

Ertragsberechnung für PV-Anlagen in Brasilien über das PVSat Verfahren

Hans Georg Beyer^{1,2}, Marcel Schondorf-Rother¹,
Jethro Bethcke³, Anja Drews³, Annette Hammer³, Detlev Heinemann³, Elke Lorenz³
¹F.B Elektrotechnik, Hochschule Magdeburg-Stendal, D-39114 Magdeburg
²Universidade Federal de Santa Catarina, 88010-970, Florianópolis, Brasilien
³Institut für Physik, Universität Oldenburg, D-26111 Oldenburg

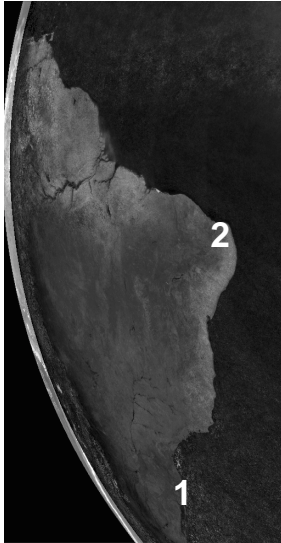
1. Einführung

Für die Planung und den Betrieb von PV-Anlagen in Brasilien ist aufgrund des dünneren Strahlungsmessnetzes der Einsatz von flächendeckenderen satellitengestützten Einstrahlungsinformationen sinnvoll. Zur Demonstration dieses Einsatzes zeigen wir die Nutzung der aus Aufnahmen des Meteosat-Satelliten abgeleiteten Einstrahlungsdaten zur Abschätzung des Monatsertrags eines in Brasilien betriebenen netzgekoppelten PV-Generators. Das dabei genutzte Vorgehen ist an das in Europa eingesetzte PVSat-Verfahren [1] zur Ertragskontrolle von PV-Anlagen angelehnt. Über dieses Beispiel soll die Verwendung von Meteosat-Daten zur Ableitung orts- und zeitspezifischer Einstrahlungsdaten für das östliche Südamerika untersucht werden. Da bei dem behandelten PV-Generator Module aus amorphem Silizium eingesetzt sind, ist zugleich die Erweiterung des bisher im wesentlichen für Module aus kristallinem Silizium getesteten PVSat Verfahrens Untersuchungsgegenstand. Dementsprechend teilt sich dieser Beitrag zunächst in zwei wesentliche Teile. Es wird zum einen die Nutzbarkeit der Meteosat-Information zur Ableitung von Einstrahlungsdaten für Brasilien analysiert. Diese Untersuchungen sind in das UNEP-GEF-Projekt SWERA eingebettet (siehe z.B. [2]). Zum anderen wird ein handhabbares Model zur Charakterisierung der Einstrahlungsabhängigkeit des DC-Wirkungsgrades des PV-Generators aus den vorliegenden Messdaten abgeleitet. Über die Kombination der satellitengestützten Einstrahlungsdaten und dem Model der PV-Charakteristik werden die monatlichen DC-Erträge des Generators abgeschätzt und zum Test der Güte des Gesamtverfahrens mit den entsprechenden gemessenen Erträgen verglichen.

2. Metosat-gestützte Einstrahlungsdaten für Brasilien

2.1 Anwendung des Heliosat-Verfahrens für Brasilien

Der über (0°N, 0°W) positionierte Satellit Meteosat-7 erfasst im halbstündigen Aufnahmetakt auch wesentliche Teile Südamerikas (siehe Abb. 1). Zur Ableitung von Einstrahlungsinformationen aus den Daten des 'VIS'-Kanals dieses Satelliten steht



das im Rahmen mehrerer europäischer Projekte genutzte Heliosat-Verfahren (siehe z.B. [3]) zur Verfügung. Dieses Verfahren wurde im wesentlichen unverändert zur Ermittlung der im folgenden verwendeten Global- und der Diffusstrahlungsdaten eingesetzt.

Abb. 1: Der von Meteosat 7 erfaßte Ausschnitt Südamerikas. Diese Darstellung ist aus der im Heliosat-Verfahren ermittelten Karte der minimalen Rückstreuung ('Bodenalbedo') abgeleitet. Die Ziffern geben die Position der hier verwendeten Bodenstationen Florianópolis (1) und Caicó (2) an.

2.2 Test der Güte der Meteosat- gestützten Einstrahlungsdaten in Brasilien im Rahmen des Projektes SWERA

Im Rahmen des UNEP-GEF Projekts SWERA (Solar and Wind Resource Atlas) wird zur Zeit u.a. an der Erstellung eines Einstrahlungsatlas für Südamerika gearbeitet. Dieser Atlas soll im wesentlichen auf satellitengestützten Einstrahlungskarten aufgebaut werden. Aufgrund der günstigeren Position des von der NASA betriebenen GOES-east Satelliten sollen dabei hauptsächlich Aufnahmen dieses Satelliten eingesetzt werden. Diese sind jedoch nur im Dreistundentakt verfügbar. Zur Einordnung der Güte der, die GOES-Aufnahmen nutzenden Verfahrens werden für die auch von Meteosat erfassten Gebiete die Ergebnisse des Heliosat/Meteosat-Verfahrens hinzugezogen.

Zur Ermittlung der Güte der Verfahren wurden bisher hauptsächlich Messdaten von den in Abb.1 eingetragenen zwei qualifizierten Stationen in Brasilien verwendet: Caicó (06°28'S – 037°05'W) und Florianópolis (27°34'S – 048°32'W). Ergebnisse für Heliosat / Meteosat-Verfahren für das erste Halbjahr 2003 sind in Tabelle 1 dargestellt. Der in [2] gegebene Vergleich mit auf GOES-Daten basierenden Modellen zeigt die gute Qualität dieses Verfahrens, die jedoch etwas geringer als die für europäische Stationen (siehe [3]). Dies kann unter anderem auf die in der Regel geringere Bewegung der Wolkenfelder an den betrachteten Standorten zurückgeführt werden. Dadurch verstärken sich die Probleme des Vergleichs der zeitlich gemittelten Punktwerte der Bodenmessung mit den aus Flächenmitteln der Bewölkung abgeleiteten Rechenwerten.

| | Caicó | | | | Florianópolis | | | |
|---|--------|-------|--------|-------|---------------|-------|--------|-------|
| | global | | diffus | | global | | diffus | |
| M | rMBE | rRMSE | rMBE | rRMSE | rMBE | rRMSE | rMBE | rRMSE |
| 1 | 0.001 | 0.179 | -0.004 | 0.337 | 0.054 | 0.288 | -0.046 | 0.433 |
| 2 | 0.011 | 0.203 | -0.114 | 0.345 | 0.095 | 0.259 | 0.038 | 0.439 |
| 3 | 0.005 | 0.281 | -0.052 | 0.425 | 0.045 | 0.280 | 0.006 | 0.479 |
| 4 | 0.023 | 0.207 | 0.021 | 0.420 | 0.021 | 0.212 | 0.076 | 0.489 |
| 5 | 0.016 | 0.236 | 0.002 | 0.345 | -0.016 | 0.225 | -0.021 | 0.358 |
| 6 | 0.016 | 0.164 | 0.114 | 0.449 | | | | |

Tabelle 1: Güte der aus Meteosat Aufnahmen abgeleiteten Stundenwerte der Global- und der Diffusstrahlung für die Stationen Caicó und Florianópolis (siehe Abb. 1). Angegeben sind die Werte des auf den jeweiligen Mittelwert bezogenen monatlichen mittleren Fehlers (relative mean bias error rMBE) und der monatlichen mittleren quadratischen Abweichung (relative root mean square rRMSE). Ausgewertet ist das erste Halbjahr 2003.

3. Modellierung der Einstrahlungsabhängigkeit des DC-Wirkungsgrads des a-Si Solargenerators der UFSC

Der hier untersuchte Solargenerator ist seit 1997 an der Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) in Florianópolis in Betrieb. Seine initiale Nennleistung betrug 2.1 kW. Über sein Betriebsverhalten bis 2001 wurde z.B. in [4,5] berichtet. Für die hier vorgestellten Analysen wurden Meßdaten aus dem Zeitraum Mai 2002 bis März 2004 genutzt, in dem der Generator ohne wesentliche Defekte arbeitete. Aufgrund eines Problems bei der Erfassung des AC-Ertrags des Generators beschränken sich die Auswertungen hier auf sein DC-Verhalten. Die Einstrahlungsmessung in Modulebene (Neigung entsprechend geogr. Breite: 27° S) erfolgt über cSi-Sensoren. Diese Werte wurden generell auf pyranometer-äquivalente Werte umgerechnet (siehe [6][5]). Dabei kann von einer Unsicherheit der Monatssummen im Bereich von 2% ausgegangen werden.

In [5] wurden aus den Betriebsdaten 2001 eine einstrahlungsabhängige Wirkungsgradcharakteristik über ein 2-parametriges Model ermittelt. Eine Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrads konnte nicht festgestellt werden. Auch in Hinblick Alterungseffekte wurde die Wirkungsgradcharakteristik auf der Basis neuerer Daten erneut analysiert. Dabei wurde ein in [7] vorgeschlagenes 3-parametriges Model des Wirkungsgradverlaufs $\eta(G)$ eingesetzt. Der Wirkungsgrad wird dabei über

$$(1) \quad \eta(G) = c_1 + c_2 G + c_3 \cdot \ln(G), \quad c_1..c_3: \text{Parameter}, \quad G: \text{Einstrahlung [W/m}^2\text{]}$$

beschrieben. Die Modellparameter wurden aus den Messdaten der DC-Leistung und der pyranometer-equivalenten Einstrahlung der Monate Mai und Juni 2002 abgeleitet. Abb.2 zeigt die empirischen Wirkungsgrad/Einstrahlungspaare und den Verlauf des angepaßten Wirkungsgradmodells.

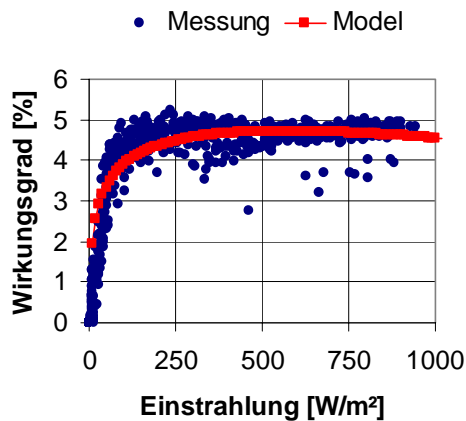


Abb. 2: Meßwerte (Stundenmittel Mai-Juni 2002) des DC-Wirkungsgrads des untersuchten a-Si Generators und das entsprechend Gl. 1 angepaßte Modell $\eta(G)$.

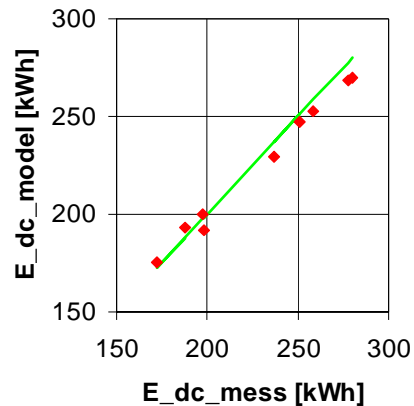


Abb.3: Vergleich der aus gemessener Einstrahlung und Wirkungsgradmodell bestimmten monatlichen (7.2002-3.2003) DC-Erträgen mit den entsprechenden Meßwerten.

Die Anwendbarkeit dieses Modells wird über seinen Einsatz zur Bestimmung des DC-Monatsertrags aus den Messwerten der Einstrahlung der Monate Juli 2002 bis März 2003 getestet (Abb. 3). Die Modellgüte ist bei Abweichungen zwischen (-4) - 3% annehmbar. Zur Deutung der Abweichungen ist hier zu beachten, dass hier keine Spektralkorrektur der Einstrahlung eingesetzt wurde.

4. Abschätzung des DC-Ertrags Generators über den Einsatz der satellitengestützten Einstrahlungsdaten

Entsprechend dem PVSat-Verfahren können die satellitengestützten Einstrahlungsdaten in Verbindung mit dem Wirkungsgradmodell des Generators zur Bestimmung eines erwarteten DC-Generatoretrags verwendet werden. Dazu ist als Zwischenschritt noch die Umrechnung der sich zunächst auf die Horizontale beziehenden Heliosat-Ergebnisse auf die Einstrahlung in Generatorebene erforderlich.

Die entsprechenden Rechnungen sind hier für die Monate 7.2002 - 3.2003 durchgeführt. Für diese Monate können die bereits im vorstehenden Abschnitt verwendeten Daten der Leistungsabgabe bzw. des Ertrags des Generators zum Vergleich hinzugezogen werden. Abb.4 zeigt als Beispiel den Verlauf der gemessenen und modellierten Werte der Leistungsabgaben für einen 14-tägigen Zeitabschnitt (1.-14. 9.).

Der Vergleich der monatlichen Erträge ergibt eine maximale Abweichung (Monat Januar) von 8.5% bzw. 21 kWh. Insgesamt zeigt sich ein Offset von ca. 5% oder 11.6 kWh bei einem Ertragsmittel von 240 kWh. Abb. 5 zeigt das entsprechende Streudiagramm. Ein Abgleich mit der in Tab.1 aufgeführten Güte der über das Meteosat/Heliosat Verfahren ermittelten Werte der Einstrahlung auf die Horizontale deutet an, dass die Fehler der Ertragswerte hier von den Fehlern der Einstrahlungsrechnung bestimmt sind.

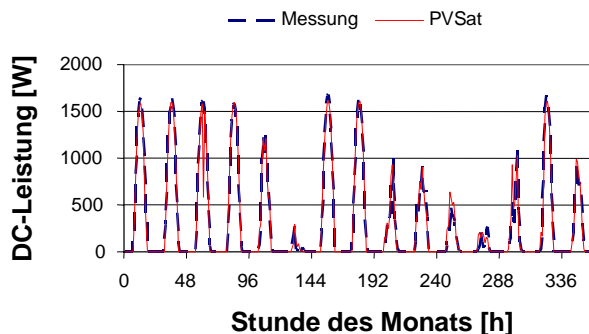


Abb.4: Gemessener und über PVSat modellierter Verlauf der Leistungsabgabe des PV-Generators der UFSC für die ersten 2 Wochen im September 2002. Für diese 2 Wochen ergeben sich aus Messung und Modell nahezu identische Erträge (Abweichung 0.3%). Für den gesamten Monat zeigt sich eine Abweichung von 3% (vergl. Abb. 5).

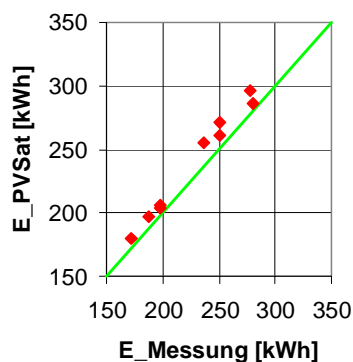


Abb.5 Vergleich der gemessenen DC-Monatsenerträge des Solargenerators der UFSC mit den über das PVSat-Verfahren modellierten Werten. Für diesen Vergleich sind nur Stundenwerte hinzugezogen, für die die entsprechenden Satellitendaten vorliegen. [Für die frühen Abendstunden (nach 21.00 GMT, 18:00 Ortszeit) sind die Meteosat-Aufnahmen hier nicht verfügbar].

5. Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt zeigt sich, dass das hier untersuchte Verfahren am betrachteten Beispiel erfolgreich arbeitet. Die festgestellten Abweichungen bewegen sich im Rahmen der bei der Anwendung des PVSat-Verfahrens in Europa erreichten Resultate. Dabei tritt im ersten Verfahrensschritt, der Ableitung der Einstrahlungswerte aus den Meteosat-Aufnahmen, ein etwas vergrößerter Fehler auf, der u.a. mit der geringeren räumlichen Dynamik der Wolkenfelder in Brasilien in Verbindung gebracht werden kann. Es ist noch anzumerken, dass hier nur die DC-Leistung bzw. der DC-Ertrag betrachtet wurden, d.h. der Gesamtfehler des Verfahrens vergrößert sich in der Endnutzung noch um Differenzen aufgrund der Modellierung des Wechselrichters. Zum anderen

basiert die Modellierung auf einer zeitnah durchgeführten Anpassung des Modells an das empirische Anlagenverhalten. Somit konnten Abweichungen zwischen Modell und Messung aufgrund einer unbekanntem Anlagenalterung vermieden werden. Das mit Alterungserscheinungen aufgrund von Verschmutzung, Zellaalterung etc. zu rechnen ist, zeigt der Vergleich der PVSat Ertragswerte, die das aktuellen Wirkungsgradmodells und über das, aus den Messdaten des Jahres 2001 von [6] abgeleiteten Modell ermittelt werden können. Die Nutzung des älteren Modells führt zu einer Verstärkung des Offsets um ca. 2%. Für eine, auf wiederkehrende Messungen verzichtende operationelle Anwendung des PVSat Verfahrens ist so ein entsprechendes Alterungsmodell erforderlich.

Danksagung

Für die Bereitstellung der Messdaten geht Dank an die KollegInnen aus dem LABSOLAR der UFSC und dem Projektes SWERA am Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Literatur

- [1] J.W.H. Bethcke, V.A.P. van Dijk, F. Wiezer, Ch. Reise, E. Wiemken, H. Dufner, P. Toggweiler, D. Heinemann, H.G. Beyer, PVSAT: Remote performance check for grid connected PV systems using satellite data, evaluation of one year of field-testing, 17th European PV Solar Energy Conference, Munich, 10. (2001)
- [2] E. B. Pereira, F. R. Martins, S. L. Abreu, H. G. Beyer, S. Colle, R. Perez, D. Heinemann, Cross validation of satellite radiation models during SWERA project in Brazil, ISES Solar World Congress, Göteborg, 16.-19.06. (2003)
- [3] Hammer, A., D. Heinemann, C. Hoyer, R. Kuhlemann, E. Lorenz, R. Müller, H.G. Beyer, Solar energy assessment using remote sensing technology, *Remote sensing of the environment* **86**, 423-432 (2003)
- [4] N. Kreutzer, H.G. Beyer, R. Rüther, Abschätzung spezifischer kWh/kW_{peak} Erträge unterschiedlicher Solargeneratortechnologien für tropische Standorte am Beispiel Brasiliens, 17. Symp. PV Solarenergie, Staffelstein, 13-15.3. (2002)
- [5] N. Kreutzer, Betriebsanalyse und Ertragsabschätzung von gebäudeintegrierten, netzgekoppelten Dünnschicht PV-Anlagen unter tropischen Bedingungen am Beispiel Brasiliens Diplomarbeit, FB Elektrotechnik, HS Magdeburg-Stendal (FH), (2002)
- [7] Singh, R., D. Heinemann, H.G. Beyer, Cosine, air mass and clearness index fits for PV Matrix 1G Sensor, *Journal of the Solar Energy Society of India* **9**, 41-52 (1999)
- [8] S.R. Williams, T.R. Betts, T. Helf, R. Gottschalg, H.G. Beyer, D.G. Infield, Modelling long-term modul performance based on realistic reporting conditions with consideration to spectral effects, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, 11.-18.05 (2003)

Calculating the energy gain of PV-Installations in Brazil using the PVSat Procedure

Hans Georg Beyer^{*#}, Marcel Schondorf-Rother^{*}, J. Bethcke[&], A. Hammer[&], Detlev Heinemann[&], Anja Drews[&], Elke Lorenz[&]

^{*}F.B Elektrotechnik, Hochschule Magdeburg-Stendal, D-39114 Magdeburg

[#]Universidade Federal de Santa Catarina, 88010-970, Florianópolis, Brasilien

[&]Institut für Physik, Universität Oldenburg, D-26111 Oldenburg

Due to the sparseness of the grid of stations measuring the solar irradiance in Brazil for the planning and the operation of PV installations, the application of satellite based irradiance data seems a reasonable option. As an example, we demonstrate the respective use of the PVSat procedure, designed for the remote performance check of grid-connected PV systems. This procedure is based on the calculation of monthly reference gain on the basis of satellite derived irradiance data. This procedure is applied to a PV System operated at the Universidade Federal de Santa Catarina in Florianópolis in the south of Brazil. Doing this, two themes are addressed. First the applicability of the Heliosat procedure used to derive irradiance data from images of the Meteosat satellite has to be checked for Brazil. Second, as the PV System analyzed is made of aSi modules, the PVSat procedure - up to now mainly used to handle systems using cSi modules - has to be extended to deal with this type of device. Analyzing the procedures on the basis of 9 month of operational data shows that despite a slightly inferior quality of the estimation of the irradiance data from satellite in Brazil, the overall performance of the PVSat scheme is satisfactory for the example given.