

Anhang D: Solar II

Auf Seite 47 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.1: Zwei Bäume



Fig.D.2: 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 England 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 Englands 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 Potenzial 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 $3,1 \text{ kWh/d}$ 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, ei 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.“

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 W/m². Auf Ödland ist der Ertrag 583 l/ha pro Jahr, das sind 0,065 W/m².

	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.



Wenn die Menschen entscheiden, 10% von Afrika für die Erzeugung dieser 0,065 W/m² zu nutzen, und man diese Energie auf 6 Milliarden Menschen weltweit verteilt, wie viel würde das jedem von uns bringen? 0,8 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 CO₂ 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 CO₂ eingeleitet wird, eine Wachstumsrate von 30 g pro qm pro Tag erreichen können und so 0,01 Liter Biodiesel pro qm und Tag produzieren. Das entspricht einer Leistungsdichte pro Beckenfläche von 4 W/m² - 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 qm Algenbecken, um das Auto zu betreiben. Zum Vergleich: Die Fläche pro Person in England ist 4000 qm, wovon 69 m² Wasser sind. Vergessen Sie aber nicht, dass es wesentlich ist, diese Becken mit konzentriertem CO₂ zu beschicken. Also ist diese Technik auf Landflächen beschränkt – wie viel von England können wir in Algenbecken verwandeln? – und auf die Verfügbarkeit von konzentriertem CO₂ angewiesen, dessen Einfang mit Energiekosten verbunden ist (ein Thema, das wir in Kapitel 23 und 31 diskutierten). Lassen Sie uns die Beschränkung durch die CO₂-Verfügbarkeit genauer abschätzen. Um Algen mit 30 g pro qm und Tag wachsen zu lassen, benötigt man mindestens 60 g CO₂ pro qm und Tag (weil das CO₂-Molekül mehr Masse pro Kohlenstoffatom hat als die Moleküle in der Alge). Würde man alles CO₂ aller englischer Heizkraftwerke einfangen (etwa 2½ Tonnen pro Jahr pro Person), könnte das 230 qm der genannten Algenbecken pro Person beliefern – etwa 6% der gesamten Landfläche. Diese Fläche würde Biodiesel entsprechend einer Leistung von 24 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 CO₂. Gehen wir damit aufs Meer, wird dieses CO₂-Pumpen wohl nicht möglich sein. Und ohne das konzentrierte CO₂ 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 Weizenenerträge 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 Potenzial 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 $0,05 \text{ m}^3$ pro Tag pro Person abgeschätzt, was eine chemischen Energie von $0,5 \text{ kWh/d}$ pro Person beinhaltet und $0,2 \text{ kWh(el)/d}$ 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 $2,5 \text{ kWh/kg}$ und die Effizienz des Kraftwerks liegt bei 21%, so dass 1 kg Müll etwa $0,5 \text{ kWh}$ Strom liefert. Der Kohlenstoffausstoß ist etwa 1000 g CO_2 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 $0,5 \text{ kWh(el)}$ 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 226 für weitere Daten zur Müllverbrennung.



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

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

303 Die mit Weide, Miscanthus oder Pappel erzielbare Leistung liegt bei $0,2 \text{ W/m}^2$ 283 *The power per unit area of using willow, miscanthus, or poplar, for electricity is 0.2 W/m^2 .* 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/ldscitech/126/4032413.htm]. "Typischerweise kann durch nachhaltige Landwirtschaft 10 t/ha/y trockene Holz-Biomasse in Nordeuropa produziert werden... . Eine Fläche von 1 km^2 kann also 1000 t/y hervorbringen – genug für 150 kW(el) bei niedrigem oder 300 kW(el) bei hohen Umwandlungs-Wirkungsgraden." Das bedeutet $0,15\text{--}0,3 \text{ W(el)/m}^2$. Siehe auch Layzell et al. (2006), [3ap7lc].

303 Rapsfelder produzieren 1200 Liter Biodiesel 283 *Oilseed rape.* Quellen: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk.

304 Zuckerrübenanbau in England –Sugar beet. Quelle: statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp

304 Bioethanol aus Getreide 284 *Bioethanol from corn.* Quelle: Shapouri et al. (1995).

304 Zellulose-Ethanol –Bioethanol from cellulose. Siehe auch Mabee et al. (2006).

304 Jatropha. Quellen: Francis et al. (2005), Asselbergs et al. (2006).

- 305 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 *285In America, in ponds fed with concentrated CO₂, algae can grow at 30 grams per square metre per day, producing 0.01 litres of biodiesel per square metre per day.* Source: 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!
- 305 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. *286A research study from the National Renewable Energy Laboratory predicted that genetically-modified green algae, covering an area of 11 hectares, could produce 300 kg of hydrogen per day.* Quelle: Amos (2004).
- 306 Daten des Prototypen für ein Stroh-Heizkraftwerk in Elean –*Elean power station.* Quelle: Government White Paper (2003). Elean Power Station (36 MW) – the UK's first straw-fired power plant. *Stroh-Produktion:* www.biomassenergycentre.org.uk.
- 306 *Deponiegas* *287Landfill gas.* 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].