

6. Solar

Wir wollen weiter abschätzen, wie sich der Verbrauch gegenüber der Produktion aufbaut. In den letzten drei Kapiteln fanden wir heraus, dass aufwandsseitig Autofahren und Fliegen größer sind als das realistische on-shore Windkraftpotenzial Englands. Kann Solarenergie die Ertragsseite wieder in Führung bringen?

Die natürliche Leistung des Sonnenscheins an einem wolkenlosen Mittag ist 1000 W pro Quadratmeter. Dies gilt bei senkrechter Einstrahlung, für einen Quadratmeter Fläche, die zur Sonne ausgerichtet ist, nicht für 1 m² Landfläche. Um die Leistung pro Landfläche zu bestimmen, braucht man einige **Korrekturen**. Wir müssen die Neigung zwischen Sonneneinstrahlung und Land beachten, die die Intensität der Mittagssonne auf etwa **60 %** des Wertes am Äquator reduziert. (Fig.6.1). Außerdem verlieren wir etwas wegen der Tatsache, dass nicht die ganze Zeit Mittag ist. An einem wolkenlosen Tag im März oder im September ist das Verhältnis von mittlerer Intensität zur Mittagsintensität an die **32%**. Und an einem durchschnittlichen Ort in England scheint die Sonne nur für etwa **34 %** der Tageslicht-Stunden.

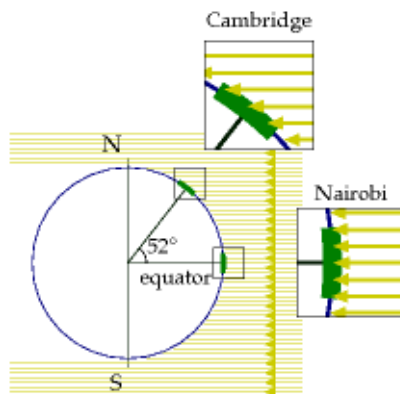
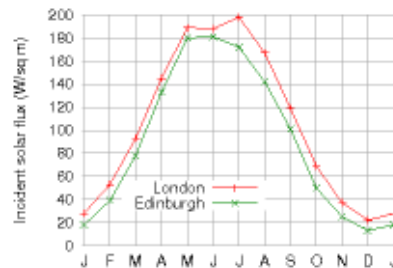


Fig.6.1: Sonnenlicht, das die Erde trifft, am Mittag eines Tages im Herbst oder Frühling. Die Strahlendichte pro Landflächeneinheit ist in Cambridge (52. Breitengrad) etwa 60% des äquatorialen Wertes.

Fig.6.2: Mittlere solare Intensität in London und Edinburgh, als Funktion der Jahreszeiten. Die mittlere Intensität pro Landflächeneinheit ist 100 W/m².



Kombiniert man diese drei Faktoren sowie die zusätzliche Komplikation wechselnder Jahreszeiten, ergibt sich, dass die mittlere natürliche Sonnenschein-Leistung auf einem Quadratmeter Süddach in England bei etwa 110 W/m², auf flachem Grund etwa bei 100 W/m² liegt.

Diese natürliche Leistung können wir nun auf verschiedene Weise in nützliche Leistung verwandeln:

1. Solarthermie: Nutzung des Sonnenscheins zur direkten Aufheizung von Gebäuden oder von Wasser
2. Solare Photovoltaik zur Erzeugung von Elektrizität
3. Solare Biomasse: Verarbeitung von Bäumen, Bakterien, Algen, Getreide, Soja oder Ölsaaten zu Treibstoffen, Chemie oder Baumaterial

4. Nahrung: das selbe wie solare Biomasse, nur befördern wir die Pflanzen direkt in Menschen oder andere Tiere.

(in einem späteren Kapitel werden wir auch noch ein paar andere solare Energietechniken für Wüstengegenden kennen lernen)

Lassen Sie uns schnell grobe Abschätzungen der maximalen realistischen Leistungen machen, die jede dieser Techniken liefern kann. Wir vernachlässigen ihre ökonomischen Kosten und die Kosten für Herstellung und Wartung der notwendigen Energieanlagen.

Solarthermie

Die einfachste solare Energietechnik ist ein Modul, das Wasser erwärmt. Nehmen wir an, wir würden alle südseitigen Dächer mit Solarmodulen ausstatten – das wären etwa 10 m² Module pro Person – und nehmen wir weiter an, diese Module hätten einen Wirkungsgrad von 50%, mit dem sie die 110 W/m² des Sonnenlichts in warmes Wasser verwandeln (Fig.6.3). Wir multiplizieren

$$50 \% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

und finden so, dass solare Wassererwärmung

13 kWh pro Tag pro Person

liefern kann. Ich zeichne dieses Rechteck in Fig.6.4 weiß, um anzudeuten, dass es sich hierbei um niederstufige Energie handelt - heißes Wasser ist weniger wertvoll als die hochstufige Elektrizität, wie sie eine Windturbine liefert. Wärme kann nicht ins Stromnetz eingespeist werden. Wenn Wärme nicht gebraucht wird, ist sie umsonst. Wir sollten im Hinterkopf behalten, dass ein Großteil dieser Wärme nicht am richtigen Platz verfügbar sein wird. In Städten, in denen viele Menschen leben, hat die Wohnbebauung weniger Dachfläche als im Landesdurchschnitt. Zudem ist die gewonnene Wärme nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt.

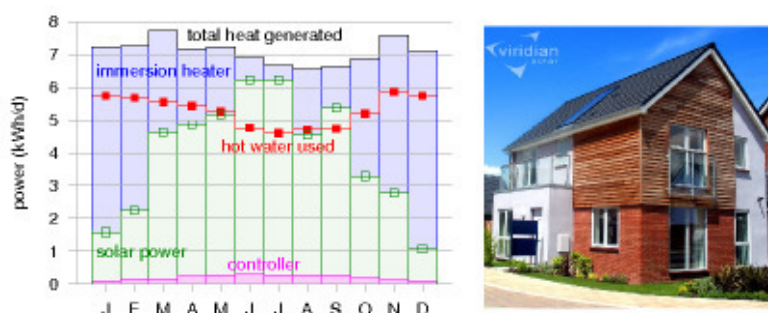


Fig.6.3: Solarenergie erzeugt durch ein 3-m²-Warmwassermodul (grün) und zusätzliche Wärmeanforderung (blau) für die Warmwassererzeugung im Testhaus von Viridian Solar. (Das Foto zeigt ein Haus mit so einem Modul auf dem Dach.) Die mittlere Solarleistung von den 3 m² war 3,8 kWh/d. Das Experiment simulierte den Warmwasserbedarf eines durchschnittlichen europäischen Haushalts – 100 l heißes (60 °C) Wasser täglich. Die 1,5-2 kWh/d große Lücke zwischen der gesamten erzeugten Energie (schwarze Linie ganz oben) und dem genutzten Warmwasser (rote Linie) ist durch Wärmeverluste entstanden. Die Linie in Magenta zeigt die für den Betrieb erforderliche elektrische Leistung. Die mittlere Leistung pro Flächeneinheit beträgt bei diesem Modul 53 W/m².

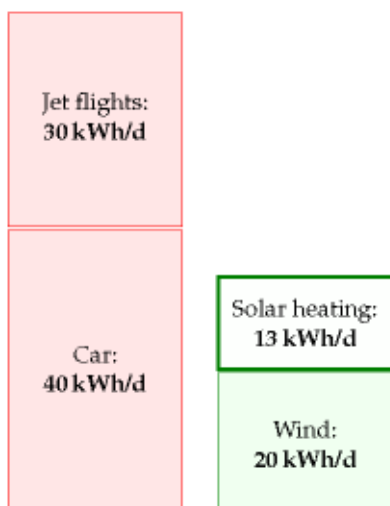


Fig.6.4: Solarthermie: 10 m² thermische Module können (im Mittel) 13 kWh/d thermische Energie liefern.

Photovoltaik

Photovoltaik(PV)-Module wandeln Sonnenlicht in Elektrizität. Typische PV-Module haben eine Effizienz von 10%, sehr aufwändige und teure bis 20%. (Fundamentale Gesetze der Physik limitieren die Effizienz von PV-Systemen auf bestenfalls 60% mit perfekt fokussierenden Spiegeln und Linsen, und auf 45 % ohne Fokussierung. Ein massentaugliches Modul mit 30% Effizienz wäre schon sehr bemerkenswert.) Die mittlere Leistung eines PV-Moduls in England, mit 20 % Effizienz und in Südausrichtung, beträgt also

$$20 \% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2.$$

Fig.6.5 zeigt Daten, die diese Zahl bestätigen. Geben wir nun jeder Person 10 m² von den teuren (20% effizienten) Solarmodulen und bedecken damit alle Süddächer. Das liefert dann

5 kWh pro Tag pro Person.

Da die Fläche von Süddächern nur etwa 10 m² pro Person beträgt, ist sicher nicht genug Platz für diese PV-Module *und* die Solarthermie-Module aus dem letzten Abschnitt. Also müssen wir uns eigentlich entscheiden, ob wir den einen oder den anderen Beitrag addieren wollen. Egal, ich nehme mal beide mit auf den Produktionsstapel. Derzeit sind die Kosten für PV-Module etwa viermal höher als die für thermische Module, aber sie liefern nur halb so viel Energie, allerdings von höchster Stufe: Elektrizität. Daher würde ich einer Familie, die über Solarenergie nachdenkt, raten, zuerst die solarthermische Versorgung zu prüfen. Die intelligenteste Variante, wenigstens in sonnigen Gegenden, bieten kombinierte Systeme, die sowohl Elektrizität als auch Warmwasser aus einer einzigen Anlage liefern. Dieser Weg wurde zuerst von Heliodynamics eingeschlagen, die die Gesamtkosten ihrer Systeme reduzieren, indem sie kleine hochwertige Galliumarsenid PV-Module mit kleinen flachen nachführbaren Spiegeln umgeben. Die Spiegel fokussieren das Sonnenlicht auf die PV-Module, die Strom und Warmwasser liefern; das Warmwasser wird erzeugt, indem man Wasser an der Rückseite der PV-Module vorbeipumpt.

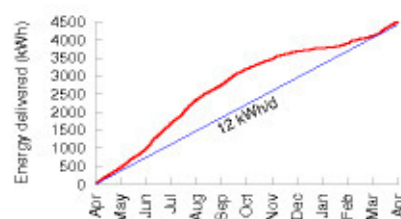


Fig.6.5: Photovoltaik: Daten eines 25 m² Modulfeldes in Cambridgeshire aus 2006. Als Spitzenleistung liefert dieses Feld etwa 4 kW. Der Durchschnitt übers Jahr liegt bei 12 kWh pro Tag. Das sind 20 W pro Quadratmeter Modulfläche.

Die bisherige Erkenntnis: PV auf der Südseite Ihres Hausdachs sollte genug Strom erzeugen, um ein gutes Stück Ihres persönlichen Elektrizitätsbedarfes zu decken, doch die Dächer sind nicht groß genug, um eine große Rolle im Gesamt-Energiebedarf zu spielen. Um mehr mit PV zu bewerkstelligen, müssen wir vom Dach heruntersteigen auf festen Boden. Die beiden Sonnenkämpfer in Fig.6.6 weisen den Weg.



Fig.6.6: zwei Sonnenkämpfer genießen ihre PV-Anlage, die ihre Elektroautos und ihr Heim versorgt. Das Feld aus 120 Modulen (jedes 300 W bzw. 2,2 m²) hat insgesamt eine Fläche von 268 m², einen Spitzen-Output (vor Wechselrichter-Verlusten) von 30,5 kW und einen mittleren Output – in Kalifornien nahe Santa Cruz – von 5 kW (19 W/m²). Foto mit freundlicher Genehmigung von Kenneth Adelman
www.solarwarrior.com

Solarfarmen

Wenn es einen Durchbruch der Solartechnologie gäbe und die Kosten für Photovoltaik weit genug fallen, so dass wir Module überall in die Landschaft stellen könnten, was wäre dann die maximal erreichbare Energieproduktion? Gut, wenn wir 5% Englands mit 10%-effizienten Modulen bestücken, ergäbe das

$$10 \% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ pro Person} \approx 50 \text{ kWh/d pro Person.}$$

Ich hatte übrigens nur 10% Effizienz angenommen, da bei Freiflächenanlagen die PV-Module in großen Mengen kostengünstig verfügbar sein müssen, und die weniger effizienten Module die ersten sind, die billiger und billiger sein werden. Die Leistungsdichte (Leistung pro Flächeneinheit) solcher Solarfarmen wäre

$$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ W/m}^2 .$$

Dies ist doppelt so viel, wie derzeit beispielsweise der Bavaria Solarpark (Fig.6.7) erreicht.



Fig.6.7: Eine PV-Freiflächenanlage mit 6,3 MW (peak), der Solarpark in Mühlhausen, Bayern. Die mittlere Leistung pro Landflächeneinheit dürfte um die 5W/m² liegen.
Foto: SunPower.

Könnte diese Flut von Solarmodulen mit der Armee von Windmühlen aus Kapitel 4 koexistieren? Jawohl, ohne Probleme: Windmühlen werfen wenig Schatten und PV-Module am Boden haben kaum Auswirkungen auf den Wind. Wie kühn ist dieser Plan? Die PV-Kapazität, die man braucht, um die 50 kWh/d pro Person zu liefern, ist über 100 mal höher als die derzeit weltweit installierte Photovoltaik. Sollte ich Solarfarmen in meinen Produktionsstapel mit aufnehmen? Da wohnen zwei Herzen in meiner Brust. Einerseits sagte ich eingangs, dass ich herausfinden wollte, wie die Gesetze der Physik nachhaltige Energiegewinnung limitieren und z.B. Finanzierungsaspekte vernachlässigen. Auf dieser Basis sollte ich ohne weiteres die Landschaft industrialisieren und auch Solarfarmen mit berücksichtigen. Andererseits will ich den Leuten helfen, herauszufinden, was zwischen heute und 2050 machbar wäre. Und heute ist PV-Strom viermal teurer als der Marktpreis.

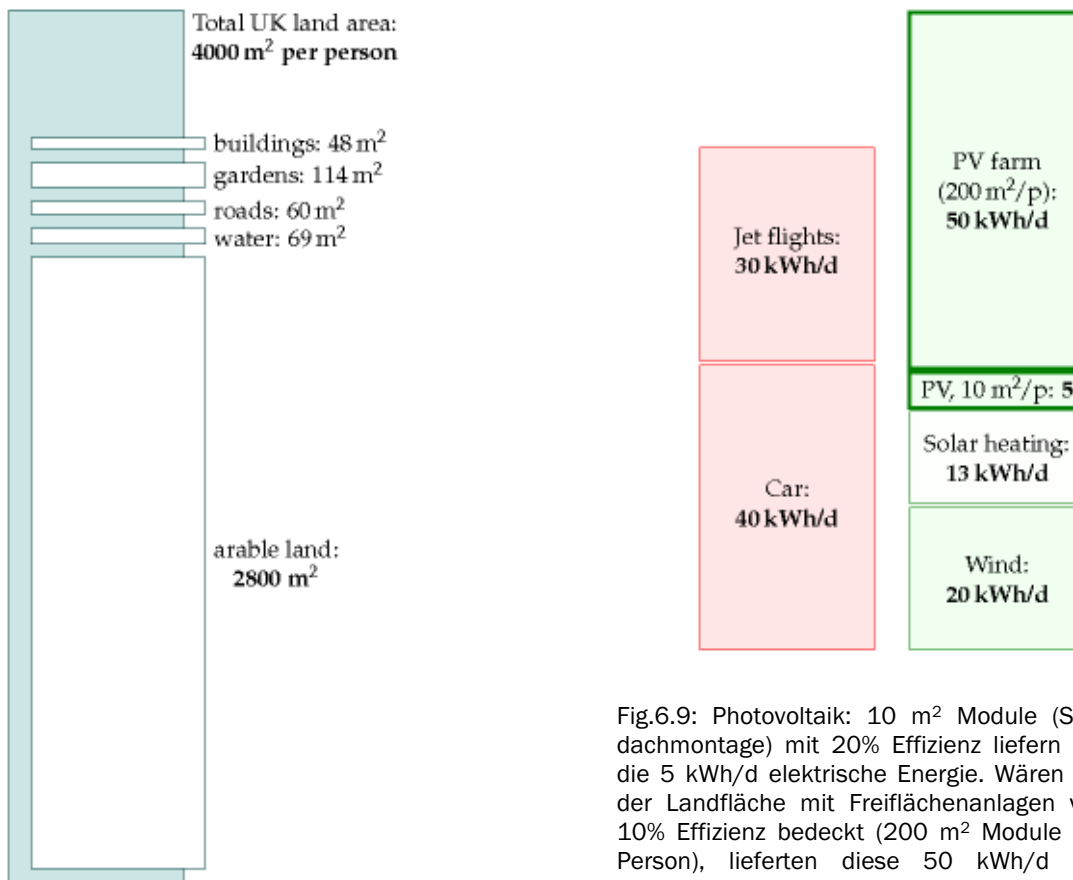


Fig.6.8: Landflächen pro Person in England.

Fig.6.9: Photovoltaik: 10 m² Module (Süddachmontage) mit 20% Effizienz liefern um die 5 kWh/d elektrische Energie. Wären 5% der Landfläche mit Freiflächenanlagen von 10% Effizienz bedeckt (200 m² Module pro Person), lieferten diese 50 kWh/d pro Person.

Ich finde es etwas unverantwortlich, diese Schätzungen in den Produktions-Stapel von Fig.6.9 aufzunehmen – 5% von England mit PV-Modulen zu überdecken scheint jenseits aller plausiblen Grenzen in vielerlei Hinsicht. Wenn wir ernsthaft so etwas durchziehen wollten, dann wäre es vielleicht besser, die Module in einem doppelt so sonnigen Land aufzustellen und einen Teil der Energie über Stromkabel heim zu schicken. Auf diese Idee werden wir in Kapitel 25 zurückkommen.

Sagen und Mythen

Ein PV-Modul herzustellen erfordert mehr Energie als es je liefern kann.

Falsch. Das **Energieausbeute-Verhältnis** (d.h. das Verhältnis zwischen der Energie, die ein System liefert, und der Energie, die zu seiner Herstellung erforderlich ist) eines dachmontierten, ins Stromnetz einspeisenden Solarsystems in Zentral- und Nordeuropa beträgt 4 (angenommene Lebenszeit von 20 Jahren), und über 7 in sonnigeren Ecken wie in Australien (Richards and Watt, 2007). Ein Energieausbeute-Verhältnis größer als eins bedeutet, das System ist „etwas Gutes“, energiemäßig betrachtet. Windturbinen mit 20 Jahren Laufzeit haben ein Energieausbeute-Verhältnis von 80.

Werden PV-Module immer effizienter mit fortschreitender Technik?

Ich bin sicher, dass PV-Module immer billiger werden; und auch, dass sie immer weniger Energieaufwand zu ihrer Herstellung benötigen, also ihr Energieausbeute-Verhältnis sich verbessert. Doch die PV-Abschätzungen dieses Kapitels sind unabhängig von ökonomischen Überlegungen, und auch von Energiekosten der Herstellung. PV-Module mit 20% Effizienz sind bereits nahe am theoretischen Limit (siehe dazu die Anmerkungen am Ende des Kapitels). Ich wäre überrascht, wenn die Abschätzungen dieses Kapitels über PV-Dachanlagen jemals eine signifikante Korrektur nach oben erführen.

Biomasse

All of a sudden, you know, we may be in the energy business by being able to grow grass on the ranch! And have it harvested and converted into energy. That's what's close to happening.

George W. Bush, Februar 2006

Alle verfügbaren Lösungen mit Bioenergie beinhalten, dass zuerst Grünzeug wächst und dann etwas damit passiert. Wie groß kann die Energie wohl sein, die das Grünzeug sammelt? Es gibt vier grundsätzliche Wege, Energie aus solarbetriebenen biologischen Systemen zu extrahieren:

1. Wir können ausgewählte Pflanzen anbauen und diese dann in speziellen Anlagen verbrennen, die Elektrizität oder Wärme oder beides produzieren. Das nennen wir „Kohlesubstitution“.
2. Wir können ausgewählte Pflanzen (Raps, Zuckerrohr oder Korn etwa) anbauen, diese in Ethanol oder Biodiesel verwandeln und dann als Treibstoff in Autos, Züge, Flugzeuge oder ähnliches füllen. Oder wir züchten gentechnisch veränderte Bakterien, Cyanobakterien oder Algen, die direkt Wasserstoff, Ethanol oder Butanol, oder sogar Elektrizität produzieren. Solche Ansätze nennen wir „Ölsubstitution“.
3. Wir können Nebenprodukte der Agrarwirtschaft in Energieanlagen verbrennen. Diese Nebenprodukte reichen von Stroh (Nebenprodukt von Müllriegen) bis Hühnerkacke (Nebenprodukt von McNuggets). Verbrennen von Nebenprodukten ist wieder Kohlesubstitution, nur benutzt man einfache Pflanzen, keine energetisch hochwertigen. Eine Energieanlage, die Nebenprodukte verbrennt, wird pro Hektar deutlich weniger Leistung liefern als ein optimierter Biomasse-Anbaubetrieb, doch hat sie den Vorteil, das Land nicht so einseitig zu nutzen. Methangas von Deponien zu verbrennen ist ein ähnlicher Weg der Energiegewinnung, doch ist der nur so lange nachhaltig, wie wir eine nachhaltige Quelle von Abfall zur Verfügung haben, den wir in die Deponien stecken können.

(Das meiste Methan-Deponiegas kommt von Speiseabfällen; in England werfen die Leute etwa 300 g Lebensmittel pro Person und Tag weg.) Verbrennen von Haushaltsmüll ist eine andere – kaum minder rezyklische – Art, Energie aus Biomasse zu gewinnen.

- Wir können Pflanzen anbauen und diese direkt an energie-hungrige Menschen oder Tiere verfüttern.

Bei all diesen Prozessen ist die erste Station der Energie in einem chemischen Molekül wie dem Kohlenwasserstoff in einer Grünpflanze. Wir erhalten also eine Abschätzung für alle diese Prozesse, indem wir die Leistung bestimmen, die durch diese erste Station fließen kann. In allen folgenden Schritten – ob sie nun Traktoren, Tiere, chemische Fabriken, Deponien oder Energieanlagen involvieren – kann die Energie nur noch abnehmen. Daher ist die Leistung¹⁰ der ersten Station eine theoretische Obergrenze für alles, was an Leistung durch jedwede pflanzenbasierte Energietechnologie verfügbar gemacht werden kann.



Fig.6.10: Miscanthus-Gras neben Dr. Emily Heaton, die 163 cm groß ist. In England kann Miscanthus 0,75 W/m² Leistung pro Flächeneinheit erzielen. Foto: Universität von Illinois.

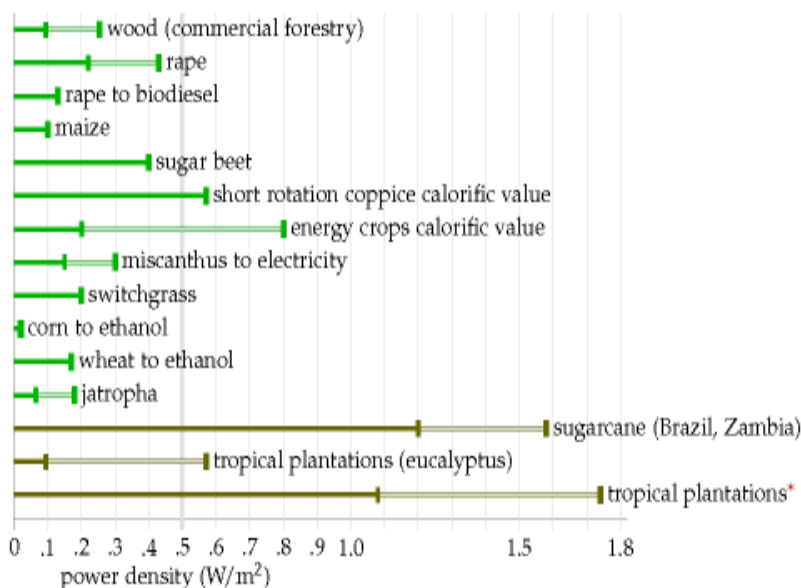


Fig.6.11: Energieproduktion pro Flächeneinheit, die verschiedene Pflanzen erreichen können. (Quellen vgl. Literaturhinweise) Leistungsdichten schwanken abhängig von Bewässerung u. Düngung; z.T. sind Bereiche angegeben, z.B. liegt Holz bei 0,095-0,254 W/m². Die drei letzten Balken stehen für tropische Pflanzen, der letzte geht von Genmodifikation, Düngung u. Bewässerung aus. Im Text benutze ich 0,5 W/m² als Mittelwert für die besten Energiepflanzen NW-Europas.

So lassen Sie uns einfach die Leistung dieser ersten Station abschätzen. (In Anhang D geht es mehr ins Detail und wir bestimmen den maximalen Beitrag jedes einzelnen Prozesses.) Die mittlere Sonnenlicht-Leistung liegt in England bei 100 W/m². Die effektivsten Pflanzen in Europa sind etwa 2%-effizient beim Umwandeln von solarer Energie in Kohlenwasserstoff. Das legt nahe, dass Pflanzen etwa 2 W/m² liefern könnten; jedoch geht ihre Effizienz bei höherem Lichtangebot zurück und die beste Ausbeute von Energiepflanzen in Europa liegt eher bei 0,5 W/m². Wenn wir 75% des Landes mit

¹⁰ Welche ja dem Energie(durch)fluss entspricht, wie oben hergeleitet ...

hochwertigem Grün überziehen, sind das 3000 m² pro Person, die wir der Bioenergie widmen. Das ist so viel Land, wie derzeit als Landwirtschaftsfläche benutzt wird. Also liegt – wenn man alle zusätzlichen Kosten für Anbau, Ernte und Verarbeitung des Grünzeugs vernachlässigt – das Maximum der verfügbaren Leistung bei

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3000 \text{ m}^2 \text{ pro Person} = 36 \text{ kWh/d pro Person.}$$

Wow, das ist nicht allzu viel, bedenkt man die äußerst großzügigen Annahmen, die wir einbrachten, um eine möglichst hohe Zahl zu erhalten. Wenn Sie Biotreibstoff für Autos oder Flugzeuge aus dem Grün herstellen, sind alle weiteren Schritte in der Kette vom Feld bis zur Zündkerze unausweichlich ineffizient. Ich denke, es wäre sehr optimistisch zu hoffen, dass die summierten Verarbeitungsverluste in der Prozesskette lediglich 33% betragen. Sogar Verbrennen von Getreide in einem hochwertigen Brenner verliert 20% der Energie durch den Kamin. Darum kann sicherlich das gesamte Potenzial von Biomasse und Biotreibstoff nicht größer sein als 24 kWh/d pro Person. Und vergessen Sie nicht, wir wollen einen Teil des Anbaus auch als Futter für uns selbst und unsere tierischen Freunde benutzen.

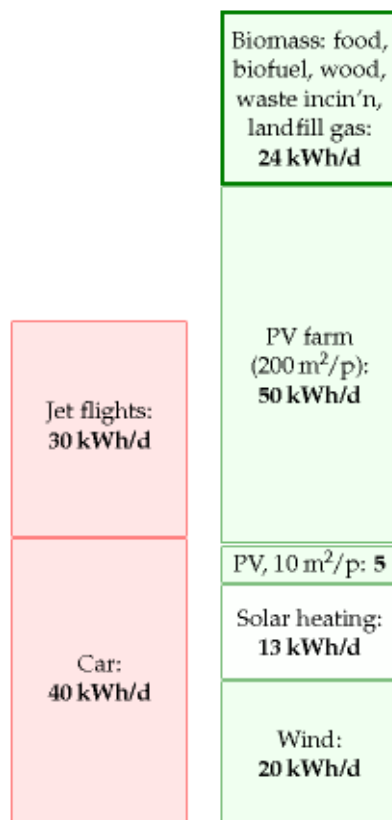


Fig.6.12: Solare Biomasse, einschließlich aller Formen von Biotreibstoff, Müllverbrennung und Lebensmittel: 24 kWh/d pro Person.

Könnte die Gentechnik Pflanzen hervorbringen, die Solarenergie effizienter in Chemikalien umwandeln? Das ist denkbar, doch habe ich keine wissenschaftliche Veröffentlichung gefunden, die für Europa Pflanzen vorhersagt, die eine Energieproduktion von mehr als 1 W/m² erreichen könnten.

Ich lege die 24 kWh/d pro Person auf den grünen Stapel, betone aber, dass ich das für überschätzt halte – ich denke, das wahre Maximum durch Biomasse erreichbarer Leistung wird kleiner sein wegen der Verluste bei Anbau und Verarbeitung.

Eine Schlussfolgerung ist klar geworden: Biotreibstoffe können nicht wesentlich beitragen – zumindest nicht in Ländern wie England, und nicht als Ersatz für Treibstoffeinsatz im Verkehr. Selbst wenn man die Hauptprobleme von Biotreibstoff –

dass ihre Herstellung mit Nahrungsmitteln konkurriert und dass der zusätzliche Aufwand für Landwirtschaft und Verarbeitung oft den Hauptteil der gewonnenen Energie wieder aufzehrt (Fig.6.14) – außen vor lässt, können pflanzliche Biotreibstoffe, in einem europäischen Land wie England, so wenig Leistung liefern, dass sie in meinen Augen kaum der Rede Wert sind.

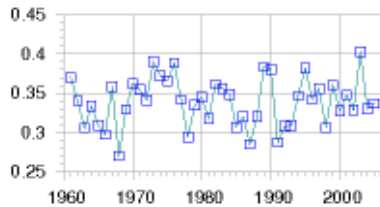
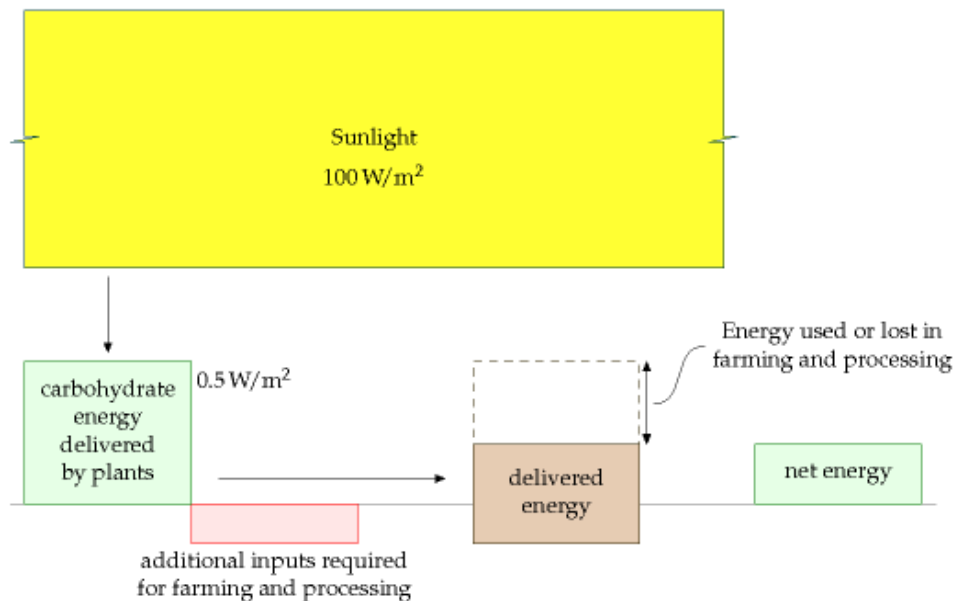


Fig.6.13: Sonne in Cambridge: Anzahl der Sonnenstunden im Jahresverlauf, ausgedrückt als Bruchteil an der Gesamtzahl der Tageslichtstunden.

Fig.6.14: Illustration der quantitativen Frage, die bei jeder Art von Biobrennstoff gestellt werden muss: Wie viel zusätzliche Energie ist für Anbau und Verarbeitung erforderlich? Wie hoch ist die gelieferte Energie? Wie hoch ist der Netto-Energie-Output? Oft kompensieren zusätzlicher Energieaufwand und Verarbeitungsverlust einen Großteil der Pflanzenenergie.



Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 42 **die Neigung zwischen Sonneneinstrahlung und Land:** Die Breite von Cambridge ist $\theta = 52^\circ$; die Intensität der Mittagssonne ist multipliziert mit $\cos \theta \approx 0,6$. Der exakte Faktor hängt von der Jahreszeit ab und schwankt zwischen $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ und $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.
- 42 **an einem durchschnittlichen Ort in England scheint die Sonne nur für etwa ein Drittel der Tageslicht-Stunden:** Die Highlands haben 1.100 h Sonnenschein pro Jahr – einen Anteil von 25%. Die besten Fleckchen in Schottland haben 1.400 h pro Jahr – 32%. Cambridge: 1.500 ± 130 h pro Jahr – 34%. Die Südküste Englands (der sonnigste Teil Großbritanniens): 1.700 h pro Jahr – 39%. [2rqloc] Daten für Cambridge von [2szckw]. Siehe auch Fig.6.16.
- 42 **die mittlere natürliche Sonnenschein-Leistung auf einem Quadratmeter Süddach in England bei etwa 110 W/m², auf flachem Grund etwa bei 100 W/m²:** Quelle: NASA “Surface meteorology and Solar Energy” [5hrxls]. Sind Sie auch überrascht, dass so wenig Unterschied zwischen Süddach und Flachdach ist? Ich war’s. Die Differenz ist tatsächlich nur 10% [6z9epq].

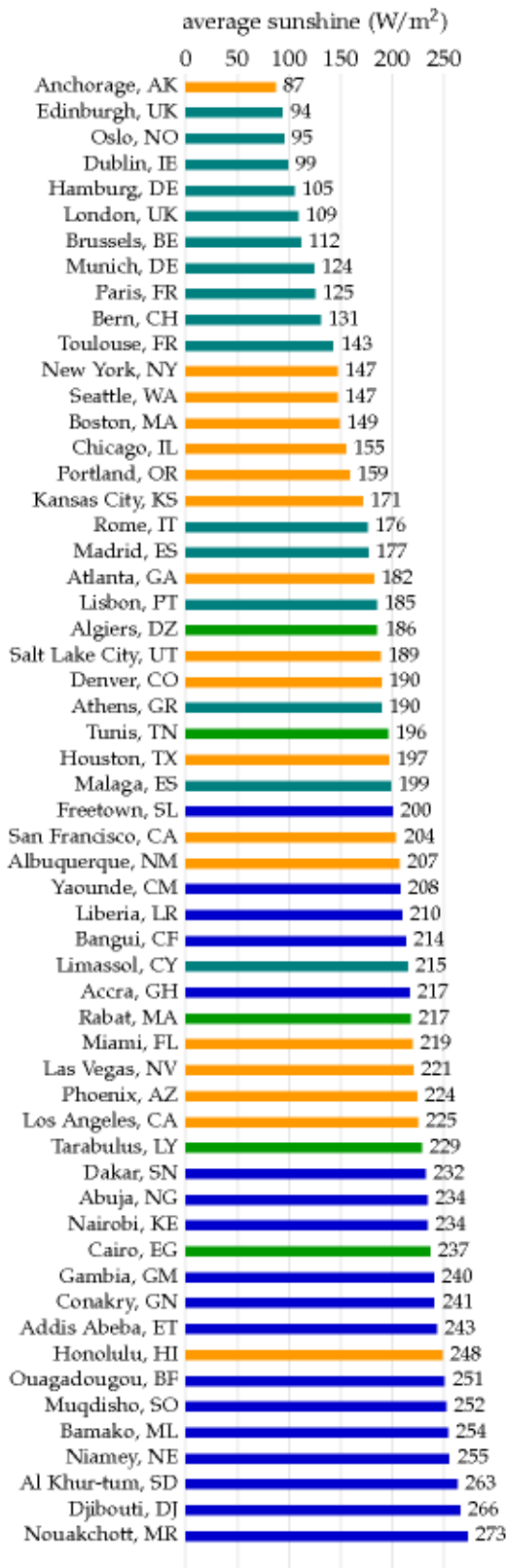


Fig.6.16: Mittlere Leistung von Sonnenlicht auf einer horizontalen Fläche an ausgesuchten Orten in Europa, Nordamerika und Afrika.



43 etwa 10 m² Module pro Person: Ich schätze die Fläche der Süddächer folgendermaßen ab: Ich nahm die mit Gebäuden bebaute Landfläche pro Person (48 m² in

England, Tabelle I.6), davon $\frac{1}{4}$ als Anteil der nach Süden ausgerichteten Teilflächen und erhöhte das um 40 % wegen der Dachneigung. Das ergibt 16 m² pro Person. Da die Module üblicherweise nur in vorgegebenen Rechteckgrößen verfügbar sind, so dass immer unbedeckte Dachflächen übrigbleiben, also 10 m² Modulfläche¹¹.

- 44 **Die mittlere Leistung eines PV-Moduls:** Es geht die Sage um, dass PV-Module bei wolkigem Wetter nahezu genauso viel Leistung erzeugen wie bei Sonnenschein. Das ist einfach nicht wahr. An einem hellen aber wolkigen Tag konvertieren PV-Module und PV-Anlagen auch Energie, aber viel weniger: Die PV-Produktion fällt auf etwa ein Zehntel ab, wenn die Sonne hinter einer Wolke verschwindet (weil die Intensität des Sonnenlichtes auf 1/10 abfällt). Wie Fig.6.15 zeigt, ist die PV-Ausbeute ziemlich proportional zur Strahlungsintensität – jedenfalls wenn die Module bei 25 °C sind. Um die Dinge zu verkomplizieren hängt die Leistung auch von der Temperatur ab – heißere Module haben eine geringere Leistung (typ. 0,38% Verlust pro °C) – doch sieht man die Daten realer Module an, z.B. bei www.solarwarrior.com, kann man die Hauptaussage bestätigen: Der Output an einem Wolkentag ist deutlich geringer als bei Sonne. Dieser Punkt wird oftmals verschleiert durch die Aussagen von Modulherstellern, die angeben, wie die Effizienz von der Sonneneinstrahlung abhängt. „Die Module sind besonders effizient bei bewölkten Bedingungen“, heißt es da; das mag richtig sein, doch sollte Effizienz nicht mit Leistungs-Output verwechselt werden.

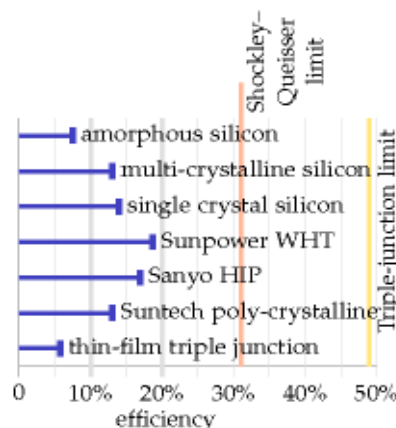


Fig.6.18: Effizienz derzeit am Markt verfügbarer PV-Module. Im Text wird angenommen, dass dachmontierte PV-Module 20%-effizient und Freiflächen-PV 10%-effizient sind. In Gegenden mit 100 W/m² Sonneneinstrahlung liefern 20%-effiziente Module 20 W/m².

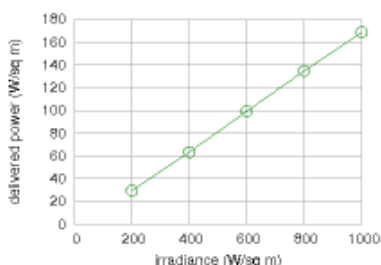


Fig.6.15: Leistung eines Sanyo HIP-210NKHE1 Modul als Funktion der Lichtintensität (bei 25 °C, bei angenommener Ausgangsspannung von 40 V). Quelle: Datenblatt www.sanyo-solar.eu.

- 44 **Typische PV-Module haben eine Effizienz von 10%, sehr aufwändige bis 20%:** Siehe Fig.6.18. Quellen: Turkenburg (2000), Sunpower www.sunpowercorp.com, Sanyo www.sanyo-solar.eu, Suntech.
- 44 **Ein Modul mit 30% Effizienz wäre schon sehr bemerkenswert.** Dieses Zitat ist von Hopfield and Gollub (1978), die über Module mit fokussierenden Spiegellinsen schrieben. Die theoretische Grenze für Standard „Single-Junction“ Module ohne Fokussierungen ist das Shockley–Queisser Limit. Es sagt aus, dass höchstens 31% der Sonnenlicht-Energie in Elektrizität verwandelt werden können (Shockley und Queisser, 1961). (Der Hauptgrund für diese Grenze ist eine Eigenschaft des PV-Halbleitermaterials, genannt Band-Gap, die die Energie eines optimal konvertierten

¹¹ Insbesondere die Wechselwirkung mit Dachfenstern, Dachgauben oder gegenseitigen Verschattungen verringert dieses Modulflächen-zu-Dachflächen-Verhältnis in der Praxis, der Abschlag von $6/16 = 37\%$ ist also eher gering angesetzt.

Photons bestimmt. Photonen mit geringeren Energien werden überhaupt nicht genutzt, Photonen darüber können eingefangen werden, doch ihr über das Band-Gap hinausgehender Energieanteil ist verloren).

Fokussierungen (Linsen oder Spiegel) können die Kosten (pro Watt) reduzieren und die Effizienz erhöhen. Das Shockley-Queisser Limit für Module mit Fokussierung liegt bei 41% Effizienz. Der einzige Weg, das Shockley-Queisser Limit zu übertreffen, ist, das Licht in verschiedene Wellenlängenanteile aufzuspalten und jeden Wellenlängenanteil mit seinem eigenen angepassten Band-Gap zu konvertieren. Dieser Ansatz heißt „Multiple-Junction“ PV. Unlängst wurde über Multiple-Junction Module mit Fokussierung berichtet, die eine Effizienz von 40% hatten. [217t6], www.spectrolab.com. July 2007, University of Delaware

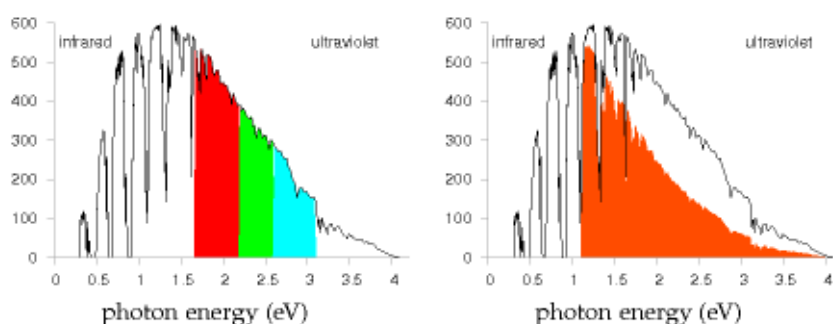


Fig.6.17: Ein Teil der Erklärung von Shockley und Queisser für die 31%-Effizienz-Beschränkung einfacher PV-Module. Links: Das Spektrum des Mittagssonnenlichts. Die vertikale Achse zeigt die Leistungsdichte in W/m^2 pro eV spektralem Intervall. Der sichtbare Bereich ist durch die farbige Hinterlegung gekennzeichnet. Rechts ist die eingefangene Energie eines PV-Halbleiters mit einem einzelnen Band-Gap von 1,1 eV als rotschraffierte Fläche dargestellt. Photonen mit Energien unter dem Band-Gap sind verloren. Ein Teil der Energie von Photonen über dem Band-Gap ist ebenfalls verloren; beispielsweise 50% der Energie eines 2,2 eV Photons. Weitere Verluste entstehen durch die unausweichlich stattfindende Strahlung rekombinierender Ladungen im Halbleiter.

44 Fig.6.5 Daten und Foto mit freundlicher Genehmigung von Jonathan Kimmitt.

44 Heliodynamics – www.hdsolar.com. Siehe Fig.6.19. Ein ähnliches System stellt Arontis her www.arontis.se.



Fig.6.19: eine kombinierte Wärme-und-Strom-Solaranlage von Heliodynamics. Eine Reflektorfläche von $32 m^2$ (etwas größer als die Seite eines Doppeldeckerbusses) liefert bis zu 10 kW Wärme und 1,5 kW Elektrizität. In einem sonnigen Land könnte eines dieser etwa eine Tonne schweren Geräte 60 kWh/d Wärme und 9 kWh/d Elektrizität produzieren. Das entspricht (pro qm Geräteoberfläche) mittleren Flüssen von $80 W/m^2$ Wärme und $12 W/m^2$ Strom. Diese Flüsse sind vergleichbar mit denen aus Standardgeräten zur solaren Heizung und PV-Modulen, doch dieses Konzept von Heliodynamics liefert die Leistung zu geringeren Kosten, denn das meiste Material ist nur einfaches Glas. Zum Vergleich: mittlerer Energiebedarf eines Europäers: 125 kWh/d.

45 der Solarpark in Mühlhausen: Diese 25-Hektar-Solarfarm soll 0,7 MW liefern (17.000 kWh pro Tag) .

Die U-Bahn-Station Stillwater Avenue in New York hat amorphe Silizium-Dünnschicht-Module in ihr Dach integriert, die $4W/m^2$ liefern. Das Nellis Solarkraftwerk in Nevada wurde im Dezember 2007 fertiggestellt. Es soll auf 56 Hektar 30 GWh pro

Jahr erzeugen, das sind $6\text{W}/\text{m}^2$ [5hzs5y]. Serpa Solar Power Plant, Portugal (PV), "das weltgrößte Solarkraftwerk" [39z5m5] [2uk8q8] hat der Sonne nachgeführte Module auf 60 Hektar d.h. 600.000 m^2 oder 0.6 km^2 , die 20 GWh pro Jahr, d.h. $2,3\text{ MW}$ im Mittel liefern sollen. Das ist eine Leistung pro Flächeneinheit von $3.8\text{W}/\text{m}^2$.

- 46 Die PV-Kapazität, die man braucht, um die $50\text{ kWh}/\text{d}$ pro Person zu liefern, ist über 100 mal höher als die derzeit weltweit installierte Photovoltaik: Für $50\text{ kWh}/\text{d}$ pro Engländer sind 125 GW mittlere Leistung oder 1.250 GW installierte Spitzenleistung erforderlich. Ende 2007 war weltweit eine Spitzen-Leistung von 10 GW installiert, die Zubaurate ist etwa 2 GW pro Jahr.
- 46 5% von England mit PV-Modulen zu überdecken scheint jenseits aller plausiblen Grenzen: Der Hauptgrund, das für unplausibel zu halten ist die Tatsache, dass die Engländer ihr Land lieber für Anbau und Erholung nutzen als für Solarparks. Weitere Bedenken liefert der Preis. Das ist kein Buch über Ökonomie, aber dennoch: Auf Basis der Preise für die bayerische Solarfarm würden die $50\text{ kWh}/\text{d}/\text{p}$ 91.000 € pro Person kosten. Läuft die Anlage 20 Jahre ohne weitere Kosten, ergeben sich $0,25\text{ €}/\text{kWh}$ Herstellungskosten. Weiterführende Literatur: David Carlson, BP solar [2ahecp].
- 48 in England werfen die Leute etwa 300 g Lebensmittel pro Person und Tag weg: Quelle: Ventour (2008).
- 48 Fig.6.10: In den USA kann man ohne Nitratdüngung mit Miscanthus $24\text{ t}/\text{ha}$ pro Jahr Trockenmasse erzeugen. In England wird von Ernten um die $12\text{-}16\text{ t}/\text{ha}$ pro Jahr berichtet. Trockener Miscanthus hat einen Heizwert von $17\text{ MJ}/\text{kg}$, also korrespondiert die englische Ernte mit einer Leistungsdichte von $0,75\text{ W}/\text{m}^2$. Quelle: Heaton et al. (2004) und [6kqq77]. Die angenommene Ernte wird erst nach drei Jahren ungestörtem Wachstum erreicht.
- 48 Die effektivsten Pflanzen in Europa sind etwa 2%-effizient: Bei niedrigen Lichtintensitäten sind die besten britischen Pflanzen $2,4\%$ -effizient in gutgedüngtem Boden (Monteith, 1977), doch fällt die Effizienz bei höherer Lichtintensität ab. Nach Turkenburg (2000) und Schiermeier et al. (2008) ist die Effizienz bei solarer Biomasse unter 1% . Hier sind ein paar Quellen zum Nachprüfen meiner Abschätzung von $0,5\text{ W}/\text{m}^2$ für pflanzliche Leistung in England: Die Royal Commission on Environmental Pollution schätzt die erreichbare Leistungsdichte von Energiepflanzen in England auf $0.2\text{ W}/\text{m}^2$ (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). Auf Seite 43 des "Royal Society's biofuels document" (Royal Society working group on biofuels, 2008), steht *Miscanthus* ganz oben auf der Liste und liefert etwa $0.8\text{ W}/\text{m}^2$ chemische Leistung. Im World Energy Assessment, herausgegeben von UNDP, schreibt Rogner (2000): "Nimmt man 45% Umwandlungs-Effizienz und Ernten von 15 t ofengetrocknetem Material pro ha und Jahr, benötigt man 2 km^2 Felder pro Megawatt (elektrisch) installierter Leistung bei einem Betrieb an 4000 Stunden pro Jahr." Das ergibt eine Leistung pro Flächeneinheit von $0.23\text{ W}(\text{el})/\text{m}^2$. ($1\text{W}(\text{el})$ bedeutet 1 Watt elektrischer Leistung.) Energy for Sustainable Development Ltd (2003) schätzt, dass schnellwachsende Holzpflanzen über 10 t trockenes Holz pro ha pro Jahr erzeugen können, was einer Leistungsdichte von $0.57\text{ W}/\text{m}^2$ entspricht. (Trockenes Holz hat einen Brennwert von 5 kWh pro kg.). Nach Archer and Barber (2004) kann die instantane Effizienz eines gesunden Laubbaumes in optimalen Bedingungen 5% erreichen, doch über längere Zeit liegt die Energiespeicher-Effizienz moderner Pflanzen bei $0.5\text{-}1\%$. Archer and Barber denken, dass es möglich ist, durch genetische Modifikation die Speicher-Effizienz von Pflanzen zu verbessern, insbesondere von C4-Pflanzen, die

bereits von Natur aus einen besondere effizienten Photosyntheseablauf haben. C4-Pflanzen leben hauptsächlich in den Tropen und benötigen hohe Temperaturen, sie wachsen nicht bei Temperaturen unter 10°C. Beispiele von C4-Pflanzen sind Zuckerrohr, Mais, Sorghum, Finger- und Rutenhirse. Zhu et al. (2008) berechneten das theoretische Limit für die Konversionseffizienz zu 4,6% für C3-Photosynthese und 6% für C4-Photosynthese. Die höchsten praktisch erzielten Effizienzen wären 2,4% und 3,7% für C3 bzw. C4 und, nach Boyer (1982), die erzielten Mittelwerte in USA 3-4mal kleiner als diese Rekordwerte (das ist etwa 1% effizient). Ein Grund, warum die Pflanzen nicht das theoretische Limit erreichen, ist, dass sie nicht genug Kapazität haben, um all das einfallende Sonnenlicht vollständig zu nutzen. Beide Artikel (Zhu et al., 2008; Boyer, 1982) diskutieren Vorschläge für genetisches Engineering effizienterer Pflanzen.

- 48 **Figure 6.11.** Die Daten sind aus Rogner (2000) (Nettoenergieerträge von wood, rape, sugarcane, tropical plantations); Bayer Crop Science (2003) (rape to biodiesel); Francis et al. (2005) und Asselbergs et al. (2006) (jatropha); Mabee et al. (2006) (sugarcane, Brazil); Schmer et al. (2008) (switchgrass, marginal cropland in USA); Shapouri et al. (1995) (corn to ethanol); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); Royal Society working group on biofuels (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer and Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).
- 49 **Verbrennen von Getreide in einem hochwertigen Brenner verliert 20% der Energie durch den Kamin:** Quellen: Royal Society working group on biofuels (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).