

5. Nordhäuser Baustofftag (19. - 20. November 2009)

Performance Ratio der schwimmenden Photovoltaikanlage *Solarpower Ponton I*

Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak
Fachhochschule Nordhausen, Weinberghof 4, 99734 Nordhausen

Vorbemerkung

Die Photovoltaikanlage *Solarpower Ponton I* ist ein Pilotprojekt des Kooperationsverbundes innovative Baustoffe (KViB). Im Verbund mit der Energieversorgung Nordhausen (EVN), der Fachhochschule Nordhausen, der Nordhäuser Stahl GmbH, der SRU Solar AG Sangerhausen, dem Tauchsportzentrum Nordhausen und der Hydrogeologie Nordhausen (FruGo-HGN) wurde diese Anlage als schwimmende Photovoltaikanlage errichtet und in einem Kiesteich südlich von Nordhausen in Südausrichtung verankert. Die Konzeption einer schwimmenden Photovoltaikanlage verspricht die folgenden Vorteile:

- Kein Flächenverbrauch durch die Nutzung künstlicher Binnengewässer wie Kiesteiche oder Tagebauflutungen
- Geringe Verschattungsproblematik
- Verbesserte Kühlung der Module durch die nahe Wasseroberfläche



Abbildung 1: Errichtung der Anlage

(Quelle: Stadt Nordhausen)

Anlagendaten

Die Photovoltaikanlage besteht aus 14 polykristallinen Solarmodulen der Firma Photovoltech mit einer Gesamtleistung von 2,52 kW_p. Die Anlage wurde im Mai 2008 über einen Wechselrichter der Firma SMA an das Netz angeschlossen. Die Anlage ist nach Süden ausgerichtet, die Module sind mit einem Winkel von 30° aufgeständert.

Solarmodule:

Typ: Photovoltech HI-Line A 0172 180W
Leistung: 180 W
Abmessungen: 1600 mm x 808 mm = 1,293 m²
Wirkungsgrad: 13,9 %

Wechselrichter:

Typ: SMA Sunnyboy 2100TL

Performance Ratio

Die Performance Ratio (PR) ermöglicht einen standortunabhängigen Vergleich von Photovoltaikanlagen. Die Performance Ratio berechnet sich als Verhältnis von realem zu idealem Ertrag einer Photovoltaikanlage:

$$PR = \frac{E_{\text{real}}}{E_{\text{ideal}}} = \frac{E_{\text{real}}}{I \cdot A_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{PV}}} \quad (1)$$

Der reale Ertrag ist die tatsächlich eingespeiste elektrische Energie; der ideale Ertrag berechnet sich aus der auf die Anlage fallenden Strahlungsenergie I multipliziert mit der Anlagenfläche A_{PV} und dem Anlagenwirkungsgrad η_{PV} bei Standardtestbedingungen.

Bestimmung der Einstrahlung

Die Photovoltaikanlage *Solarpower Ponton I* ist mit einer Einstrahlungsmessung in der Modulebene ausgestattet. Die Messung erfolgt dabei mit einer Sunny Sensorbox der Firma SMA, die über eine Referenzsolarzelle verfügt. Die Genauigkeit der Referenzsolarzelle ist mit $\pm 8\%$ angegeben [1]. Abbildung 2 gibt die monatlichen Globalstrahlungswerte in der mit 30° gegenüber der Horizontalen angestellten Modulebene seit Inbetriebnahme der Anlage wieder.

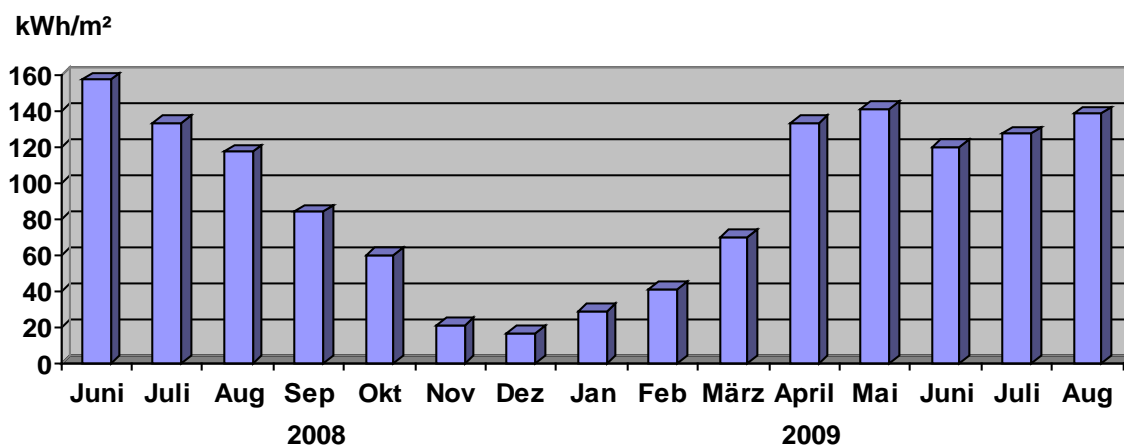


Abbildung 2: Gemessene Monatssummen der Globalstrahlung in der Modulebene

Für das erste Betriebsjahr von Juni 2008 bis Mai 2009 ergibt sich eine gemessene Einstrahlung von 1004 kWh/m² in der Modulebene.

Da die Messung mittels einer Referenzsolarzelle eine vergleichsweise hohe Fehlertoleranz aufweist, die auch nur bei einer Mittelung über einen längeren Zeitraum eingehalten wird, sollen die gemessenen Einstrahlungswerte auf Plausibilität geprüft werden. Dazu dienen die von Deutschen Wetterdienst herausgegebenen Strahlungskarten, die die Monatssummen der Globalstrahlung enthalten [2a][2b]. Für Nordhausen lassen sich die in Abbildung 3 angegebenen Werte ablesen.

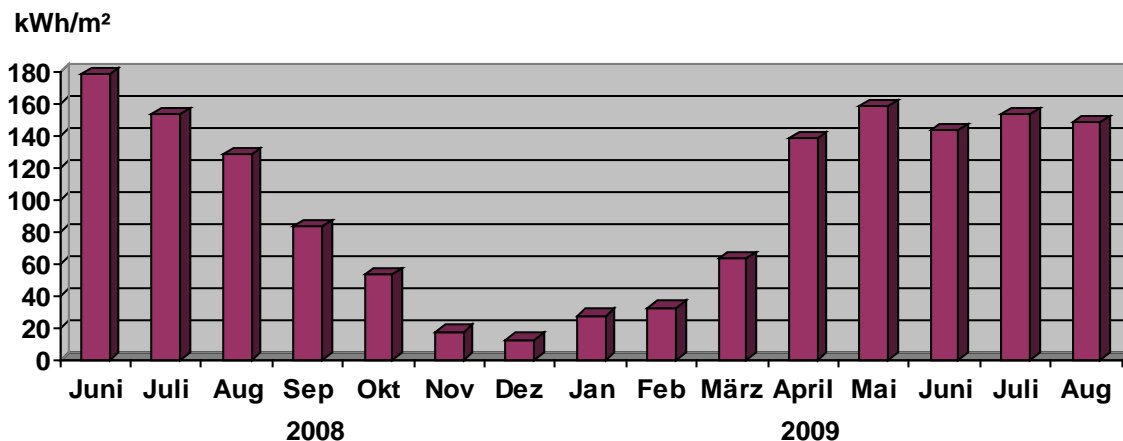


Abbildung 3: Monatssummen der Globalstrahlung für Nordhausen, nach [2a][2b]

Mit Ausnahme der Monate Oktober 2008 bis März 2009 liegen die gemessenen Werte in der Modulebene immer unter den Einstrahlungswerten in der Horizontalen. Für das erste Betriebsjahr von Juni 2008 bis Mai 2009 ergibt sich eine Jahressumme für die Globalstrahlung von 1054 kWh/m² in der Horizontalen. Dies lässt auf einen systematischen Messfehler schließen, da bei dem gewählten Anstellwinkel der Module in dieser Region und im Jahresmittel ein Mehrertrag von etwa 8%, für das Winterhalbjahr sogar von bis zu 40% zu erwarten gewesen wären [3]. Im folgenden werden daher die in der Modulebene gemessenen Werte durch einen Faktor korrigiert, der der maximalen Fehlertoleranz des Einstrahlungssensors von -8% entspricht. Der Anhang enthält eine Überprüfung dieser Werte durch Rückrechnung.

Energieertrag

Abbildung 4 gibt die wechselstromseitig in das Netz eingespeiste elektrische Energie wieder.

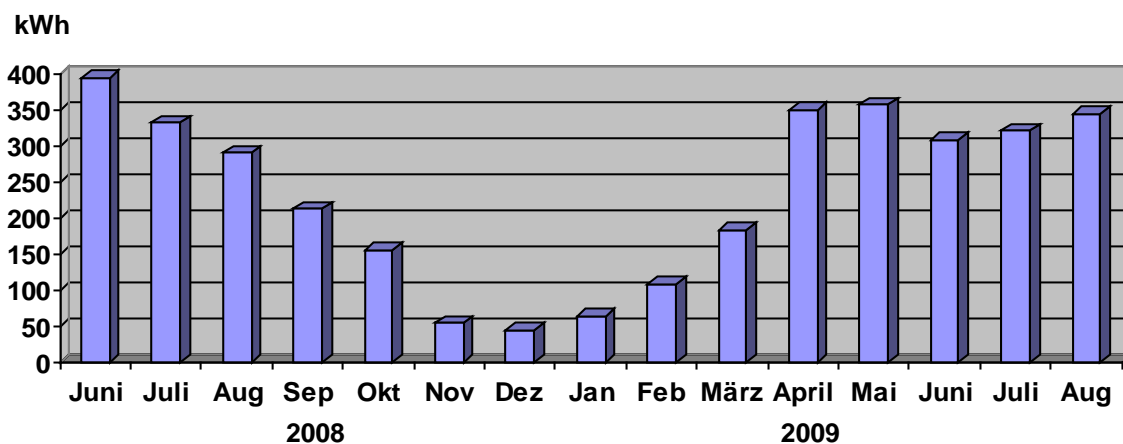


Abbildung 4: Wechselstromseitig in des Netz eingespeiste Energie

Berechnung der Performance Ratio

Mit Hilfe von Gleichung (1) lässt sich nun die Performance Ratio berechnen. Die Werte aus Abbildung 4 bilden E_{real} , die Strahlungsenergie I kann Abbildung 2 entnommen werden, wobei der Korrekturfaktor von $1/0,92$ zu berücksichtigen ist. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Mit Ausnahme des Wertes für Januar 2009 liegen alle Werte über 90 %. Der Anstieg der Performance Ratio in den Wintermonaten korreliert mit der abnehmenden Umgebungstemperatur. Der Januarwert ist vermutlich auf externe Faktoren wie Schnee- oder Eisbelag auf den Modulen zurückzuführen.

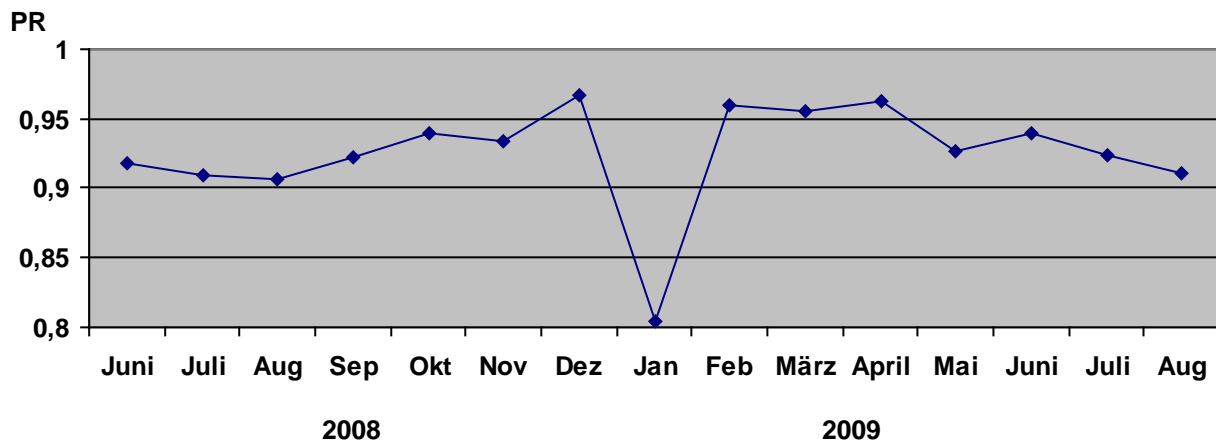


Abbildung 5: Berechnete Performance Ratio

In der Literatur werden typische Werte für die Performance Ratio im Bestand von 70 bis 85% angegeben [6]. Werte über 85% können als sehr gut, Werte über 90% als außergewöhnlich gut bezeichnet werden. Die vorliegenden Ergebnisse erlauben daher eine positive Beurteilung des Anlagenkonzepts und seiner Ausführung.

Anhang

Eine Überprüfung der in der Modulebene gemessenen Einstrahlungswerte kann durch eine Umrechnung der Monatssummen der Globalstrahlung auf die Modulebene erfolgen. Diese Überprüfung soll anhand der Monate Juni 2008 bis September 2008 erfolgen. Aus den Strahlungsdaten des Deutschen Wetterdienstes können entnommen werden:

2008	Juni	Juli	August	September
Globalstrahlung [kWh/m ²] (gemessen)	178	153	128	83

Tabelle 1: Monatssummen der Globalstrahlung in Nordhausen [2a]

Für die Aufteilung der Einstrahlung in Direkt- und Diffusstrahlung liegen keine Messwerte vor, so dass eine Abschätzung auf der Basis langjähriger Mittelwerte erfolgen soll. Der europäische Strahlungsatlas [4] liefert für eine horizontale Fläche die folgenden Anteile der Diffusstrahlung an der Globalstrahlung.

	Juni	Juli	August	September
Diffusstrahlung/Globalstrahlung	0,56	0,59	0,59	0,58
Diffusstrahlung [kWh/m ²] (berechnet)	100	90	76	48
Direktstrahlung [kWh/m ²] (berechnet)	78	63	52	35

Tabelle 2: Anteil der Diffusstrahlung in Göttingen [4] und Berechnung von Diffus- und Direktstrahlung

Die Einstrahlung auf eine um den Winkel β geneigte und nach Süden ausgerichtete Fläche lässt sich mit der folgenden Gleichung abschätzen [5]:

$$I = (G - D) \cdot R_d + D \cdot 0,5 \cdot (1 + \cos\beta) + \rho \cdot G \cdot 0,5 \cdot (1 - \cos\beta) \quad (2)$$

Dabei bezeichnet G die Global- und D die Diffusstrahlung auf eine horizontale Fläche. Der Parameter ρ steht für den Reflexionsfaktor der umgebenden Erdoberfläche. Da es sich hierbei um Wasser handelt, kann mit einem Wert von 0,10 gerechnet werden [5]. Der Geometriefaktor R_d berechnet sich hier zu

$$R_d = \frac{\int_0^{\omega_u^*} \cos\Theta(\beta) \, d\omega}{\int_0^{\omega_u} \cos\Theta(0) \, d\omega}, \quad (3)$$

mit dem Stundenwinkel ω_u des Sonnenuntergangs bezüglich der Horizontalen und dem Stundenwinkel ω_u^* des Sonnenuntergangs bezüglich der Solarzellenebene. Der Term $\cos\Theta$ lässt sich mit

$$\cos\Theta = \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta + \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (4)$$

berechnen. Dabei ist φ der Breitengrad (Nordhausen: $51,5^\circ$) und δ der Deklinationswinkel. Wertet man Gleichung (3) und (4) jeweils für den 15. des Monats aus, so erhält man

	15. Juni	15. Juli	15. August	15. Sept.
Deklinationswinkel δ	$23,35^\circ$	$21,40^\circ$	$13,54^\circ$	$1,92^\circ$
Stundenwinkel ω_u	$122,9^\circ$	$119,5^\circ$	$107,6^\circ$	$92,4^\circ$
Stundenwinkel ω_u^*	$99,8^\circ$	$98,9^\circ$	$95,4^\circ$	$90,8^\circ$
Geometriefaktor R_d	0,96	0,99	1,13	1,43

Tabelle 3: Zur Berechnung des Geometriefaktors

Nun lässt sich mit Gleichung (2) die Einstrahlung I auf die geneigte Fläche berechnen. Vergleicht man diese Werte mit den gemessenen Einstrahlungswerte, so ist eine Korrektur um den Faktor 1/0,92 plausibel.

2008	Juni	Juli	August	September
I - Einstrahlung [kWh/m ²] (berechnet)	169	147	130	95
I - Einstrahlung [kWh/m ²] (gemessen)	157	133	117	84
I - Einstrahlung [kWh/m ²] (korrigiert)	171	145	127	91

Tabelle 4: Berechnete Einstrahlung auf eine um 30° geneigte und nach Süden ausgerichtete Fläche in Nordhausen und gemessene Einstrahlung

Literatur

- [1] SMA (Hg.): Sunny Sensorbox - Lückenlose Performance-Überwachung, Datenblatt.
- [2a] Deutscher Wetterdienst (Hg.): Monatliche Strahlungskarten für die Globalstrahlung – 2008.
- [2b] Deutscher Wetterdienst (Hg.): Monatliche Strahlungskarten für die Globalstrahlung – 2009.
- [3] Wesselak, V., Schabbach, T.: Regenerative Energietechnik. Springer (2009)
- [4] Palz, W., Greif, J., Commission of the European Communities (Hg.): European Solar Radiation Atlas. Springer, Berlin (1996)
- [5] VDI 3789 Blatt 2: Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen - Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung. (1994)
- [6] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (Hg.): Leitfaden Photovoltaische Anlagen. Berlin (2008)