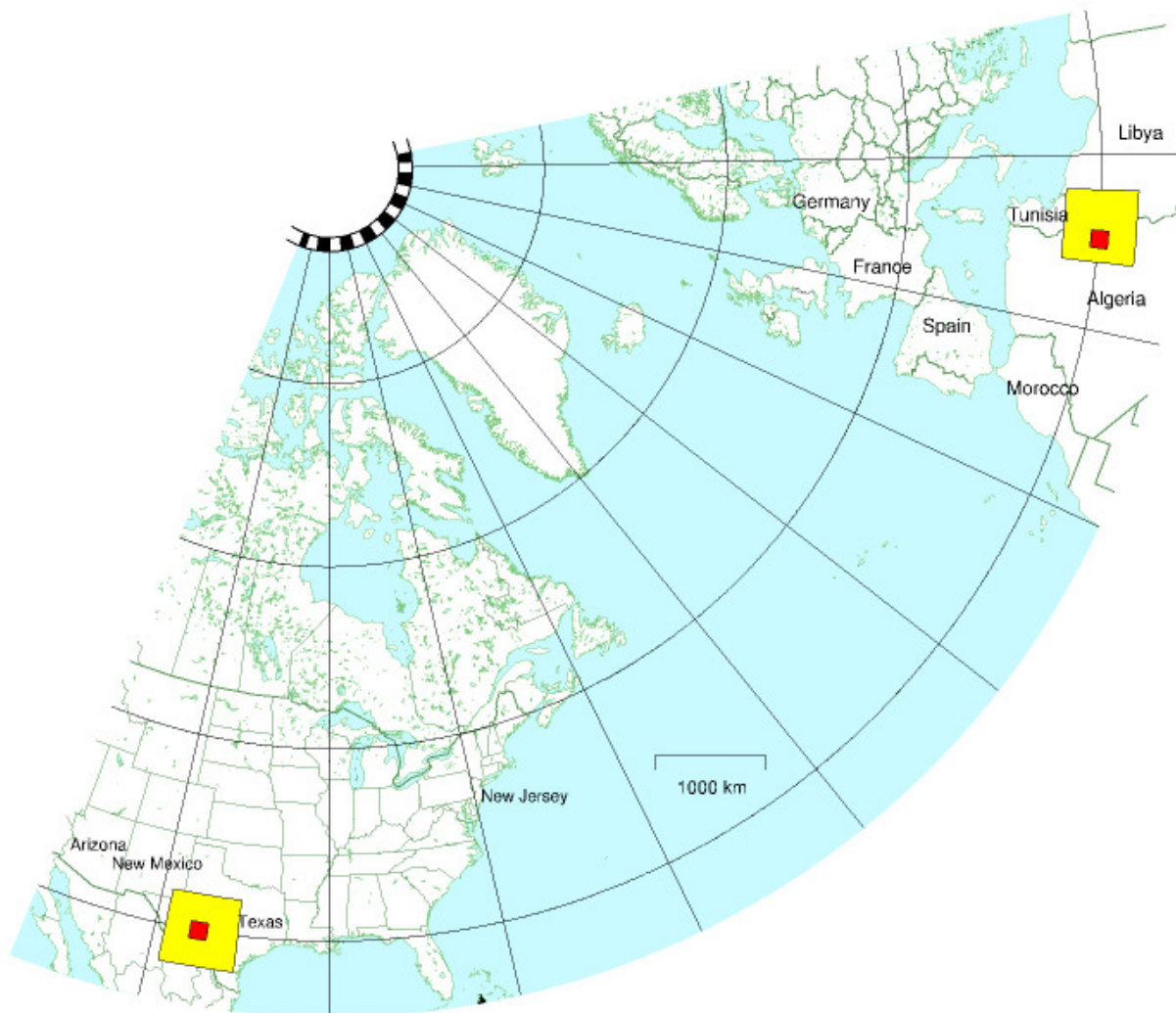


Fig.30.3: Das kleine Viereck schlägt wieder zu. Das 600km x 600km Quadrat in Nordamerika würde, vollständig gefüllt mit CSP, genug Strom liefern um 500 Millionen Menschen mit dem mittleren amerikanischen Verbrauch von 250 kWh/d zu versorgen. Die Karte enthält auch das 600km x 600km Quadrat in Afrika, das wir früher schon erwähnten. Ich habe wie dort eine Leistungsdichte von 15 W/m² angenommen.

Die Fläche eines gelben Quadrates ist etwas größer als Arizona, und 16mal größer als New Jersey. Innerhalb jedes größeren Quadrates ist ein kleineres mit 145km x 145km, das für die Fläche steht – einmal New Jersey –, die man benötigt, um 30 Millionen Menschen mit 250 kWh pro Tag pro Person zu versorgen.

Wiederholen der Berechnungen für die gesamte Welt

Wie können 7 Milliarden Menschen mit der Energie versorgt werden, die dem europäischen Lebensstandard entspricht, sagen wir 80 kWh/d/p?

Wind

Die herausragenden Punkte in der Welt mit starken dauerhaften Winden sind die zentralen Staaten der USA (Kansas, Oklahoma); Saskatchewan in Kanada; die südlichen Enden von Argentinien und Chile; Nordost-Australien; Nordost- und Nordwest-China;

Nordwest-Sudan; der Südwesten von Südafrika; Somalia, Iran und Afghanistan. Und überall Offshore außer in einem Streifen von 60 Grad um den Äquator.

Für unsere globalen Abschätzungen nehmen wir die Zahlen von Greenpeace und der European Wind Energy Association: „die insgesamt verfügbaren Windressourcen werden weltweit auf 53.000 TWh pro Jahr geschätzt“, das sind **24 kWh/d pro Person**.

Wasserkraft

Weltweit beläuft sich die Wasserkraft derzeit auf 1,4 kWh/d pro Person. Nach der Website www.ieahydro.org: „Die International Hydropower Association und die International Energy Agency schätzen das weltweit technisch erschließbare Wasserkraftpotential auf 14.000 TWh pro Jahr [6,4 kWh/d/p weltweit], wovon 8.000 TWh/y [3,6 kWh/d/p] derzeit auch als ökonomisch erschließbar erachtet werden. Das meiste Entwicklungspotential bieten Afrika, Asien und Lateinamerika.“

Gezeitenkraft

Es gibt einige Plätze auf der Welt mit ähnlichem Gezeitenpotential wie die Severn-Mündung (Fig.14.8). In Argentinien gibt es zwei Standorte: San José und Golfo Nuevo; Australien hat Walcott Inlet; USA und Kanada teilen sich die Bay of Fundy; Kanada hat Cobequid, Indien den Golf von Khambat, die USA Turnagain Arm und Knik Arm und Russland hat Tugur.

Und dann ist da noch der Weltsieger, ein Ort namens Penzhinsk in Russland mit einem Potential von 22 GW – zehnmal größer als der Severn!

Kowalik (2004) schätzt, dass weltweit 40-80 GW Gezeitenkraft erzeugt werden könnte. Bei 6 Milliarden Menschen sind das **0,16-0,32 kWh/d/ pro Person**.

Wellen

Wir können die maximal erzeugbare Leistung von Wellen abschätzen, indem wir die Länge der benutzbaren Küsten (etwa 300.000 km) mit der typischen Leistung pro Längeneinheit Küste (10 kW pro Meter) multiplizieren: das ergibt eine Rohleistung von 3000 GW.

Nehmen wir an, dass 10% dieser Leistung von Energie-Systemen aufgenommen und mit 50% Effizienz in Strom umgewandelt werden, dann liefern **Wellenkraftwerke 0,5 kWh/d pro Person**.

Geothermie

Nach D. H. Freeston vom Auckland Geothermal Institute gibt es geothermische Leistung von 4GW weltweit in 1995 – das ist 0.01 kWh/d pro Person. Nehmen wir an, dass die MIT-Autoren von Seite 259 recht haben und dass die Welt mit Amerika vergleichbar ist, eröffnet uns die Geothermie **8 kWh/d pro Person**.

Sonne für Energiepflanzen

Die Leute sind ganz begeistert von Energiepflanzen wie Jatropha, das behauptetermaßen nicht mit Nahrungsmitteln um Land konkurrieren muss, weil es auch auf Wüstenboden wächst. Die Leute sollten auf die Zahlen sehen, bevor sie begeistert sind. Die Zahlen für Jatropha sind auf Seite 311. Auch wenn ganz Afrika komplett mit Jatropha Plantagen überzogen wäre, würde die erzeugte Leistung bei 6 Milliarden Menschen gerade **8 kWh/d/p** beitragen (was nur ein Drittel des gegenwärtigen Ölverbrauchs ist). Sie können mit Jatropha sicher ihre Öl-Abhängigkeit nicht loswerden!

Lassen Sie uns eine obere Schranke abschätzen, wie viel Leistung Energiepflanzen für die ganze Welt liefern können, indem wir dieselbe Methode anwenden wie für Deutschland in Kapitel 6b: Stellen Sie sich vor, wir nähmen alles ackerfähige Land und

widmeten es Energiepflanzen. 18% der Landfläche ist derzeit Acker- und Kulturland – eine Fläche von 27 Millionen km². Das sind **4.500 m² pro Person**, aufgeteilt auf 6 Milliarden Menschen. Nehmen wir eine Leistungsdichte von 0,5 W/m² und Verluste von 33% bei Verarbeitung und Anbau, ergibt sich für Energiepflanzen, wenn sie die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche übernehmen, **36 kWh/d pro Person**. Jetzt ist das vielleicht eine Unterschätzung, weil wir in Fig.6.11 (Seite 53) sahen, dass brasilianisches Zuckerrohr eine Leistungsdichte von 1,6 W/m² liefern kann, also etwa dreimal mehr als obige Annahme. OK, vielleicht haben brasilianische Energiepflanzen eine Art Zukunft. Doch würde ich lieber zur nächsten Option übergehen.

Solarheizung, Photovoltaik, CSP-Sonnenkraftwerke

Bei solarthermischer Wassererwärmung muss man nicht lange überlegen. Sie funktioniert fast überall auf der Welt. China ist Weltführer in dieser Technologie. Es gibt über 100GW solarthermische Anlagenkapazität weltweit, über die Hälfte davon in China.

„PV-Anlagen wären technisch machbar in Europa, doch hielt ich sie für zu teuer. Ich hoffe natürlich, dass ich da falsch liege. Es wäre wundervoll, wenn die Kosten für PV-Module fallen würden wie die Kosten für Computer in den letzten 40 Jahren.“ *schrieb David MacKay noch vor drei Jahren. Nun, seine Hoffnungen haben sich weitgehend erfüllt.

◦Meine Vermutung ist, dass in vielen Regionen die beste Solartechnologie für die Stromerzeugung die CSP-Sonnenkraftwerke darstellen werden, die wir auf Seite 200 und 260 (Fig.30.3) diskutierten. Auf diesen Seiten hatten wir bereits eingeführt, dass eine Milliarde Menschen in Europa und Nordafrika mit landesgroßen Solarkraftwerken in den Wüsten am Mittelmeer und eine halbe Milliarde Nordamerikaner durch ähnlich große Kraftwerke in den Wüsten der USA und Mexikos versorgt werden könnten. Ich überlasse es dem Leser als Übung, geeignete Wüsten zu finden, um die verbleibenden 4,5 Milliarden Menschen zu versorgen.

Die Grundlast

Die nicht-solaren Erneuerbaren addieren sich wie folgt: Wind 24 kWh/d/p, Wasser 3,6 kWh/d/p, Gezeiten 0,3 kWh/d/p, Wellen 0,5 kWh/d/p, Geothermie 8 kWh/d/p – insgesamt 36 kWh/d/p. Unser Ziel war eine spät-europäische Verbrauchsrate von 80 kWh/d/p. Wir haben ein klares Ergebnis: die nicht-solaren Erneuerbaren mögen „groß“ sein, aber nicht groß genug. Um einen Plan zu erstellen, der aufgeht, müssen wir eine oder mehrere Formen solarer Energie hinzunehmen. Oder Kernkraft. Oder beides.

Sheffield	28%
Edinburgh	30%
Manchester	31%
Cork	32%
London	34%
Köln	35%
Kopenhagen	38%
München	38%
Paris	39%
Berlin	42%
Wellington, NZ	43%
Seattle	46%
Toronto	46%
Detroit, MI	54%
Winnipeg	55%
Peking 2403	55%
Sydney 2446	56%
Pula, Kroatien	57%
Nizza, Frankreich	58%
Boston, MA	58%
Bangkok, Thailand	60%
Chicago	60%
New York	61%
Lissabon, Portugal	61%
Kingston, Jamaica	62%
San Antonio	62%
Seville, Spanien	66%
Nairobi, Kenia	68%
Johannesburg, SA	71%
Tel Aviv	74%
Los Angeles	77%
Upington, SA	91%
Yuma, AZ	93%
Sahara	98%

Tabelle 30.4: Weltweite Sonnenscheinzahlen

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

259 Nordamerika Offshore-Wind www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html

260 Nordamerika braucht also Solarkraftwerke in seinen Wüsten, Kernkraft, oder beides. Für Google's 2008er Plan für eine 40%ige Reduktion der fossilen Brennstoffe in den USA, siehe Jeffery Greenblatts Artikel *Clean Energy 2030* [3lcv9c]. Die Hauptpunkte dieses Plans sind Effizienzmaßnahmen, Elektrifizierung des Transports und Erneuerbare Elektrizitätsproduktion. Der Plan zur Elektrizitätsproduktion enthält

10,6 kWh/d/p	Windkraft,
2,7 kWh/d/p	Photovoltaik,
1,9 kWh/d/p	Concentrating Solar Power (CSP),
1,7 kWh/d/p	Biomasse,
und 5,8 kWh/d/p	geothermische Energie

bis 2030. Das ist insgesamt eine Zunahme der Erneuerbaren von 23 kWh/d/p. Sie gehen zudem von einem kleinen Zuwachs bei Nuklearenergie aus, von 7,2 kWh/d/p auf 8,3 kWh/d/p, und keinen Veränderungen bei der Wasserkraft. Erdgas würde weiterhin verwendet, mit einem Beitrag von 4 kWh/d/p.

261 Weltweit beläuft sich die Wasserkraft derzeit auf 1,4 kWh/d pro Person Quelle: www.ieahydro.org/faq.htm.

264 das ergibt eine Rohleistung von 3000 GW Siehe Quayle und Changery (1981).

265 geothermische Leistung von 4GW weltweit in 1995. Freeston (1996).

261 Energiepflanzen Siehe Rogner (2000) zu Abschätzungen ähnlich wie meine.

Weiterführende Literatur: Das *Nature* magazine brachte eine achtseitigen Artikel, wie die Welt mit Energie versorgt werden kann (Schiermeier et al., 2008).