

These 8

Ökobilanz der Photovoltaik verlangt mehr Transparenz!

Beim aktuellen Diskurs über alternative Energiequellen spielt die *Photovoltaik* (PV) eine eminente Rolle. Im Rahmen der Forschung und Entwicklung (F&E) der photovoltaischen Energieumwandlung wurden in letzter Zeit weltweit enorme Anstrengungen unternommen, die zu eindrucksvollen Resultaten bezüglich Technologie und Anwendungen geführt haben. Das öffentliche Bewusstsein für PV hat heute ein hohes Niveau erreicht. Die zentrale Frage der *Umweltverträglichkeit* wurde bisher aber ungenügend behandelt. Dafür massgeblich ist die sog. *Ökobilanz*, d.h. die Quantifizierung des Verhältnisses von „Input“ (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Fremdleistungen, Energie, Luft etc.) und „Output“ (Produkte oder Leistungen, stoffliche Emissionen in Form von Abfall, Abgasen etc.) eines technischen Systems – hier also von PV-Anlagen – während des *ganzen Lebenszyklus* aller Anlagenteile und zwar von der Bereitstellung der Rohstoffe bis und mit deren Entsorgung. Im Zuge des zukünftig vermehrten Einsatzes solcher Anlagen besteht die Gefahr, dass diesem Sachverhalt weiterhin nur am Rande Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Die vorliegende These *beschränkt sich* auf die *Beurteilung der Umweltverträglichkeit* in Bezug auf *Herstellung, Betrieb, Einsatz und Abbruch von PV-Anlagen* einschliesslich entsprechender wirtschaftlicher Aspekte. Die immensen Probleme technischer und ökonomischer Natur der *Gewährleistung einer ausreichenden Versorgungssicherheit* bei flächendeckender, verteilter Energieerzeugung mittels PV sind hier nur am Rande vermerkt.

1. Vom Sand zum Modul: Fabrikation und Typen von Solarzellen

Unter dem Begriff „photovoltaische Energieumwandlung“ versteht man generell die direkte Umwandlung von Lichtenergie – der Sonnenstrahlung - in elektrische Energie, also ohne den Umweg über die Wärme. Diese Umwandlung vollzieht sich zumeist in einer „photovoltaischen Zelle“ oder auch „Solarzelle“, d.h. in einer Scheibe aus einem Halbleiter-Material, gewöhnlich Silizium (Si). Silizium ist bekanntlich der wichtigste Halbleiter in der Elektronik-Branche. Im Folgenden befassen wir uns mehrheitlich mit solchen Zellen, die seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts einen wachsenden, jedoch noch immer kleinen Beitrag in der Elektrizitätserzeugung leisten.

Silizium ist in der Erdkruste weit verbreitet, nach Gewicht an zweiter Stelle nach Sauerstoff (O₂ ca. 46%, Si 27%). Silizium-Verknappung ist daher nicht zu befürchten. Allerdings kommt Si in Form des Silikatminerals SiO₂ (Quarz) vor, aus dem es in möglichst reiner Form extrahiert werden muss, damit es als Basismaterial für den Fabrikationsprozess von Elektronik-Bauteilen und Solarzellen verwendet werden kann.

Ganz am Anfang der Fabrikationskette findet man den Quarzsand, der zu einem Reduktionsofen transportiert wird, wo durch Schmelzen Rohsilizium mit 1 bis 3% Verunreinigungen gewonnen wird. Aus dem Rohsilizium wird dann mit verschiedenen energieaufwendigen

Verfahren Rein-Si gewonnen, das letztendlich in Form von Barren (engl. Ingots, runde Säulen oder Quadern) entweder aus einkristallinem oder aus polykristallinem Material vorliegt. Die Ingots werden anschliessend mit speziellen Vorrichtungen in Scheiben (Wafers) von wenigen Hundert Mikrometern Dicke zersägt. Durch die mechanische Bearbeitung geht mehr als die Hälfte des Si-Materials verloren.

Es folgen etliche Schritte für die technologische Prozessierung der Wafers, wie etwa Oberflächenbehandlung, Dotierung der Scheibe zur pn-Diode, elektrische Kontaktierung, Antireflex-Beschichtung und elektrisch-optische Charakterisierung. Danach sind die Zellen bereit für die Montage in Solar-Modulen. In den Modulen werden die Zellen aneinander gereiht und elektrisch seriell geschaltet. Beispiel: 72 Zellen in Serie ergeben bei voller Sonneneinstrahlung ca. 36 Volt Modul-Klemmenspannung. Die Zellen werden unter einer gehärteten Glasscheibe angebracht, und das Ganze wird auf einem Aluminiumrahmen montiert. Module werden in Gruppen so elektrisch geschaltet, dass an den Klemmen der Gruppe die gewünschte Strom-Spannungs-Kennlinie unter Sonneneinstrahlung erzeugt wird.

Jedes Modul wird u. a. durch seine elektrische Spitzen-Nennleistung in Watt peak (Wp) charakterisiert, die der Hersteller unter Laborbedingungen misst. Typische Leistungen findet man im Bereich von etwa 100 bis 300 Wp pro Modul, je nach Modulgrösse und Typ der verwendeten Zellen. Der Wirkungsgrad (elektrische Ausgangsleistung zu optischer Eingangsleistung) wird für optimale Einsatzbedingungen gemessen, d.h. für maximale elektrische Ausgangsleistung bei Standard-Beleuchtungsstärke von 1000 W/m². Werte des maximalen Wirkungsgrades liegen im Bereich von etwa 12 bis 20% bei kristallinen Si-Zellen. Den grössten Marktanteil weisen Zellen aus polykristallinem Si auf, in welchen einkristalline Bereiche verschiedener Ausrichtung vorkommen, die aneinander angrenzen (Korngrenzen). Sie sind in der Herstellung etwas billiger als einkristalline („monokristalline“) Zellen, ihr Wirkungsgrad ist aber auch etwas kleiner. Mono- und polykristalline Si-Zellen machen gegenwärtig (2013) nahezu 90% des weltweiten Marktes aus.

Viel weniger Halbleitermaterial als die kristallinen Si-Zellen benötigen die Dünnschichtzellen (Dicke des aktiven Materials nur etwa 1 Mikrometer). Sie werden aus Silizium in amorpher Form hergestellt (a-Si), aber auch aus seltenen Materialien der Erdkruste wie Cadmium und Tellur (Cadmiumtellurid, CdTe). Trotz grossen Investitionen und den tieferen Herstellungskosten ist ein überzeugender Marktdurchbruch noch nicht gelungen, hauptsächlich wegen des kleineren Zellen-Wirkungsgrades im Vergleich zu kristallinem Si und den daraus resultierenden grösseren Flächen für die Installation von PV-Anlagen.

2. Herstellung und Einsatz von Modulen – eine Marktübersicht

Das Produktionsvolumen von Solarzellen und PV-Modulen ist seit 2007 weltweit rasant gestiegen. Allerdings scheint die Expansionswelle seit 2012 etwas gebremst worden zu sein, hauptsächlich wegen der restriktiveren Politik von staatlichen Subventionen beim Aufbau von netzgekoppelten PV-Anlagen. Trotzdem: Obwohl genaue Zahlen noch ausstehen, sprechen Schätzungen von ca. 50 GWp produzierter Zellenleistung weltweit für 2012. Zum Vergleich: Diese Zahl bedeutet quasi eine Verzehnfachung der Produktion von 2007 bis 2012. Überhaupt hat die explosive Expansion des PV-Sektors alle Prognosen obsolet werden lassen. Schätzungen der EU-Kommission von 2004 rechneten mit bescheidenen 3 GWp installierter Leistung in der EU für 2010; es wurden fast 30 GWp! Die fulminante Etab-

lierung der PV-Technologie lässt die Abklärung von offenen Fragen in Bezug auf Auswirkungen des Einsatzes von Solarzellen geradezu Pflicht werden. Dazu gehören die Einflüsse auf die Umwelt.

Etwa 90% der kommerziell erhältlichen Solarzellen und PV-Module wurden 2012 in Asien hergestellt. China ist bei weitem der grösste Produzent. Unter den zehn grössten Solarfirmen findet man heute (2013) keine mehr aus Europa.

Entscheidend für den weiteren Ausbau der PV ist der Preis der daraus gewonnenen elektrischen Energie. Genaue Aussagen zu wagen ist hier schwierig, weil unterschiedliche Faktoren die Preisberechnung bei der Planung und beim Betrieb einer netzgekoppelten Anlage beeinflussen. Der Modulpreis ist nur einer davon. Es kommen hinzu die klimatischen Parameter des Ortes (u. a. Sonnenbestrahlung und Temperatur), Installationskosten, Grösse der Anlage etc., wobei die lange Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren generell als gesichert gilt. Bei der Planung von Anlagen geht man in der Regel von einer Lebensdauer von 25 Jahren aus. Tendenziell beobachtet man in den letzten Jahren stark sinkende Modulpreise u.a. als Folge des Konkurrenzkampfes der (zumeist staatlich subventionierten) Herstellerfirmen, was wiederum die Kosten der PV-erzeugten Elektrizität günstig beeinflusst. Netzparität, d.h. gleiche Kosten für die ins Netz eingespeisene elektrische Energie wie für die vom Stromanbieter eingekaufte Energie scheint in Ländern mit starker Sonneneinstrahlung, etwa im europäischen Süden, bereits erreicht worden zu sein.

Die kumulierte installierte und an das Netz angeschlossene PV-Leistung in der Schweiz betrug Ende 2011 ca. 187 MWp [1]. Eine andere Quelle [4] veranschlagt diese Leistung auf 207 MWp. Die schweizerische Elektrizitätsproduktion aus Sonnenenergie erreichte im Jahr 2012 ca. 1150 TeraJoule (TJ), ein Anstieg von nahezu 90% gegenüber 2011 [1]. Trotzdem stellt der Wert für 2012 nur ca. 0.49% der gesamten Netto-Elektrizitätsproduktion dar. Die installierte PV-Leistung wird per Ende 2012 auf ca. 350 MWp geschätzt. Der „Schweiz. Fachverband für Sonnenenergie“ zielt auf die Erzeugung von 12'000 GWh aus PV-Anlagen im Jahr 2025, ein wahrlich ehrgeiziger Wert, der etwa 20% des heutigen Strombedarfs decken würde. Etwas bescheidener wirkt eine Studie der ETH Zürich [5], die Werte von 14'000 GWh für 2050 erwähnt und die dazu notwendige Fläche auf den (konservativen) Wert von 58 km² schätzt.

Der Publikation „Öffentliche Energieforschung in der Schweiz 2011“ des Bundesamtes für Energie [2] entnimmt man, dass etwa 90% der Fördergelder für PV in die Entwicklung von Methoden zur Verminderung der Anlagekosten fliessen, der Rest von 10% in die Entwicklung von Dünnschichtzellen.

Auch in Deutschland hat der PV-Markt dank grossen staatlichen Subventionen eine meisterhafte Entwicklung durchgemacht, die allerdings seit 2012 auch etwas abgeflacht ist. Die installierte Leistung in Deutschland per Ende 2012 wird auf etwa 32 GWp geschätzt. Im Jahr 2012 haben die PV-Anlagen nach vorläufigen Schätzungen [6] etwa 30'000 GWh elektrische Energie in das Netz abgegeben, was ca. 5.7% des totalen Bedarfs an Endenergie (Nettostromverbrauch) entsprechen dürfte. Ähnliche Entwicklungen finden in Österreich statt, per Ende 2012 schätzt man dort die kumulierte installierte Leistung auf 417 MWp.

3. Kleine und grössere Anlagen: die Komponenten

Netzgekoppelte PV-Anlagen nutzen das öffentliche Elektrizitätsnetz als Speichermedium für die erzeugte Energie. Die Module werden etwa auf Dächern aufgestellt oder sie übernehmen einen Teil der Fassadenverkleidung. Typische installierte Leistungen liegen im Bereich von 2 bis 10 kWp. Grössere Leistungen (im Ausland bis mehrere Hundert MWp, geplant bis über 1 GWp) erzeugen eigentliche Solarkraftwerke, die auf grossen freien Flächen aufgestellt sind. Der jährliche Energieertrag pro kWp variiert zwischen ca. 700 und 1200 kWh für klimatische Verhältnisse in Mitteleuropa. In der Schweiz wird mit einem jährlichen Mittelwert von 950 kWh/kWp gerechnet [3].

PV-Anlagen erzeugen Strom dezentral mit Spitzenwerten um die Mittagszeit bei sonnigem Wetter [9]. Netzgekoppelte PV-Systeme sind an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Bei zunehmender Dichte von PV-Anlagen stellen sich Fragen nach einer möglichen Überlastung des Netzes in der Mittagszeit, wenn also die PV-Anlagen grosse Leistungen an das Netz liefern. Auch wenn die Prognosen für die zukünftige Präsenz der Photovoltaik in der schweizerischen Energielandschaft voneinander abweichen [5], muss man sich rechtzeitig mit Themen der Stabilität des elektrischen Versorgungsnetzes wie Versorgungssicherheit, Speicherkapazität und Dynamik (Spannungs- und Frequenz-fluktuationen) auseinandersetzen [8].

PV-Systeme müssen mit Wechselrichtern versehen werden, welche die Umwandlung der Gleichspannung an den Klemmen der PV-Anlage in Wechselspannung für die Netzeinspeisung übernehmen. Je nach Anlagegrösse entfallen etwa 60% der Anlage-Erstellungskosten auf die Module, der Rest auf die übrigen Systemteile und Personalkosten (Montage, Verkabelungen, Wechselrichter, Vorrichtungen für optimale Bestrahlung und maximalen Leistungstransfer in das Netz (MPPT, maximum power point tracker), Blitzschutz, Infrastruktur für den Anlageunterhalt u. a.). Die PV-Anlagepreise sind im Fluss und sind in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Für grössere Anlagen (über 100 kWp) besteht die Aussicht auf eine Annäherung der Anlagekosten an die 1 CHF/Wp Grenze, sollten die Modulpreise weiterhin stark fallen. Stromgestehungs-, inkl. Betriebs- und Unterhaltskosten werden auf weniger als 10 Rp/kWh geschätzt [3].

4. Energiebilanz: vom Spiel der Parameter zu konkreten Zahlen

Zur Quantifizierung der Energiebilanz bzw. der Effizienz eines PV-Kraftwerks wird üblicherweise der Erntefaktor ε , d.h. das Verhältnis der genutzten E_g zur aufgewendeten Energie herangezogen. Während der Lebensdauer der Anlage setzt sich die aufgewendete Energie aus einem festen Anteil E_f für Aufbau plus Abbau der Anlage und einem variablen Anteil E_v für die Wartung zusammen. Somit lässt sich ε schreiben als

$$\varepsilon = E_g / (E_f + E_v)$$

Werte von ε grösser als eins bedeuten eine positive Gesamtenergiebilanz. Das ist generell der Fall bei PV-Anlagen, allerdings variieren die Erntefaktoren erheblich und sind erwartungsgemäss u. a. stark von der Sonnenbestrahlung und vom Typ der verwendeten Zellen

abhängig. Für kristalline Si-PV-Anlagen in Mitteleuropa scheinen Erntefaktoren von etwa 7 – 9 der Realität zu entsprechen.

Bisweilen wird auch die Energie-Rücklaufzeit als Charakteristik eines PV-Systems angegeben, d.h. die Zeit, die nötig ist, um die aufgewendete Energie mit der genutzten Energie zu amortisieren. Für hiesige Verhältnisse werden Werte von etwa 3 Jahren in Betracht bezogen, wobei auch hier mit Schwankungen zu rechnen ist. Nachteil bei der Verwendung des Begriffs Rücklaufzeit ist, dass die Lebensdauer der Anlage ausser Acht gelassen wird.

Dank F&E in der PV kann man prinzipiell mit einer ständigen Verbesserung der Energiebilanz von zukünftigen Modulen rechnen. Die Si-Solartechnologie gilt aber als relativ ausgereift, grosse Sprünge, z.B. in der Erhöhung des Wirkungsgrades, werden kaum erwartet. Viel Aufwand wird in die Entwicklung von Dünnschichtzellen investiert, die ihr industrielles Potenzial zu beweisen haben werden. Es ist damit zu rechnen, dass die „klassische“ kristalline Si-Zelle noch für viele Jahre das wichtigste Bauelement der photovoltaischen Energieumwandlung bleiben wird.

5. Oekobilanz: nicht alles sonnig !

Die Sorgen über die Zukunftsfähigkeit von fossilen Energieträgern, die Auswirkungen auf die Umwelt und die Unsicherheiten über die Zukunft der Kernenergie waren und sind Schlüsselfaktoren in der öffentlichen Wahrnehmung, welche die Expansion der PV begünstigen. Leider wird dabei oft vernachlässigt, dass die Verwendung der PV wie jede Methode der Stromerzeugung sicher und umweltverträglich zu erfolgen hat. Auf den ersten Blick sind die positiven Aspekte der PV überzeugend. Das Sonnenlicht steht gratis zur Verfügung. Silizium ist reichlich vorhanden (bei Rohstoffen für einige Dünnschichtzellen, wie CdTe und Galliumarsenid, ist dies allerdings nicht der Fall). Die Kosten der Elektrizitätsproduktion sind dauernd am Sinken. Der Energie-Erntefaktor ist beachtlich. Die Umweltbelastung scheint vernachlässigbar – doch deren Quantifizierung erweist sich bei näherer Betrachtung als wenig verlässlich.

Die direkten und indirekten Umweltauswirkungen von PV-Anlagen müssen während des ganzen Lebenszyklus eruiert werden, der aus den folgenden Phasen besteht:

- Akquisition des Rohmaterials,
- Materialverarbeitung,
- Zellen- und Modulherstellung,
- Bau und Betrieb der Anlage,
- Stilllegung,
- Rezyklierung,
- Abfallentsorgung.
- Ausbau des Leitungsnetzes.

Das Augenmerk fällt in der Regel auf den Betrieb der PV-Anlage, der in der Tat die Umwelt kaum mit der Emission von Treibhausgasen belastet. Dies ist jedoch nicht der Fall für die anderen Lebensphasen. Die PV-Herstellung verschlingt generell eine grosse Energiemenge. Zum Beispiel entstehen bei der Zellenherstellung die hochwirksamen Treibhausgase SF₆ (Schwefelhexafluorid) und NF₃ (Stickstofftrifluorid), deren Treibhauswirkungen etwa 22'000 bzw. 17'000 mal grösser sind als diejenigen von CO₂. Das Thema ist brisant,

wenn man bedenkt, dass fast 90% der Zellen in asiatischen Ländern entstehen, und zwar in Anlagen, deren Sicherheitsstandards nicht über alle Zweifel erhaben sind.

CO₂ eq. (eq. für äquivalent) ist die Quantität von CO₂, welche die gleiche Auswirkung auf die Umwelt hätte wie andere Treibhausgase, die bei der Herstellung, beim Betrieb und bei der Entsorgung einer Anlage entstehen. Aus der Literatur geht hervor, dass die PV tendenziell signifikant grössere äquivalente CO₂-Emissionen aufweist als andere Methoden der alternativen Energiegewinnung wie etwa Windturbinen und Wasserkraft. Darüber hinaus zeigen die festgestellten Werte für die PV eine erhebliche Streuung mit Bandbreiten zwischen 18 und 360 g/kWh CO₂ eq. [7] [10]. Hier sind weitere umfassende und bis ins technologische Detail gehende Untersuchungen gefragt.

Die Angabe des CO₂ eq. adressiert überdies nur einen Aspekt des Umwelteinflusses [10]. Es bleibt eine Reihe von wichtigen Umweltfragen, die auch berücksichtigt werden müssen, wie Landschaftsschutz, Land- und Wasserverschmutzung, Entsorgungsfragen von Chemikalien, etc.. Eine überzeugende Methodik, die in der Lage wäre, die offenen Fragen zur Erfassung aller möglichen Umwelteinflüsse des PV-Einsatzes für die Elektrizitätsgewinnung zu beantworten, ist noch zu entwickeln.

6. Fazit

Die *Photovoltaik* (PV) hat in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte in Bezug auf Produktion und Einsatz von Anlagen für die Elektrizitätserzeugung zu verzeichnen, die entsprechende Technologie kann im Wesentlichen als *ausgereift* gelten. Auch wenn die installierten PV-Anlagen in der Schweiz und in anderen europäischen Ländern gegenwärtig erst im Stande sind, einige Prozente des mittleren Nettostrombedarfs zu decken, muss realistischerweise mit einer starken *Vermehrung netzgekoppelter PV-Anlagen* in den nächsten Jahren gerechnet werden. Allerdings ist die Entwicklung der PV in erheblichem Masse von der *Subventionspolitik* der einzelnen Staaten abhängig, die sich ihrerseits zumeist als *wenig zielführend* erweist und schon heute zu starken *Verzerrungen auf dem Strommarkt* Anlass gibt. Insbesondere fehlt jedoch eine umfassende und überzeugende Quantifizierung aller Einflüsse der PV auf die Umwelt, die es erlauben würde, dafür eine *vertrauenswürdige Ökobilanz* aufzustellen. Hierzu wäre auch eine von den zuständigen Behörden anerkannte, möglichst *objektive Gewichtung* der einzelnen Bilanzpositionen einzuführen, um aussagekräftige *Vergleiche* mit anderen Elektrizitätserzeugungsverfahren zu ermöglichen. Nicht vergessen sei zudem die *Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes von Gebäuden und Landschaften* (Dach- und Fassadenstrukturen, Panelfelder, Spiegeleffekte), dessen Erhaltung gerade für ein Touristik-Land wie die Schweiz besonders wichtig ist, aber als *immaterieller Wert* zahlenmässig kaum erfasst werden kann.

Literatur

[1] Bundesamt für Energie, BFE, Berichte zum Thema Photovoltaik

<http://www.bfe.admin.ch/forschungphotovoltaik/02329/02476/index.html?lang=de>

[2] Bundesamt für Energie, BFE, „Öffentliche Energieforschung in der Schweiz 2011“

www.bfe.admin.ch/php/.../stream.php?extlang...

[3] Bundesamt für Energie, BFE, Bericht „PV-Anlagekosten 2012“

www.bfe.admin.ch/php/.../stream.php?...

[4] International Energy Agency, IEA, Berichte zum Thema „Photovoltaics“

<http://www.iea-pvps.org/>

[5] ETH Zürich, Bericht „Energiezukunft Schweiz“, 2011

http://www.cces.ethz.ch/energiegesprach/Energiezukunft_Schweiz_20111115.pdf

[6] Fraunhofer ISE Jahresbericht 2012,

<http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/infomaterial/jahresberichte/fraunhofer-ise-jahresbericht-2012.pdf>

[7] H.-J. Wagner et al., BWK-Magazin, Band 59, No.10, S. 44-52, 2007

[8] H. Häberlin, „Wieviel Solarstrom erträgt das Netz?“, Elektrotechnik 8/11, S.21-27, 2011

[9] H. Häberlin, Photovoltaics. System Design and Practice, Wiley, 2012

[10] Mariska de Wild-Scholten et al., Carbon and Environmental Footprinting of Photovoltaic Modules, Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, 24.-28.Sep.2012, Frankfurt, pp. 4374-4378

G.G. 27.März 2013

Änderungen: 01. Mai 2013, 27. Aug. 2013