

Photovoltaische Großanlagen – Technologie und Realisierung

Dr. Hansjörg Gabler

ZSW

hansjoerg.gabler@zsw-bw.de

Hans-Dieter Mohring

ZSW

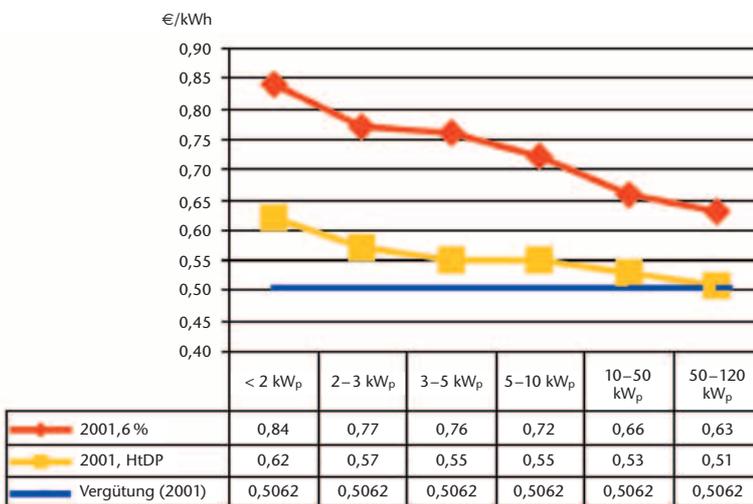
hans-dieter.mohring@zsw-bw.de

Einleitung

Photovoltaik ist die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Photovoltaische Energietechnik kann im Kleinen eingesetzt werden: aus wenigen Quadratzentimetern Solarzellenfläche auf einem Taschenrechner werden bei Innenraumbeleuchtung die wenigen Milliwatt an elektrischer Leistung erzeugt, die zum Betrieb des Gerätes ausreichen. Das macht Photovoltaik innerhalb der erneuerbaren Energien einzigartig. Photovoltaik kann aber ebenso im Großen eingesetzt werden. Solaranlagen mit Einzelflächen von mehreren 10.000 Quadratmetern erzeugen unter voller Sonnenstrahlung Leistungen von mehreren Millionen Watt (Megawatt). Fünf Solarstromanlagen der Megawattklasse sind derzeit in Deutschland in Betrieb, zwei weitere sind in Bau. Extreme Modularität ist eine von keiner anderen Technik gebotene Besonderheit photovoltaischer Energietechnik.

Abbildung 1

Stromgestehungskosten



Quelle: Erfahrungsbericht zum EEG, Bundesregierung (BMWi und BMU), Juni 2002

Einspeisevergütung nach EEG und Stromgestehungskosten für PV-Anlagen unterschiedlicher Größenklassen (nach [2]). Die rote Kurve geht von einem Zinssatz von 6% p. a. für das Investitionskapital aus, die gelbe Kurve unterstellt die günstigen Zinskonditionen im HtDP. Die blaue Kurve basiert auf der „Vergütung 2001“ der durch EEG vorgegebenen Vergütung für Strom aus im Jahr 2001 errichteten PV-Anlagen.

Am Ende des Jahres 2002 sind in Deutschland etwa 250 Megawatt photovoltaischer Erzeugungskapazität installiert, aufgeteilt in 50.000 Einzelanlagen mit typischerweise 1 bis 100 Kilowatt Leistung. Elektrisch gekoppelt sind alle diese Anlagen über das Stromverteilungsnetz. Der technische Unterschied zwischen photovoltaischer Kleinanlage und großem photovoltaischen Kraftwerk ist unscharf. Eine Arbeitsgruppe der Internationalen Energieagentur hat deshalb die folgende Definition vorgeschlagen [1]:

Als „PV-Einzelanlagen“ werden 1 kW- bis 10 kW-Systeme bezeichnet, angeschlossen an das Stromnetz, auf Hausdächern, meist in privater Nutzung sowie 10 bis 100 kW-Systeme auf Dächern und in Fassaden, meist in gewerblicher Nutzung.

„PV-Großanlagen“ sind Anlagen der Leistung von 100 kW bis zu einigen Megawatt auf Dächern, Verkehrsbauten oder auch anderweitig nicht genutzten Landflächen (z.B. stillgelegte Mülldeponien).

Zu „Very Large Scale Photovoltaic Systems (VLS-PV)“ zählen Anlagen mit Leistungen von 10 Megawatt bis zu einigen Gigawatt. Diese sehr großen PV-Anlagen, denkbar für z. B. Wüstenregionen an Orten hoher Sonneneinstrahlung, existieren bis jetzt nur in Planungspapieren.

Stromgestehungskosten

Der Ausbau der photovoltaischen Stromerzeugung in Deutschland erfolgt unter den Bedingungen des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG). Das EEG legt eine Netzabgabevergütung für Elektrizität fest, die aus photovoltaischen Anlagen in Deutschland erzeugt wird. Diese Vergütung betrug für Anlagen, die im Jahr 2001 in Betrieb gingen, 0,506 € je Kilowattstunde. Um Druck auf die Fortentwicklung photovoltaischer Technik und auf die Preisgestaltung der Anbieter dieser Technik auszuüben, reduziert sich die Kilowattstunden-Vergütung, ausgehend von der Festlegung für das Jahr 2001, um jährlich 5%.

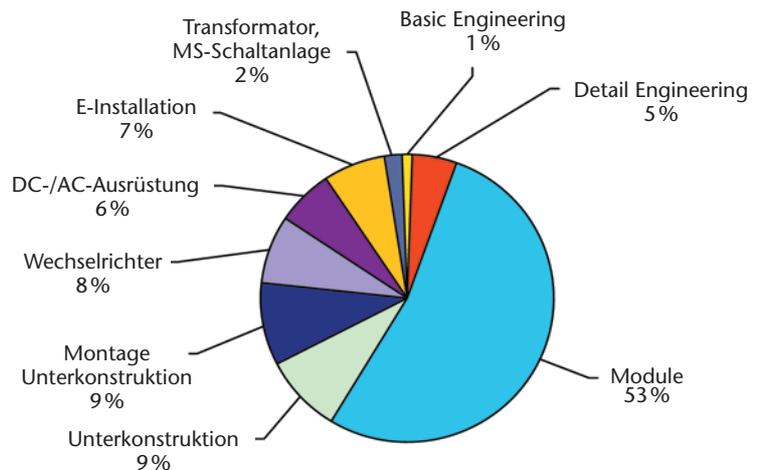
Abb. 1 zeigt, dass die unter einfachen betriebswirtschaftlichen Annahmen (volle Finanzierung der Investition durch Fremdmittel zu einem Zinssatz von 6% p. a.) errechneten Stromgestehungskosten durch die Einspeisevergütung nicht gedeckt werden [2]. Bei zusätzlicher Inanspruchnahme der vergünstigten Zinskonditionen im „100.000-Dächer-Programm (HtDP)“ liegen die Stromgestehungskosten nur noch marginal über der Einspeisevergütung. Die Analyse weist darüber hinaus merkliche Kostenvorteile größerer Photovoltaikanlagen gegenüber kleineren Photovoltaikanlagen aus. Diese Kostenvorteile und die Kostenreduktionspotenziale beim Übergang zu PV-Großanlagen im Megawattbereich sind verursacht durch:

- Kosteneffekte beim Einkauf von Anlagenkomponenten (Photovoltaikmodule etc.)
- spezifische Reduktion der Planungs- und Montagekosten
- mögliche Kosteneffekte in der Anlagenauslegung (Zentralisierung von Wechselrichtern, Netzanschlusskosten etc.)
- die für PV-Großanlagen spezifisch niedrigeren Kosten für professionellen technischen Anlagenbetrieb
- niedrigere Kosten für Verwaltung und Abrechnung von PV-Anlagen im Besitz von Betreibergemeinschaften

In Abb. 2 gibt der Anlagenerrichter ecotec-solar für die PV-Großanlage Relzow (1,5 MW) eine Aufschlüsselung der Investitionskosten im Detail an [3]. Die spezifischen Investitionskosten dieser Anlage liegen mit 4.860 € je Kilowatt installierter Leistung um etwas mehr als 20% unter dem Wert von 6.200 €/kW, den der Erfahrungsbericht zum EEG als Mittelwert über mehrere tausend Einzelanlagen im Leistungsbereich von 3 kW bis 5 kW für das Jahr 2001 ermittelt hatte.

Technik

Technische Konzepte von PV-Großanlagen sind in erster Linie durch den Zweck der Gesamtanlage bestimmt. Zum einen gibt es Systeme, deren einzige Aufgabe die Stromgewinnung ist, und zum anderen gibt es multifunktionale Systeme, die weitere Aufgaben wie Lichtlenkungs- und Wärmedämmungsfunktion erfüllen und in



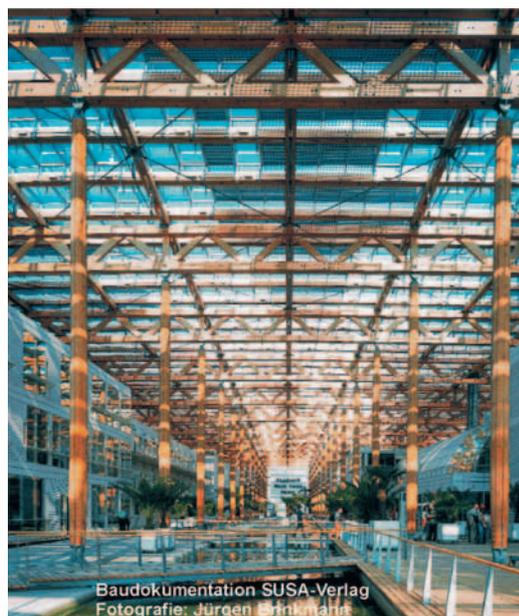
Anlage Relzow, 1,5 MW (2002)
 Netto-Gesamtpreis (schlüsselfertig) 4,860 €/kW_p*
 Anlagen im Leistungsbereich 3 – 5 €/kW (2001) 6.200 €/kW (Mittelwert)**

* www.ecotec-solar.de
 ** Erfahrungsbericht zum EEG, Juni 2002

denen die Photovoltaik eine ästhetische Funktion für die Architektur übernimmt. Am Beispiel zweier Anlagen vergleichbarer Größe werden unterschiedliche Konfigurationen und Verschaltungskonzepte diskutiert.

„Auf-Dach-Anlage“ der Messe München

Abb. 2 zeigt die 1-Megawatt-Solarstromanlage auf dem Dach der Messe München Riem, die seit Februar 1998 am Netz ist. Zu dieser Zeit



Baudokumentation SUSA-Verlag
 Fotografie: Jürgen Linkmann

Abbildung 2
 Investitionskostenstruktur einer PV-Großanlage

Abbildung 3
 1-Megawatt-Solarstromanlage auf dem Dach der Messe München Riem

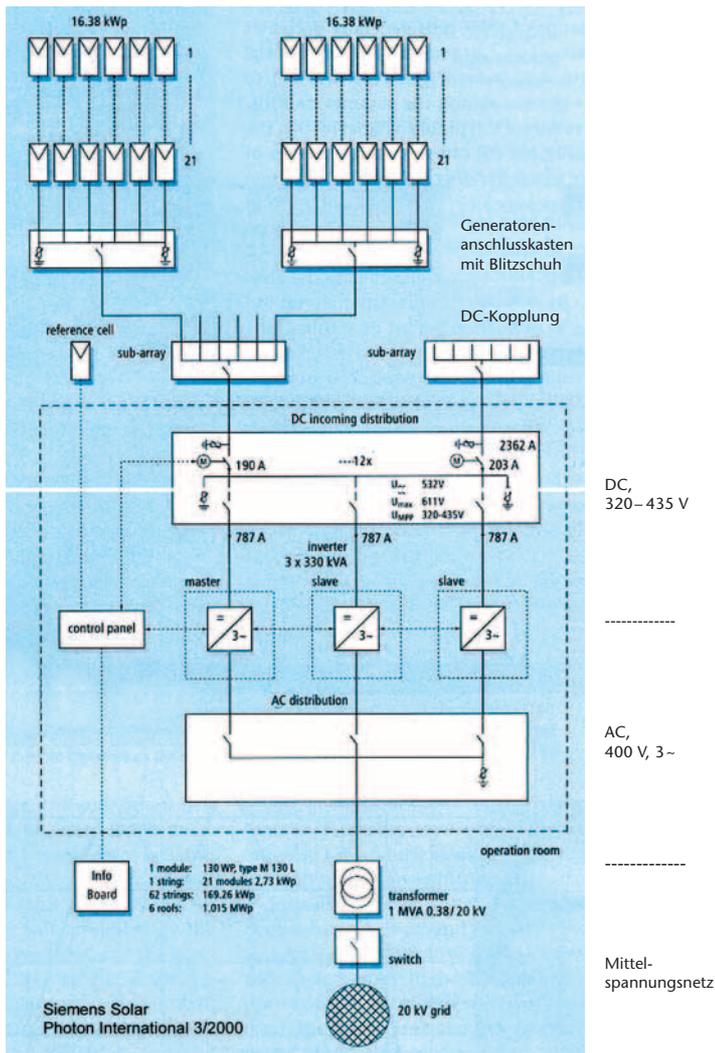


Abbildung 4 Elektrische Konfiguration PV-Anlage Messe München mit zentralem Wechselrichter-konzept

war das System die erste Anlage der Megawattklasse in Deutschland und gleichzeitig die weltgrößte dachinstallierte Photovoltaik-Anlage [4].

Das Solarsystem ist auf der Dachmitte der sechs nördlichen Hallendächer installiert und ein Musterbeispiel für die photovoltaische Nutzung großer Dachflächen auf Industriebauten. Der eigentliche Solargenerator besteht aus 7.812 neu entwickelten 130-Watt-Spezialmodulen von Siemens Solar aus monokristallinem Silicium, deren hoher Isolationswiderstand die Umsetzung eines zentralen Wechselrichterkonzepts bei einer Megawatt-Anlage ermöglicht. Die Module sind mit einem Neigungswinkel von 28° optimal an die lokalen Einstrahlungsverhältnisse angepasst. Eine gute Hinterlüftung ist durch die freie Aufständigung der Module gewährleistet.

In einer Anlagenstruktur mit zentralen Wechselrichtern werden einzelne Module (hier 21 Module) gleichstromseitig in Serie geschaltet und zu einem Strang zusammengefasst. Die einzelnen Stränge sind in Generatoranschlusskästen auf den Dächern gekoppelt, von dort führen Gleichstromleitungen über Trennschalter zum Wechselrichter. Je nach Einstrahlung liegt das Gleichspannungsniveau auf der Eingangsseite des Wechselrichters zwischen 320 und 435 Volt.

Insgesamt drei zentrale Wechselrichter mit Leistungen von jeweils 330 kW wandeln den Gleichstrom in Wechselstrom um, der über einen Transformator in das interne 20 kV-Stromnetz der Messe eingespeist wird. Die Geräte werden im Master-Slave-Modus betrieben. Das bedeutet, dass bei geringer Einstrahlung das Master-Gerät allein arbeitet, und die „Slaves“ – die beiden anderen Wechselrichter – beim Überschreiten bestimmter Schwellenwerte automatisch zugeschaltet werden; so werden alle drei Teilwechselrichter weitgehend in ihrem Wirkungsgradoptimum betrieben.

Die Anlage erreichte in den Jahren 1999 bis 2002 spezifische Jahreserträge zwischen 947 und 1.007 kWh elektrischer Energie pro installiertem kW_p Modulleistung und konnte damit den prognostizierten Ertrag von 1.000 kWh/kW_p realisieren. Insgesamt wurden seit Inbetriebnahme der Anlage 4.813 MWh elektrischer Energie erzeugt. Gegenwärtig wird durch die Installation von weiteren 1,058 MW auf den sechs südlichen Messehallen die installierte Gesamtleistung verdoppelt.

Gebäudeintegrierte Anlage der Fortbildungsakademie in Herne

Seit März 1999 ist in Herne die 1 Megawatt-Photovoltaikanlage der Fortbildungsakademie des Landes Nordrhein-Westfalen in Betrieb. Die in das Glasdach und die Fassade des Akademiegebäudes integrierte Solaranlage wurde bei diesem Projekt als multifunktionales Bauelement eingesetzt: sie bildet das Dach und Teile der Fassade, reguliert durch Abschattung die Temperatur im Innern der Gebäudehülle, ermöglicht eine variable Belichtung des Innenraums und produziert elektrische Energie [5].

Bei den eingesetzten speziellen Glas-Glas-Photovoltaik-Modulen ist der Zwischenraum zwischen den opaken Solarzellen transparent. Durch die Variation von Anzahl und Abstand der Zellen lassen sich dunkle Solarmodule bis hin zu lichtdurchlässigen semitransparenten Elementen verwenden. Im Dach sind 2.900 Module in Modultypen unterschiedlicher Transparenz integriert, die so angeordnet sind, dass sie wie eine Wolkenstruktur wirken. Je nach Verhältnis von freier Glasfläche zu Solarzellenfläche liegt die Modulleistung zwischen 250 und 416 Watt. Die Neigung der Module beträgt 5°; damit wird ein übermäßiger Schattenwurf bei flachem Lichteinfall ausgeschlossen. Weitere 281 Module als großflächige PV-Fassadenelemente in der südwestlichen Fassade der Gebäudehülle regulieren die Balance zwischen Tageslichtbedarf und Verschattung.

Die Verwendung unterschiedlicher Solarmodule machte den Einsatz dezentraler kleiner String-Wechselrichter notwendig. Dadurch wird eine Fehlanpassung bei der Verschaltung unterschiedlicher Modultypen vermieden.

Insgesamt 569 transformatorlose 1,5 kW-Wechselrichter mit einem weiten Eingangsspannungsbereich sind mit jeweils fünf oder sechs in Reihe geschalteten PV-Modulen verbunden und in unmittelbarer Nähe zum Strang am Rand des Dachs installiert. Die Wechselrichter sind an 30 AC-Verteiler angeschlossen, die ihrerseits über Hauptverteiler zusammengeführt sind und über einen AC-Einspeiseverteiler den Strom ins öffentliche Netz einspeisen.

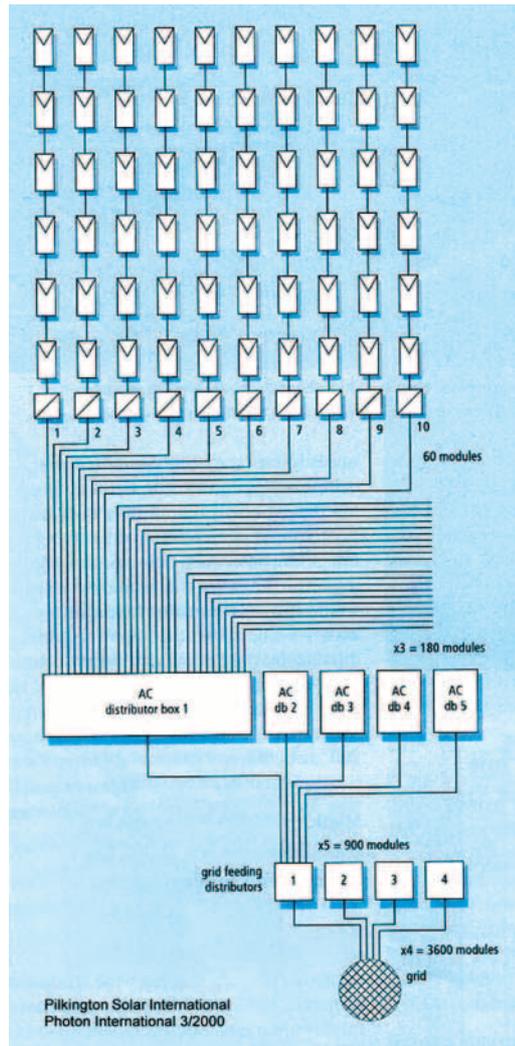


Abbildung 6
Dezentrales Wechselrichterkonzept der Photovoltaikanlage Herne



Abbildung 5
Gebäudeintegrierte 1-Megawatt-Photovoltaikanlage, Fortbildungsakademie „Mont-Cenis“ in Herne.

Quelle: Siemens - Pressebild



Abbildung Voltwerk AG

Abbildung 7
Gemeinschaftsanlage
„Solarpark Marktstet-
ten“, Freifeldanlage
mit 1,6 Megawatt
Leistung

Freifeldanlage in Marktstetten/Oberpfalz

Im bayerischen Marktstetten wurde im Dezember 2001 auf einem ehemaligen Acker, der von der Gemeinde als Sondernutzungsgebiet ausgewiesen ist, eine Solaranlage mit einer Leistung von 1,6 MW installiert [6]. Insgesamt wurden 12.672 polykristalline Siliciummodule des Herstellers Sharp auf über 500 Holz-Gestelleinheiten montiert. Die Größe des Modulfeldes pro Gestelleinheit ist so ausgelegt, dass Licht und Feuchtigkeit auf die Bodenfläche gelangen können und die Freifläche damit als Weideland nutzbar ist. Die Wechselrichter (Siemens SINVERT solar) stehen in einem separaten Betriebsgebäude und sind auf die in der Strangverschaltung auftretenden Ströme und Spannungen speziell abgestimmt. Die Anlage ist über eine eigene Mittelspannungsstation an das Netz eines Stromversorgers angeschlossen.

Für die Gesamtanlage wird mit einem durchschnittlichen jährlichen Stromertrag von 1,56 Mio. kWh gerechnet, dies entspricht einem spezifischen Jahresertrag von 984 kWh pro installierten Kilowatt PV-Leistung.

Die Gemeinschaftsanlage „Solarpark Marktstetten“ ist die erste Photovoltaik-Großanlage, die unter den durch das EEG vorgegebenen Rahmenbedingungen im Freifeld errichtet wurde. Es folgten die Anlagen „Solarpark Sonnen“ bei Passau (fertiggestellt im September 2002 mit 1,75 MW Leistung), sowie der „Solarpark Hemau“ bei Regensburg. Die Anlage Hemau

auf dem Gelände eines ehemaligen Munitionsdepots soll mit 4,0 MW Leistung Ende des Jahres 2002 ans Netz angeschlossen werden.

Die genannten Freifeldanlagen zeichnet aus, dass sie technisch und rechtlich jeweils in einzelne Solarstromanlagen mit einer Leistung von 99 Kilowatt aufgetrennt sind. Dies muss erfolgen, um einer Vorgabe des EEG genüge zu tun, das den Anspruch auf erhöhte Stromeinspeisevergütung für Photovoltaikanlagen, die nicht auf Gebäuden errichtet sind, derzeit auf Einzelanlagen bis 100 Kilowatt begrenzt.

Literatur

- [1] IEA International Energy Agency Task VI / Subtask 50 (1999). A preliminary Analysis of Very Large Scale Photovoltaic Power Generation (VLS-PV) Systems. Report IEA-PVPS VI-5 1999:1
- [2] Bundesministerium für Umwelt (2002). Bericht über den Stand der Markteinführung und der Kostenentwicklung von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (Erfahrungsbericht zum EEG).
www.bmu.de/download/dateien/eeg-erfahrungsbericht.pdf
- [3] www.ecotec-solar.de/referenzen/indreferenzen.html
- [4] E. Cunow, B. Giesler, W. Rehm (2001). One MW PV Roof at the Munich Trade Fair Centre – Results and Experience of three Years of Operation. Proc. 17th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich 10/2001, p. 2407-2409
- [5] J. Benemann, O. Chebab, E. Krausen, E. Schaar-Gabriel (2000). 1 Megawatt Photovoltaikanlage Akademie Mont-Cenis in Herne. 15. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 3/2000, S. 201-206
- [6] www.voltwerk.de