

6a. 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 Onshore-Windkraftpotential Englands oder Deutschlands. 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 **65 %** 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 auch an einem sonnigen Ort in Deutschland scheint die Sonne nur für etwa die Hälfte der Tageslicht-Stunden.◦

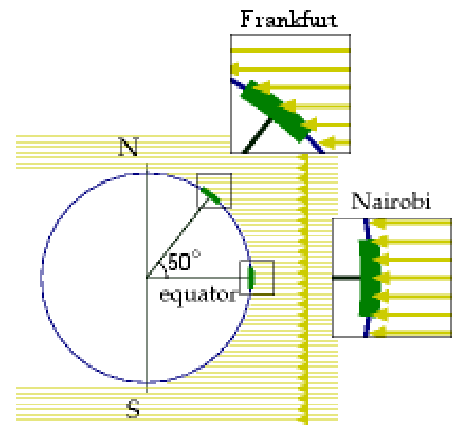


Fig.6.1: Sonnenlicht, das die Erde trifft, am Mittag eines Tages im Herbst oder Frühling. Die Strahlendichte pro Landflächeneinheit ist in Frankfurt (50. Breitengrad) etwa 65% des äquatorialen Wertes.

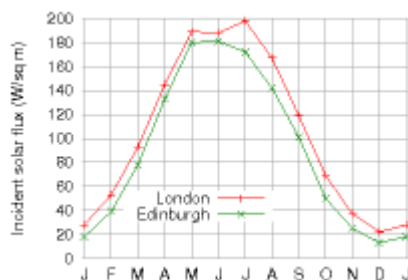


Fig.6.2: Mittlere solare Intensität in London und Edinburgh, als Funktion der Jahreszeiten. Die mittlere Intensität pro Landflächeneinheit ist dort 100 W/m².

Kombiniert man diese drei Faktoren sowie die zusätzliche Komplikation wechselnder Jahreszeiten, ergibt sich, dass die mittlere natürliche Sonnenschein-Leistung auf einem Quadratmeter Süddach ♦bei etwa 145 W/m² liegt, auf flachem Grund etwa bei 130 W/m².◦

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)

Solarthermie

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. 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 145 W/m² des Sonnenlichts in warmes Wasser verwandeln (Fig.6.3). Wir multiplizieren

$$50 \% \times 10 \text{ m}^2 \times 145 \text{ W/m}^2$$

und finden so, dass solare Wassererwärmung

17 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.

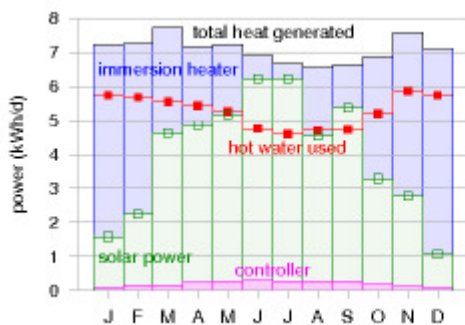


Fig.6.3: Solarenergie erzeugt durch ein 3-m²-Warmwassermodul (grün) und zusätzliche Wärmeanforderung (blau) für die Warmwassererzeugung im Testhaus von Viridian Solar. (Das Foto zeigt ein Haus mit so einem Modul auf dem Dach.) Die mittlere Solarleistung von den 3 m² war 3,8 kWh/d. Das Experiment simulierte 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.

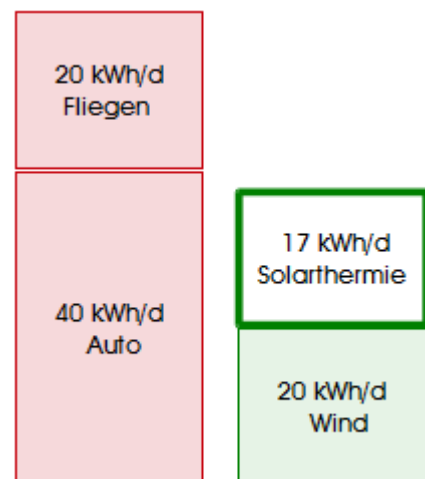


Fig.6.4: Solarthermie: 10 m² thermische Module können (im Mittel) 17 kWh/d thermische Energie liefern.

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 Deutschland, mit 20 % Effizienz und in Südausrichtung, beträgt also♦

$$20 \% \times 145 \text{ W/m}^2 = 29 \text{ W/m}^2.$$

◦Geben wir nun jeder Person 10 m² von den 20% effizienten Solarmodulen und bedecken damit alle Süddächer. Das liefert dann♦

7 kWh pro Tag pro Person.

Wir können nun auch einen Vergleich zwischen Photovoltaik und Solarthermie anstellen: Bezogen auf die installierte Fläche liefert Solarthermie fast dreimal soviel Energie wie PV. Eine PV-Anlage in Kombination mit einer Wärmepumpe (angenommene Jahresarbeitszahl 3) liefert also etwa so viel Heizenergie wie eine solarthermische Anlage gleicher Fläche. Übrigens liegen beide Anlagen auch bei den Bau- und Herstellungskosten etwa gleichauf. Welche Anlage effizienter ist, hängt wesentlich von der Frage der Energiespeicherung ab; wir werden in Kapitel 26 noch darauf zurückkommen.

Da die Fläche von Süddächern auf allen Wohnhäusern in England oder Deutschland nur etwa 10 m² pro Person beträgt, ist eigentlich 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. Andererseits bieten aber nicht nur Wohngebäude, sondern auch gewerbliche Bauten, landwirtschaftliche Anwesen, Parkplatzüberdachungen, Carports usw. Dachflächen, die in die energetische Nutzung einbezogen werden können. Bereits heute ist ein wesentlicher Beitrag zur solaren Stromerzeugung auf landwirtschaftlichen und gewerblichen Gebäuden installiert. Wir können deshalb ohne schlechtes Gewissen beide Beiträge – PV und Solarthermie - mit auf den Produktionsstapel nehmen.

◦PV-Module liefern zwar weniger Energie pro Fläche, allerdings von höchster Stufe: Elektrizität. Eine interessante Variante für sonnige Gegenden bieten vielleicht auch 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.

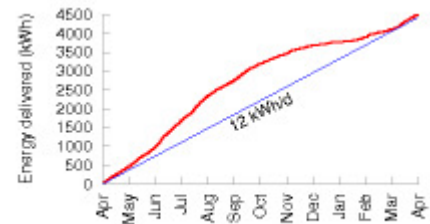


Fig.6.5: Photovoltaik: Ein 25 m² Modulfeld in Cambridgeshire aus 2006. Als Spitzenleistung liefert dieses Feld etwa 4 kW.

Solarfarmen

◦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

Wenn die Kosten für Photovoltaik weiter fallen, so dass wir Module überall in die Landschaft stellen könnten, was wäre dann die maximal erreichbare Energieproduktion? Gut, wenn wir 5% der Landfläche mit 20%-effizienten Modulen bestücken, ergibt das

$$20\% \times 50 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ pro Person} \approx 50 \text{ kWh/d pro Person.}$$

♦Ich hatte übrigens nur 50 W/m² also etwa 1/3 des Süddach-Wertes angenommen, da die Module in aufgeständerten Reihen nach Süden ausgerichtet sein werden und genügend Zwischenraum bleiben muss, um auch bei niedrigem Sonnenstand eine gegenseitige Verschattung zu vermeiden.

◦Die Leistungsdichte (Leistung pro Flächeneinheit) solcher Solarfarmen wäre

$$20\% \times 50 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ W/m}^2 .$$

Dies ist mehr als doppelt so viel, wie derzeit beispielsweise der Bavaria Solarpark (Fig.6.7) ♦oder die Anlage HumuluSol bei Attenkirchen ◦erreicht.

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?



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.

♦Die Photovoltaik in Deutschland hat in den letzten 15 Jahren ein exponentielles Wachstum durchlaufen, ganz ähnlich wie die Kohleproduktion während der industriellen Revolution, vgl. Kap. 1. Etwa alle 16 Monate verdoppelte sich die installierte PV-Leistung, der jährliche Zuwachs 2010 liegt bei 91 %:

Jahr	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Install. Leistung in MW _p	100	178	258	408	1018	1881	2711	3811	5311	9800	16914
Erzeugung in GWh	64	116	188	313	557	1282	2220	3075	4000	6200	12000

Die PV-Kapazität, die man braucht, um die 50 kWh/d pro Person zu liefern, ist fast 100 mal höher als die derzeit deutschlandweit installierte Photovoltaik. Bei gleichbleibender Zuwachsrate würden wir das etwa 2019 erreichen. In diesen Zahlen sind jedoch die im vorigen Abschnitt mit 7 kWh/d/p abgeschätzten Dachanlagen bereits enthalten. Egal, wir legen beide abgeschätzten Beiträge der Photovoltaik mit auf den Produktionsstapel: Dachanlagen mit 7 kWh/d/p und Solarfarmen mit 50 kWh/d/p.

Das Potential von Freiflächenanlagen ist, wie wir gesehen haben, siebenmal größer als das von Dachanlagen.

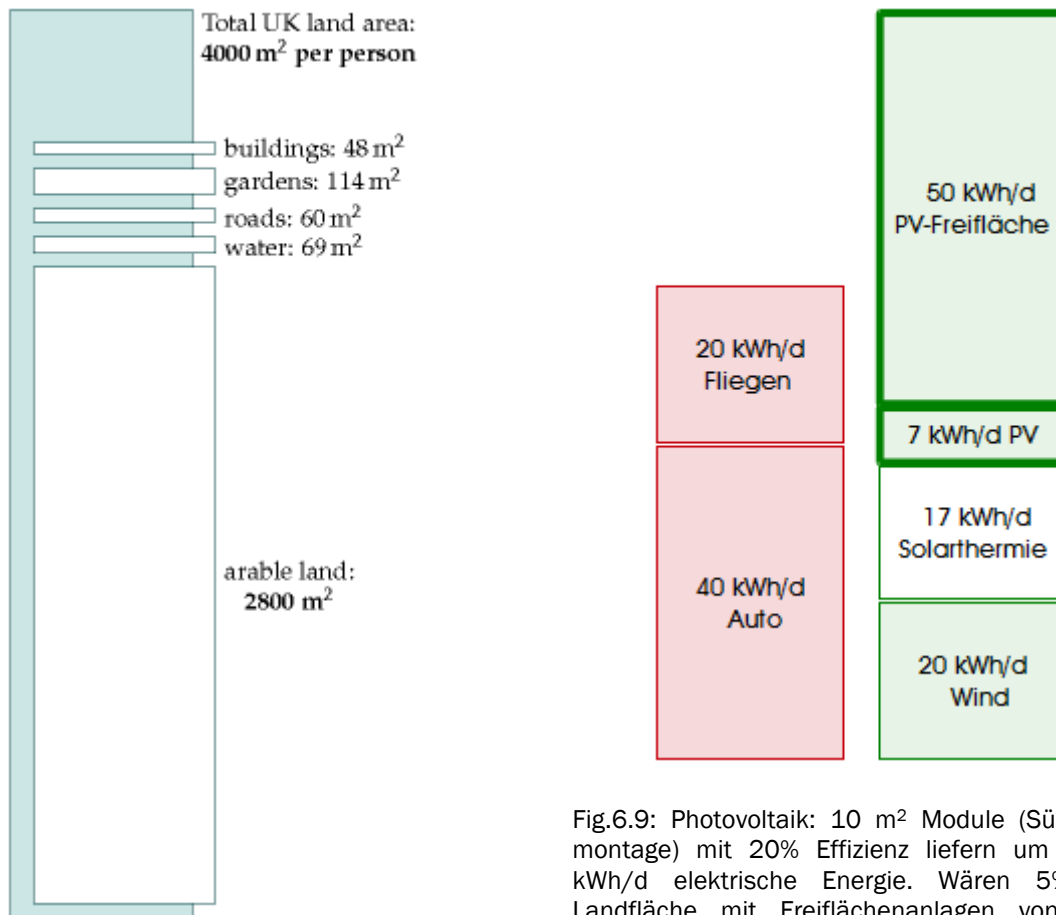


Fig.6.8: Landflächen pro Person in England.

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 20% Effizienz bedeckt (200 m² Module pro Person), lieferten diese 50 kWh/d pro Person.

Während sich bisher PV-Freiflächenanlagen auf die südlichen Regionen Deutschlands konzentrieren, müsste jedoch zum Erreichen des deutschlandweiten 5%-Flächenanteils auch ein nennenswerter Anteil von Modulen in nördlichen Regionen errichtet werden.

Allerdings ist dort die Ausbeute auf Grund der schwächeren Globalstrahlung entsprechend geringer als in Süddeutschland.

◦Eine Möglichkeit ist auch, 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 weiterhin 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.♦

PV-Module sind so teuer, dass sie nie marktwirtschaftlich Strom erzeugen können.

Falsch. Bereits heute liegen die volkswirtschaftlichen Kosten von Solarstrom in ähnlicher Größe wie die anderer Quellen. Noch vor wenigen Jahren war das anders: Damals lagen die Kosten für PV-Module beim drei- bis vierfachen der heutigen Marktpreise. Die Ökonomie ist nicht der Fokus unserer hier angestellten Überlegungen und Betrachtungen, doch lassen Sie uns trotzdem eine grobe Abschätzung der Kosten anstellen, die volkswirtschaftlich für die Bereitstellung von PV-Strom entstehen:

Die Kosten von PV-Strom werden fast ausschließlich durch die Investitionen beim Aufbau der Anlage bestimmt, Betrieb und Wartung einer PV-Anlage spielen dagegen praktisch keine Rolle. Der Bau einer Anlage (komplette Projektkosten) kostet derzeit (Stand 2011) etwa 2000 € pro Kilowatt installierter Leistung⁹. Auf eine 25-jährige Betriebszeit umgerechnet sind das Investitionskosten (ohne Verwaltung oder Zinsen) von 8 c€/kWh. Eine detailliertere Betrachtung wird in Anhang D angestellt.

⁹ Ein Kilowatt installierter Leistung, meist als Kilowatt-peak (kWp) angegeben, ist die Leistung, die die Anlage unter idealisierten Standardbedingungen abgeben kann. Eine Anlage im Umfang von 1 kWp kann bei idealer Sonneneinstrahlung und 20 Grad Celsius Modultemperatur 1 kW Leistung abgeben. Handelsübliche Module benötigen für 1 kWp etwa 6 Quadratmeter Modulfläche, hocheffiziente Module entsprechend weniger. Wären das ganze Jahr Idealbedingungen, würde 1 kWp jede Stunde 1 kWh Energie erzeugen, also insgesamt $365 * 24 = 8770$ kWh pro Jahr. Real kann eine Anlage mit 1 kWp in guten Sonnenregionen Deutschlands über 1000 kWh pro Jahr generieren, das ist etwa 1/8. In schlechteren Regionen liegt die Ausbeute bei etwa 1/10, also 850 kWh/kWp/Jahr.

Neben den Stromgestehungskosten sind die Netzentgelte, also der Anteil, der durch Speicherung, Verteilung und Transport von Strom verursacht ist, ein wesentlicher Kostenfaktor. (Stromgestehungskosten und Netzentgelte sind etwa gleich hoch, je ein Viertel des Endpreises, den Rest teilen sich Zähler- und Abrechnungskosten 10% mit den Steuern und Abgaben, 40%). PV könnte dazu beitragen, den langfristig erforderlichen Netz-Aufwand signifikant zu verringern:

1. PV-Strom wird vorrangig im Süden Deutschlands erzeugt, also weit weg von den großen (geplanten) Offshore-Windfarmen der Nord- und Ostsee. Müsste dieser PV-Strom durch Windstrom aus dem Norden substituiert werden, wären erhebliche Netzausbauten für Überlandtrassen in Nord-Süd-Richtung erforderlich.
2. PV-Strom wird tagsüber erzeugt, wo auch die größte Nachfrage nach Strom besteht. Die Lastkurve des Stromverbrauches hat ihre Spitze am Mittag, wo auch die PV-Stromproduktion ihre Spitzenwerte erreicht. PV-Strom hat deswegen ein weitgehendes Spitzenlast-Profil und ist damit „wertvoller“ als Grundlaststrom etwa aus Kohle-, Atom- oder Windkraftwerken.
3. PV-Anlagen auf Wohnhausdächern werden zu einem großen Teil zur Deckung des häuslichen Eigenbedarfs verwendet. Direkt am Ort der Erzeugung verbrauchter Strom belastet natürlich nicht die Verteilungsnetze und verringert so sowohl die Übertragungsverluste als auch die erforderliche Ausbaugröße der Leitungen.

1. Anmerkungen und Literaturhinweise

- 41 die Neigung zwischen Sonneneinstrahlung und Land: Die Breite von Frankfurt ist $\theta = 50^\circ$; die Intensität der Mittagssonne ist multipliziert mit $\cos \theta \approx 0,6$. Der exakte Faktor hängt von der Jahreszeit ab und schwankt zwischen $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,29$ und $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,89$.
- 41 Und auch an einem sonnigen Ort in Deutschland scheint die Sonne nur für etwa die Hälfte der Tageslicht-Stunden
 •Während in Süddeutschland vielerorts um die 2000 Sonnenstunden jährlich verzeichnet werden (46%), kommt Hamburg nur auf 1700 (39%) [64whwf5].
 England: Die Highlands haben 1100 h Sonnenschein pro Jahr – einen Anteil von 25%. Die besten Fleckchen in Schottland haben 1400 h pro Jahr (32%). Cambridge: 1500 ± 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.
- 41 die mittlere natürliche Sonnenschein-Leistung auf einem Quadratmeter Süddach bei etwa 145 W/m^2 , auf flachem Grund etwa bei 130 W/m^2 : •Daten für Frankfurt am Main, Quelle: Deutscher Wetterdienst DWD, Karte von 2009 [66v68jb]. Sind Sie auch überrascht, dass so wenig Unterschied zwischen Süddach und Flachdach ist? Ich war's. Die Differenz ist tatsächlich nur 10% [6z9epq].
- 42 etwa 10 m^2 Module pro Person: Ich schätzte die Fläche der Süddächer folgendermaßen ab: Ich nahm die mit Gebäuden bebaute Landfläche pro Person (48 m^2 in England (country), Tabelle J.6), davon $\frac{1}{4}$ als Anteil der nach Süden ausgerichteten Teilflächen und erhöhte das um 40 % wegen der Dachneigung. Das ergibt 16 m^2 pro Person. Da die Module üblicherweise nur in vorgegebenen Rechteckgrößen verfügbar sind, so dass immer unbedeckte Dachflächen übrigbleiben, sagen wir also 10 m^2 Modulfläche.

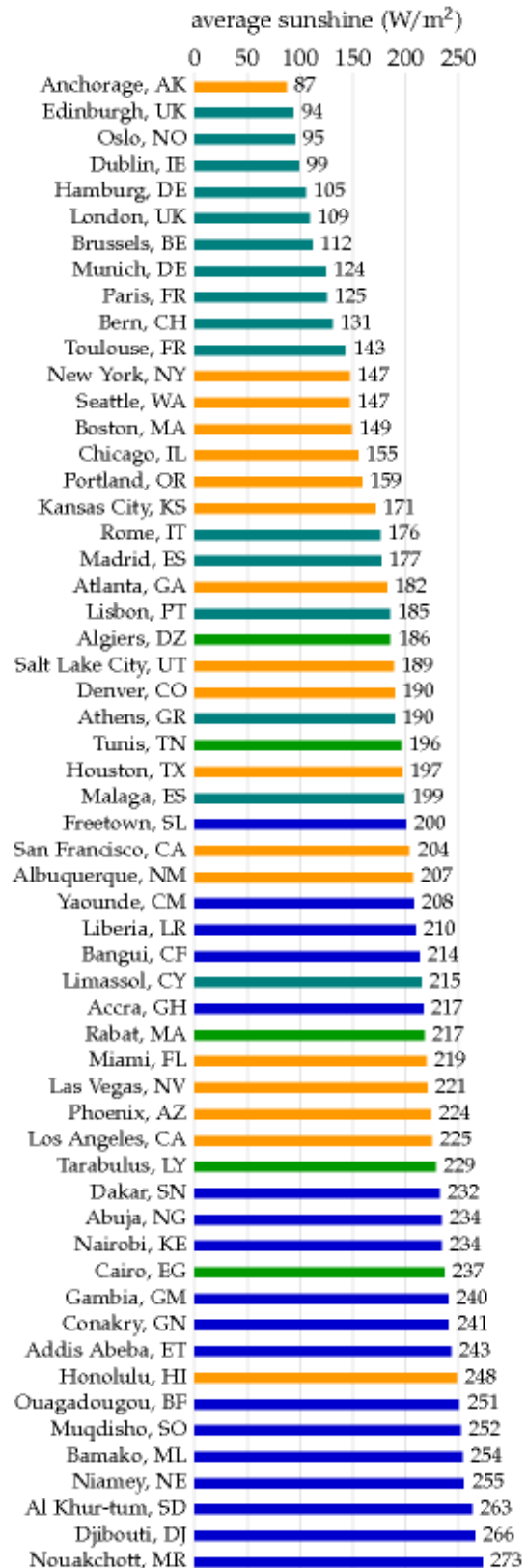


Fig.6.16: Mittlere Leistung von Sonnenlicht auf einer horizontalen Fläche an ausgesuchten Orten in Europa, Nordamerika und Afrika.

43 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.

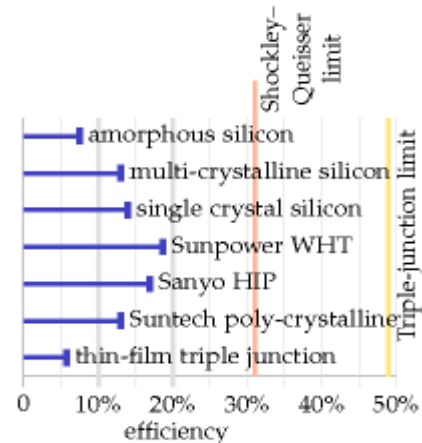


Fig.6.18: Effizienz derzeit am Markt verfügbarer PV-Module. Im Text wird angenommen, dass dachmontierte PV-Module 20%-effizient und Freiflächen-PV 10%-effizient sind. In Gegenden mit 100 W/m² Sonneneinstrahlung liefern 20%-effiziente Module 20 W/m².

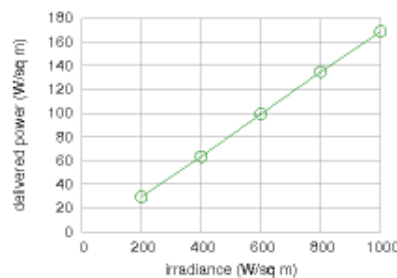


Fig.6.15: Leistung eines Sanyo HIP-210NKHE1 Modul als Funktion der Lichtintensität (bei 25 °C, bei angenommener Ausgangsspannung von 40 V). Quelle: Datenblatt www.sanyo-solar.eu.

43 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.

43 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 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. [2t17t6], www.spectrolab.com. July 2007, University of Delaware

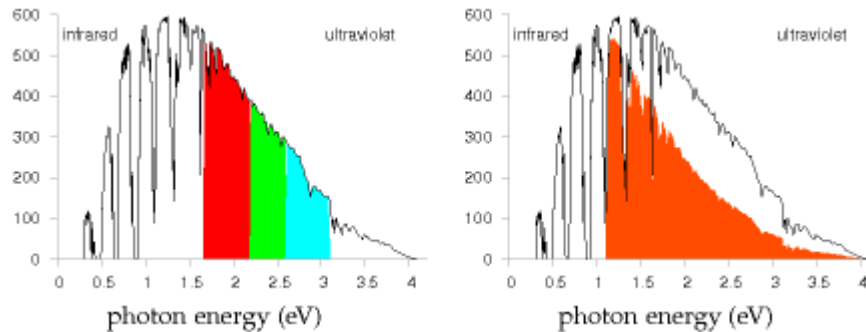


Fig.6.17: Ein Teil der Erklärung von Shockley und Queisser für die 31%-Effizienz-Beschränkung einfacher PV-Module. Links: Das Spektrum des Mittagssonnenlichts. Die vertikale Achse zeigt die Leistungsdichte in W/m^2 pro eV spektralem Intervall. Der sichtbare Bereich ist durch die farbige Hinterlegung 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.

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

43 Übrigens liegen beide Anlagen auch bei den Bau- und Herstellungskosten etwa gleichauf: ♦Diesem Kostenvergleich liegt die folgende Abschätzung zu Grunde: Eine typische solarthermische Anlage mit 100 qm Kollektorfläche schätze ich zum Preisniveau von 2011 mit ca. 30.000 € Materialkosten (Annahme: 40 Module zu je 2,5 m², Kosten 500 €/Modul, Speicherkessel, Verrohrung, Pumpen, Steuerung ca. 10.000 €) und ca. 15.000 € Installationskosten ab. Eine PV-Anlage mit 100 m² Fläche hat eine Nennleistung von etwa 12,5 kWp (Quelle: Schüco, Modulparameter: Beispielmodul mit 0,37 kWp bei 2,69 qm Fläche). Damit erzeugt man etwa 12.000 kWh Strom jährlich (bei jährlich 950 kWh/kWp). Bei einem PV-Modulpreis von ca. 1800 €/kWp sowie zusätzlichen Material- (Wechselrichter, Unterkonstruktion) und Installationskosten von 500 €/kWp käme die PV- Anlage auf Gesamtkosten von ca. 30.000 €. Setzt man für die Wärmepumpe einen Betrag von 10.000 bis 15.000 € an, liegt man in der gleichen Größenordnung wie die Solarthermie-Anlage.°

43 Heliodynamics – www.hdsolar.com. Siehe Fig.6.19. Eine Reflektorfläche von 32 m² (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/m² Wärme und 12 W/m² 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



Fig.6.19: eine kombinierte Wärme- und-Strom-Solaranlage von Heliodynamics.

Energiebedarf eines Europäers: **125 kWh/d**. Ein ähnliches System stellt Arontis her, www.arontis.se.

- 44 **der Solarpark in Mühlhausen:** Diese 25-Hektar-Solarfarm soll 0,7 MW liefern (17.000 kWh pro Tag). **Die Anlage Humulusol bei Attenkirchen:** ♦15.000 m² Module (2,5 MWp) stehen dort auf 57.000 m² eingezäunter Fläche. Sie liefern 20 W pro m² Modulfläche im Jahresmittel, das sind 5,3 W pro m² Boden, siehe [43ez8eq].

◦Die U-Bahn-Station Stillwater Avenue in New York hat amorphe Silizium-Dünnschicht-Module in ihr Dach integriert, die **4 W/m²** liefern. Das Nellis Solarkraftwerk in Nevada wurde im Dezember 2007 fertiggestellt. Es soll auf 56 Hektar 30 GWh pro Jahr erzeugen, das sind **6 W/m²** [5hzs5y]. Serpa Solar Power Plant, Portugal (PV), "das weltgrößte Solarkraftwerk" [39z5m5] [2uk8q8] hat der Sonne nachgeführte Module auf 60 Hektar d.h. 600.000 m² oder 0,6 km², die 20 GWh pro Jahr, d.h. 2,3 MW im Mittel liefern sollen. Das ist eine Leistung pro Flächeneinheit von **3,8 W/m²**.

- 45 **Die PV-Kapazität, die man braucht, um die 50 kWh/d pro Person zu liefern, ist fast 100 mal höher als die derzeit deutschlandweit installierte Photovoltaik:** ♦50 kWh/d/p entsprechen 1460 GWh jährlich oder 1500 MWp installierter Leistung. Die installierte Leistung in Deutschland Ende 2010 liegt bei 17 GW bei einem jährlichen Zubau von 7 GW. Nach Preisen von 2010 (2000 €/kWp) ergeben sich für 50 kWh/d/p Kosten von 36.000 € pro Person, eine Gesamtinvestition von ca. 3 Billionen €. 2010 war weltweit eine Spitzen-Leistung von 43 GW installiert, der jährliche Zubau liegt bei ca. 16 GW. Quelle: Schneider et al. (2011) [4ysf89m].

