

Anhang D: Solar II

Photovoltaik

♦In Kapitel 6a hatten wir die Leistung von PV-Farmen abgeschätzt. Wir hatten für optimal nach Süden geneigte Module 29 W/m^2 Modulfläche berechnet. Wären die Module waagrecht angeordnet, läge ihre Leistung bei 26 W/m^2 . Fig. D.1a zeigt die Abhängigkeit des Sonnenertrages für beliebige Anordnung der Module.

Freiflächenanlagen in Solarparks könnten also theoretisch 26 W/m^2 produzieren. Tatsächlich erreichte Leistungsdichten liegen aber zwischen 5 und 10 W/m^2 . Das liegt an der geometrischen Anordnung der Module in den Solarparks. Die Module in den Solarparks sind 30 Grad nach Süden geneigt in Reihen angeordnet. Damit nicht der Schatten der einen Reihe auf die Module der nächsten fällt und damit den Ertrag mindert, muss ein passender Abstand zwischen den Modulreihen eingehalten werden. Dieser Abstand sollte etwa dreimal so groß wie die Modulhöhe sein, um auch im Winter bei niedrigem Sonnenstand eine Verschattung zu vermeiden, siehe Fig. D.1b. Für einen Quadratmeter Modul benötigen wir so um die 4 m^2 Bodenfläche und erhalten so $\frac{1}{4} \times 29 \text{ W/m}^2 = 7 \text{ W/m}^2$ Leistungsdichte. Zusätzlich benötigt man Abstände für die Einzäunung, Zufahrtswege und Trafostationen, die die Leistungsdichte weiter vermindern, so dass reale Werte bei etwa 5 W/m^2 liegen.

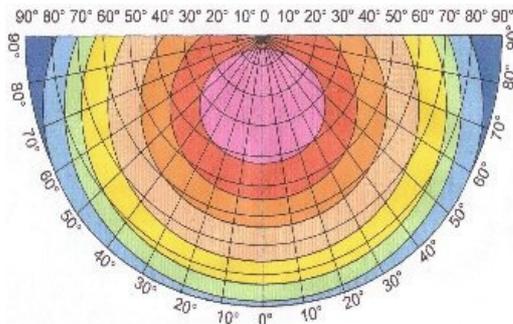


Fig. D.1a: Ertrag von Solarmodulen in Abhängigkeit von der Ausrichtung. Die obere Skala bezeichnet die Halbkreise gleicher Neigung (0=waagrecht), die untere Skala die Modulausrichtung (0=Süden). Der Kreis in Pink bezeichnet den Bereich mit 95-100% Ertrag und hat sein Zentrum bei knapp 30 Grad Neigung, in Südrichtung. Jede Farbabstufung bedeutet 5% Leistungsunterschied.

Könnte man durch eine andere Modulanordnung die Leistungsdichte verbessern? Im Prinzip schon: Wenn wir die Module waagrecht anordnen und die gesamte Fläche auslegen, liefern sie 26 W/m^2 , rechnen wir wieder Zuwegung und Abstandsflächen ein, wären vielleicht um die 20 W/m^2 realistisch, eine Vervierfachung der Energiedichten bestehender Solarparks. Doch zwei Gründe sprechen gegen eine solche Anordnung. Der erste Grund ist ein wirtschaftlicher: Module sind teuer, Fläche vergleichsweise billig. Die Module tragen zu 80% an den Anlagenkosten bei. Wenn wir sie waagrecht legen, verringert das den Ertrag pro Modul um etwa 10%, wir benötigen also für dieselbe Anlagenleistung etwa 10% mehr Module und das verursacht entsprechend höhere Kosten. Diese Zusatzkosten können aus ökonomischer Sicht durch die Einsparung an Fläche, die durch eine waagrechte Anordnung erzielt wird, nicht aufgefangen werden. Es ist wirtschaftlicher, das investierte Kapital auf mehr Fläche zu verteilen, damit es mehr „Leistung pro €“ erwirtschaften kann.

Der zweite Grund, der gegen waagrecht angeordnete Module spricht, ist ein praktischer: Module verschmutzen. Staubpartikel in der Luft, Blütenpollen von Bäumen und Wiesen der Umgebung, auch Laub oder Vogelkot können sich auf der Moduloberfläche ablagern und den Lichteinfall auf die photosensitiven Schichten behindern. Schräggestehende Module werden bei Regen automatisch wieder saubergewaschen. Je größer der Neigungswinkel, um so größer ist die reinigende Wirkung des ablaufenden Niederschlagswassers.



Fig. D.1b: Anordnung der Module einer Solarfarm, hier der Solarpark Königsbrück bei Dresden (Foto: Wikimedia Commons). Der Abstand der Modulreihen zueinander ist etwa das drei- bis vierfache der Modulflächen-Höhe, gemessen vom oberen zum unteren Rand.

Die Kosten des Solarstroms

Dies ist kein Buch über Ökonomie und wir hatten ja bereits in Kapitel 1 erwähnt, wie sehr eine rein ökonomische Denkweise den Blick auf das Wesentliche verstellen kann. Ökonomische Fakten ändern sich rasch, aber die physikalischen Rahmenbedingungen, Grenzen und Möglichkeiten einer Technologie bleiben weitgehend bestehen.

Ein gutes Beispiel für die raschen ökonomischen Veränderungen, die man durch geeignete öffentliche und politische Maßnahmen erreichen kann, ist die Entwicklung der Photovoltaik in Deutschland während der letzten 10 Jahre.

Noch vor wenigen Jahren waren PV-Module so teuer, dass viele diese Technologie als wirtschaftlicher Sicht für nicht zukunftsfähig erachteten. Preise für Module und die zu ihrer Förderung erforderlichen Einspeisevergütungen lagen bei etwa dem Vierfachen ihres heutigen Wertes: Ab 2013 wird voraussichtlich Strom aus PV-Freiflächenanlagen mit 13 c€/kWh vergütet, während 2004 die Vergütungen noch bei 46-57 c€/kWh lagen.

Eine erstaunliche Dynamik ist, angetrieben von der gezielten Förderung durch das deutsche EEG, das Gesetz zum Vorrang erneuerbarer Energien, in der technischen und wirtschaftlichen Entwicklung der Photovoltaik zu beobachten. Sie sorgte dafür, dass aus einer experimentellen Zukunfts- und Nischentechnologie heute eine mindestens gleichberechtigte Säule der Energieversorgung entstand. Sie führt zu einer exponentiellen Wachstumsentwicklung: In einem Zeitraum von etwa 16 Monaten verdoppelt sich die installierte PV-Leistung Deutschlands.

Lassen Sie mich an Hand einiger grob vereinfachten Abschätzungen die volkswirtschaftlichen Stromgestehungskosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien vergleichen. In Tabelle D.1c habe ich Preise für einige Energiequellen zusammengestellt. Dabei sind auch öffentliche Subventionen mitberücksichtigt, was zu einigen Abgrenzungsproblemen führt und die Vergleichbarkeit erschwert. Dennoch ist ein Vergleich hilfreich, um sich ein grobes Bild zu verschaffen: PV liegt bei 8-13 c€/kWh, andere Technologien im Bereich 5,5-11 c€/kWh. Wir sehen: PV-Strom ist zwar teuer, aber auch nicht *unendlich* teuer.

Die Stromerzeugung mit Geothermie ist heute in einer ähnlichen Situation wie die Photovoltaik von einigen Jahren: Geothermiestrom ist um ein Vielfaches teurer als die gängigen Alternativen, man rechnet mit etwa 22 c€/kWh unter günstigen Rahmenbedingungen. Auch das Fündigkeitsrisiko (wegen der großen Unsicherheiten über die Gegebenheiten in der Bohrtiefe) schreckt Investoren ab. Wäre es denkbar, dass die Geothermie in den nächsten 10 Jahren eine ähnliche Entwicklung durchläuft wie PV in den letzten 10? Welche politischen Rahmenbedingungen müssten wir schaffen, um der Geothermie zum Durchbruch zu verhelfen und sie – ebenso wie PV – zu einem weiteren Standbein unserer Energieversorgung zu machen? Ich weiß es nicht.

<p>PV-Anlage 8 c€/kWh EEG-Vergütung 2013 13 c€/kWh</p>	<p>Beispiel: Der derzeit größte Solarparks Deutschlands in Meuro bei Senftenberg: 70.000 kWp, Projektumfang 140 Mio € (Quelle: [3ze9n6e]). Als Betriebszeit werden 25 Jahre (die Laufzeit der Herstellergarantie für die Module) angenommen. Betriebs- und Wartungskosten wurden dabei vernachlässigt. Die Stromvergütung nach EEG ist höher: Sie beinhaltet neben Betrieb und Wartung auch Anteile für die Finanzierungskosten (Zinsen) und geht von einer Amortisationszeit von 10-20 Jahren aus.</p>
<p>Windkraft 6 c€/kWh</p>	<p>Beispiel Windanlage Dürrwangen (Quelle: [6j9vaqz]): insgesamt 6,9 MW in 3 Anlagen, 11,7 Mio € Anschaffungskosten, 13 Mio kWh/Jahr, Investitionskosten 6 c€/kWh bei angenommenen 15 Jahren Betrieb. Offshore-Anlagen sind deutlich teurer, allein die Kabelzuleitungen aufs offene Meer kosten oft Milliarden (Quelle: [6hnz24h])</p>
<p>Kohlekraftwerke 5,5 c€/kWh mit Berücksichtigung der Steinkohle- subventionen 11 c€/kWh</p>	<p>Beispiel: Das derzeit in Bau befindliche Kohlekraftwerk Hamburg-Moorburg (Quelle: Vattenfall) mit 1640 MW verursacht 2,6 Mrd € Baukosten. Energieertrag nach Abzug des Eigenverbrauches (7%): 6200 kWh/kW/a, Investitionskosten somit 1,3 c€/kWh. Brennstoffkosten (Stand 2008) 3,3 c€/kWh und CO₂-Abgaben (ca.1 kg CO₂ pro kWh, bei 10 €/t also 1 c€/kWh). Dazu kommen Steinkohlesubventionen: 200 €/t Förderung 2008 (Quelle RAG, Wikipedia), bei einem Verbrauch von ca. 0,8 kg/kWh wären das 16 c€/kWh, allerdings wird nicht nur subventionierte Kohle in den Kraftwerken verstromt, so dass wir eine bessere Abschätzung über den bis 1995 zu zahlenden „Kohlepfennig“, einen Wälzmechanismus der Kohlesubvention auf den Strompreis, erhalten können: Dieser lag zuletzt bei ca. 9 % des Endkunden-Strompreises, was heute ca. 2,5 c€/kWh entspricht. Konsequenterweise müsste man diesen Betrag jedoch rein auf den Kohlestrom beziehen, der im aktuellen Strommix etwa 40% beträgt, dann ergibt sich ein Fördervolumen von 5,6 c€/kWh.</p>
<p>Kernkraftwerke 6,3 c€/kWh</p>	<p>Fördervolumen Kernenergie 1950-2010: ca. 204 Mrd. € (siehe: Meyer und Küchler [2fwnrlh]). Im selben Zeitraum wurden ca. 4,5 TWh Atomstrom erzeugt, also ergibt sich eine Förderung von 4,3 c€/kWh. Der Marktpreis von Atomstrom wird mit ca. 2 c€/kWh angenommen. Ein „Risikobeitrag“, also ein fiktiver Versicherungsanteil gegen Atomunfälle, ist hier nicht berücksichtigt.</p>

Tabelle D.1c: Grobe Kostenabschätzungen einiger Stromerzeugungsvarianten

Solare Biomasse

◦Auf Seite 52 hatten wir vier Optionen für solare Biomasse aufgezählt:

1. Kohlesubstitution
2. Erdölsubstitution
3. Nahrung für Menschen und andere Tiere
4. Verbrennen von landwirtschaftlichen Nebenprodukten.

Wir werden für jeden dieser Prozesse den maximalen plausiblen Beitrag abschätzen. In der Praxis erfordern viele dieser Methoden so viel Energie, die innerhalb des Prozesses aufgewendet werden muss, dass diese Prozesse schwerlich einen Netto-Beitrag leisten können (Fig.6.14). Doch in den folgenden Überlegungen werde ich solche Kosten der inneren Energie vernachlässigen.



Fig.D.2a: Zwei Bäume



Fig.D.2b: Raps. Macht man daraus Biodiesel, ist die Leistung pro Landfläche $0,13 \text{ W/m}^2$. Foto von Tim Dunne

Energiepflanzen als Kohlesubstitution

Wenn wir in Deutschland Energiepflanzen wie Weide, Miscanthus oder Pappel (die eine mittlere Energiedichte von $0,5 \text{ W}$ pro Quadratmeter Land haben) anpflanzen und sie dann in ein 40%-effizientes Heizkraftwerk schieben, dann ist die erzielbare Leistung pro Landfläche bei $0,2 \text{ W/m}^2$. Wäre ein Achtel Deutschlands mit diesen Pflanzen bedeckt (500 m^2 pro Person), wäre die erzielbare Gesamtleistung $2,5 \text{ kWh/d}$ pro Person.

Erdölsubstitution

Es gibt einige Möglichkeiten, Pflanzen in Flüssigtreibstoff zu verwandeln. Für jede Methode drücke ich ihr Potential in Leistung pro Flächeneinheit aus (wie in Fig. 6.11).

Englands hauptsächliche Biodiesel-Quelle, Raps

Raps wird in England typischerweise im September gesät und im darauffolgenden August geerntet. Derzeit wird auf 450.000 ha Ackerfläche in England jedes Jahr Raps angebaut (das sind etwa 2 % Englands). Rapsfelder produzieren 1200 Liter Biodiesel pro Hektar pro Jahr; Biodiesel hat eine Energie von $9,8 \text{ kWh/l}$; also ist das eine Energie pro Fläche von $0,13 \text{ W/m}^2$.

Würden wir 25% der englischen Landfläche zum Rapsanbau nutzen, könnten wir Biodiesel im Umfang von 3,1 kWh/d pro Person erzeugen.

Ethanol aus Zuckerrüben

Der Zuckerrübenanbau in England liefert beeindruckende 53 t pro ha Jahresertrag. Aus 1 t Zuckerrüben lassen sich 108 Liter Bioethanol gewinnen. Bioethanol hat einen Energiegehalt von 6 kWh pro Liter, also erzielt dieser Prozess eine Leistung pro Landfläche von 0,4 W/m², erforderlichen Energieeinsatz nicht mitgerechnet.

Bioethanol aus Zuckerrohr

Wo Zuckerrohr angebaut werden kann (z.B. in Brasilien), ist dessen Ertrag 80 Tonnen pro Hektar pro Jahr, was 17.600 l Ethanol ergibt. Mit 6 kWh pro Liter (Energiegehalt von Ethanol) erzielt dieser Prozess eine Leistung pro Landfläche von 1,2 W/m².

Bioethanol aus Getreide in den USA

Die Leistung pro Landfläche in Bioethanol aus Getreide ist erstaunlich niedrig. Lassen Sie mich nur zum Spaß die Zahlen zuerst in archaischen Einheiten ausdrücken. 1 Acre produziert 122 Bushel (1 US-Bushel entspricht 8 US-Gallonen) Getreide pro Jahr, was 122 x 2,6 US-Gallonen Ethanol ergibt, was bei einem Energiegehalt von 84.000 BTU pro Gallone eine Leistung pro Landfläche von 0,2 W/m² bedeutet; der benötigte Energie-Input, um das Getreide in Ethanol zu verwandeln, liegt bei 83.000 BTU pro Gallone, also wird 99% der Energie durch den Prozess selbst verbraucht, und es verbleibt eine Netto-Leistung pro Landfläche von 0,002 W/m². Will man signifikant Energie aus dem Getreide-zu-Ethanol-Prozess gewinnen, müsste man auch alle Nebenprodukte ausbeuten. Einschließlich der Energie in den Nebenprodukten kommt die Netto-Leistung pro Landfläche auf etwa 0,05 W/m².

Zellulose-Ethanol aus Rutenhirse

Zellulose-Ethanol – die wundervolle „nächste Generation“ von Biotreibstoffen? Schmer at al. (2008) fanden heraus, dass die Nettoenergie von Rutenhirse, die fünf Jahre lang auf minderwertigem Boden bei 10 US-Framen angebaut wurde, bei 60 GJ pro Hektar pro Jahr lag, das sind 0,2 W/m². „Diese Grundlagenstudie spiegelt das genetische Material und die Agrartechnologie der Jahre 2000 und 2001 wider, in denen die Aussaat erfolgte. Fortschritte in Genetik und Agrartechnologie könnten die energetische Nachhaltigkeit und die Biotreibstoff-Ausbeute der Rutenhirse weiter verbessern.“

	Energiedichte (kWh/kg)
Weichholz	
- luftgetrocknet	4.4
- ofengetrocknet	5.5
Hartholz	
- luftgetrocknet	3.75
- ofengetrocknet	5.0
Schreibpapier	4.0
Hochglanzpapier	4.1
Zeitungspapier	4.9
Karton	4.5
Kohle	8
Stroh	4.2
Hühnermist	2.4
Allg. Industrieabfall	4.4
Mdizinischer Abfall	3.9
Hausmüll	2.6
Aufbereiteter Müll	5.1
Reifen	8.9

Tabelle D.3: Brennwerte von Holz und ähnlichen Dingen. Quellen: Yaros (1997); Ucuncu (1993), Digest of UK Energy Statistics 2005.



Auch Jatropha hat eine geringe Leistungsdichte pro Landfläche

Jatropha ist eine ölhaltige Feldfrucht, die am besten in trockenen tropischen Regionen (300-1000 mm Regen pro Jahr) gedeiht. Sie liebt Temperaturen zwischen 20 und 28 °C. Der erwartete Ertrag in heißen Ländern auf gutem Boden liegt bei 1600 l

Biodiesel pro ha pro Jahr. Pro Landfläche sind das $0,18 \text{ W/m}^2$. Auf Ödland ist der Ertrag $583 \text{ l/ha pro Jahr}$, das sind $0,065 \text{ W/m}^2$.

Wenn die Menschen entscheiden, 10% von Afrika für die Erzeugung dieser $0,065 \text{ W/m}^2$ zu nutzen, und man diese Energie auf 6 Milliarden Menschen weltweit verteilt, wie viel würde das jedem von uns bringen? $0,8 \text{ kWh/d/p}$. Zum Vergleich: Der weltweite Ölverbrauch liegt bei 80 Millionen Barrel pro Tag, was auf 6 Milliarden Menschen verteilt 23 kWh/d/p entspricht. Wenn also sogar ganz Afrika mit Jatropha-Plantagen überzogen wäre, wäre die so erzeugte Energie gerade ein Drittel des weltweiten Ölverbrauchs.

Wie steht es mit Algen?

Auch Algen sind Pflanzen, daher gilt für sie alles oben Gesagte analog. Schleimige Unterwasserpflanzen sind bei der Photosynthese auch nicht effizienter als ihre Cousinen an Land. Doch es gibt einen Trick, den ich nicht erwähnt habe, der im Algen-zu-Biodiesel-Bereich gängige Praxis ist: Man züchtet die Algen in Wasser, das hoch angereichert ist mit Kohlendioxid, das aus Kraftwerks- oder anderen Industrie-Abgasen gesammelt sein könnte. Pflanzen tun sich viel leichter bei der Photosynthese, wenn das CO_2 für sie bereits konzentriert vorliegt. Ron Putt von der Auburn University sagt, dass Algen auf sonnigen Plätzen in Amerika in Becken, in die auf 10% konzentriertes CO_2 eingeleitet wird, eine Wachstumsrate von $30 \text{ g pro qm pro Tag}$ erreichen können und so $0,01 \text{ Liter Biodiesel pro qm und Tag}$ produzieren. Das entspricht einer Leistungsdichte pro Beckenfläche von 4 W/m^2 - vergleichbar mit der einer bayerischen PV-Freiflächenanlage. Wenn man mit einem typischen Auto (12 km pro Liter) 50 km pro Tag fahren will, benötigt man also $420 \text{ qm Algenbecken}$, um das Auto zu betreiben. Zum Vergleich: Die Fläche pro Person in Deutschland ist 4000 qm , wovon 100 m^2 Wasser sind. Vergessen Sie aber nicht, dass es wesentlich ist, diese Becken mit konzentriertem CO_2 zu beschicken. Also ist diese Technik auf Landflächen beschränkt – wie viel von Deutschland können wir in Algenbecken verwandeln? – und auf die Verfügbarkeit von konzentriertem CO_2 angewiesen, dessen Einfang mit Energiekosten verbunden ist (ein Thema, das wir in Kapitel 23 und 31 diskutierten). Lassen Sie uns die Beschränkung durch die CO_2 -Verfügbarkeit genauer abschätzen. Um Algen mit $30 \text{ g pro qm und Tag}$ wachsen zu lassen, benötigt man mindestens $60 \text{ g CO}_2 \text{ pro qm und Tag}$ (weil das CO_2 -Molekül mehr Masse pro Kohlenstoffatom hat als die Moleküle in der Alge). Würde man alles CO_2 aller Heizkraftwerke einfangen (etwa $2\frac{1}{2}$ Tonnen pro Jahr pro Person, Daten für England), könnte das 230 qm der genannten Algenbecken pro Person beliefern – etwa 6% der gesamten Landfläche. Diese Fläche würde Biodiesel entsprechend einer Leistung von $24 \text{ kWh/d pro Person}$ liefern, wenn wir davon ausgehen, dass die Zahlen aus dem sonnigen Amerika auch für hier zutreffen. Eine plausible Vision? Vielleicht auf einem Zehntel dieses Umfangs? Ich überlasse Ihnen die Entscheidung.

Wie steht's mit Algen im Meer?

Erinnern Sie sich: Die Algen-zu-Biodiesel-Geschichte füttert die Algen immer mit konzentriertem CO_2 . Gehen wir damit aufs Meer, wird dieses CO_2 -Pumpen wohl nicht möglich sein. Und ohne das konzentrierte CO_2 fällt die Algen-Produktivität auf ein Hundertstel ab. Um mit Algen im Meer einen nennenswerten Beitrag zu leisten, müssten die Algenfarmen Landesgröße haben.

Wie steht's mit Algen, die Wasserstoff produzieren?

Der Ansatz, den Algen-Schleim im Sonnenlicht Wasserstoff produzieren zu lassen, ist eine clevere Idee, weil er eine Menge Schritte überspringt, die normalerweise bei den kohlehydrat-produzierenden Pflanzen erforderlich sind. Jeder chemische Schritt reduziert die Effizienz ein wenig. Wasserstoff kann von einem photosynthetischen System direkt in

einem Schritt produziert werden. Eine Studie des National Renewable Energy Laboratory in Colorado behauptet, dass ein Reaktor gefüllt mit genmodifizierten Grünalgen, der 11 ha der Wüste in Arizona belegt, 300 kg Wasserstoff pro Tag produzieren könne. Wasserstoff enthält 39 kWh pro kg, also liefert diese Algen-Wasserstofffabrik eine Leistung pro Reaktorfläche von 4,4 W/m². Zieht man die zum Betrieb der Anlage erforderliche Elektrizität ab, bleibt eine Nettoleistung von 3,6 W/m². Das ist für mich eine sehr vielversprechende Hausnummer – etwa verglichen mit bayerischen PV-Farmen (5 W/m²).

Nahrungsmittel für Menschen und andere Tiere

Getreide wie Weizen, Hafer, Gerste und Mais haben eine Energiedichte um die 4 kWh pro kg. In England sind Weizenerträge von 7,7 t/ha typisch. Wird der Weizen von Tieren gefressen, hat dieser Prozess eine Leistung pro Landfläche von 0,34 W/m². Wenn 2800 m² pro Person in England (die gesamte landwirtschaftliche Fläche) für solche Feldfrüchte verwendet werden, erzeugt das eine chemische Energie von 24 kWh/d pro Person.

Verbrennen landwirtschaftlicher Nebenprodukte

Wir haben gerade ausgerechnet, dass die Leistung pro Flächeneinheit eines Biomasse-Kraftwerks, das die bestmöglichen Energiepflanzen verbrennt, bei 0,2 W/m² liegt. Wenn wir statt dessen Nahrungspflanzen anbauen und nur die Reste, die wir nicht essen, in den Biomasse-Kraftwerken verbrennen – oder wenn wir die Nahrung in Hühner stecken und nur das, was hinten beim Huhn wieder herauskommt in den Biomassekraftwerken verbrennen – wie viel Leistung können wir dann aus einem Quadratmeter Ackerland herausholen? Machen wir zuerst eine grobe Abschätzung und sehen wir uns dann reale Daten an. Für eine wilde Spekulation nehmen wir einfach an, dass die Nebenprodukte aus der Ernte des halben Ackerlandes Englands (2000 m² pro Person) zu Biomasse-Heizkraftwerken gefahren werden und dort (pro Ackerfläche) 10% des Ertrags der besten Energiepflanzen bringen: 0,02 W/m². Multiplizieren wir das mit 2000 m², erhalten wir 1 kWh/d pro Person.

War ich unfair zum landwirtschaftlichen Abfall, indem ich diese wilde Spekulation machte? Wir können die plausible Energie-Produktion aus diesem Abfall nachrechnen, indem wir die Daten des Prototypen für ein Stroh-Heizkraftwerk in Elean, Südengland, hochskalieren. Der Energie-Output von Elean ist 36 MW und es verbrennt 200.000 Tonnen pro Jahr aus Land seiner Umgebung (50 Meilen Radius). Nehmen wir an, dieselbe Dichte könnte in ganz England erzielt werden, eröffnet das Modell Elean ein Potential von 0,002 W/m². Bei 4000 m² pro Person sind das 8 W pro Person oder 0,2 kWh/d pro Person.

Rechnen wir noch einmal anders herum. Die britische Strohproduktion beträgt 10 Millionen Tonnen pro Jahr, 0,46 kg pro Tag pro Person. Mit 4,2 kWh pro kg hat dieses Stroh eine chemische Energie von 2 kWh/d/p. Würde das gesamte Stroh in 30% effizienten Heizkraftwerken verbrannt – eine Annahme, die sich nicht gut mit Nutztierhaltung verträgt, die eine anderweitige Verwendung von Stroh erfordert – ergäbe dies 0,6 kWh/d pro Person Elektrizitätserzeugung

Deponiegas

Gegenwärtig kommt das meiste des Methangases, das aus Mülldeponien entweicht, von biologischem Material, besonders Essensresten. So lange wir also weiter Essen und Zeitungen wegwerfen, ist Deponiegas eine nachhaltige Ressource – dazu kommt, dass aus klimaschützerischer Sicht das Verbrennen des Methans eine gute Idee ist, weil

Methan ein stärkeres Treibhausgas ist als CO₂. Eine Deponie, die jährlich 7,5 Millionen Tonnen Haushaltsmüll erhält, kann stündlich 50.000 m³ Methan erzeugen.

Für 1994 wurden die Deponiegas-Emissionen zu 0,05 m³ pro Tag pro Person abgeschätzt, was eine chemischen Energie von 0,5 kWh/d pro Person beinhaltet und 0,2 kWh(el)/d pro Person Elektrizität erzeugen könnte, wenn es komplett mit 40% Effizienz verstromt würde. Deponiegas-Emissionen nehmen auf Grund gesetzlicher Änderungen ab und liegen derzeit um etwa 50% niedriger.

Müllverbrennung

SELCHP ("South East London Combined Heat and Power") [www.selchp.com] ist ein 35 MW Kraftwerk, das pro Jahr 420 kt Haushaltsmüll aus London verbrennt. Der Müll wird dort im gesamten verbrannt, ohne Sortierung. Nach der Verbrennung werden Metalle zum Recycling ausgesondert und Problemüll-Schlacken auf Spezialdeponien verbracht. Die verbleibende Asche wird als Recyclingmaterial im Hoch- und Tiefbau verwendet. Der Brennwert des Mülls ist 2,5 kWh/kg und die Effizienz des Kraftwerks liegt bei 21%, so dass 1 kg Müll etwa 0,5 kWh Strom liefert. Der Kohlenstoffausstoß ist etwa 1000 g CO₂ pro kWh. Von den erzeugten 35 MW werden etwa 4 MW innerhalb des Kraftwerks verwendet, um die Maschinen und Filteranlagen zu betreiben.

Skalieren wir diese Idee hoch und nehmen an, jedes Dorf hätte so eine Anlage und jeder würde täglich 1 kg Müll produzieren, erhalten wird 0,5 kWh(el) pro Tag pro Person aus der Müllverbrennung.

Das ist vergleichbar mit der Hausnummer, die wir oben für den Methaneinfang von Deponien abschätzten. Und man kann natürlich nicht beides haben. Mehr Müllverbrennung bedeutet weniger Methan, das aus Deponien entweicht. Vergleiche Fig.27.2 und Fig.27.3 auf Seite 229 für weitere Daten zur Müllverbrennung.



Fig.D.4: SELCHP – Dein Müll ist ihr Geschäft.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 308 Man rechnet mit etwa 22 c€/kWh unter günstigen Rahmenbedingungen: ♦Quelle: Paschen et al. (2003)
- 310 Die mit Weide, Miscanthus oder Pappel erzielbare Leistung liegt bei 0,2 W/m²
◦Quelle: Select Committee on Science and Technology Minutes of Evidence – Memorandum from the Biotechnology & Biological Sciences Research Council [www.publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldsctech/126/4032413.htm]. “Typischerweise kann durch nachhaltige Landwirtschaft 10 t/ha/y trockene Holz-Biomasse in Nordeuropa produziert werden... . Eine Fläche von 1 km² kann also 1000 trockene t/y hervorbringen – genug für 150 kW(el) bei niedrigem oder 300 kW(el) bei hohen Umwandlungs-Wirkungsgraden.” Das bedeutet 0,15–0,3 W(el)/m². Siehe auch Layzell et al. (2006), [3ap7lc].
- 310 Rapsfelder produzieren 1200 Liter Biodiesel Quellen: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk.
- 311 Zuckerrübenanbau in England Quelle: statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp
- 311 Bioethanol aus Getreide Quelle: Shapouri et al. (1995).
- 311 Zellulose-Ethanol Siehe auch Mabee et al. (2006).
- 311 Jatropha. Quellen: Francis et al. (2005), Asselbergs et al. (2006).
- 312 dass Algen auf sonnigen Plätzen in Amerika in Becken, in die auf 10% konzentriertes CO₂ eingeleitet wird, Algen eine Wachstumsrate von 30 g pro qm pro Tag erreichen können Quelle: Putt (2007). Diese Kalkulation vernachlässigte alle Energiekosten in Verbindung mit dem Betrieb des Algenbeckens und der Weiterverarbeitung der Algen zu Biodiesel. Putt beschreibt die Energiebilanz einer geplanten 100-Acre Algenfarm, die durch Methan aus einer Biogasanlage angetrieben wird. Die beschriebene Farm würde in der Tat weniger Energie erzeugen, als der Energie des benötigten Methans entspricht. Die 100-Acre-Farm verbraucht 2.600 kW Methan, was einem Energie-Input von 6,4 W/m² entspricht. Zur Erinnerung: Der Energie-Output in Form von Biodiesel wäre gerade 4,2 W/m². Allen Vorschlägen zur Biotreibstoffproduktion sollte man mit kritischen Augen begegnen!
- 313 Eine Studie des National Renewable Energy Laboratory in Colorado behauptet, dass ein Reaktor gefüllt mit genmodifizierten Grünalgen, der 11 ha der Wüste in Arizona belegt, 300 kg Wasserstoff pro Tag produzieren könne. Quelle: Amos (2004).
- 313 Daten des Prototypen für ein Stroh-Heizkraftwerk in Elean Quelle: Government White Paper (2003). Elean Power Station (36 MW) – the UK’s first straw-fired power plant. *Stroh-Produktion*: www.biomassenergycentre.org.uk.
- 313 Deponiegas Quellen: Matthew Chester, City University, London, persönliche Mitteilung; Meadows (1996), Aitchison (1996); Alan Rosevear, UK Representative on Methane to Markets Landfill Gas Sub-Committee, May 2005 [4hamks].