

# **Bewertung des Schwachlichtverhaltens einzelner PV-Module durch Vergleich von Langzeitmessungen unter natürlichem Licht mit Messungen unter dem Sonnensimulator**

Willi Vaassen, Werner Herrmann, Jörg Althaus, Florian Preis  
TÜV Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH  
Am Grauen Stein, 51105 Köln  
Tel.: +49(0)221-806-2910, Fax: +49(0)221-806-1350  
E-Mail: vaassen@de.tuv.com  
Internet: <http://www.umwelt-tuv.de>

## **1. Einleitung**

Zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Solarmodulen wird von den Herstellern die Peakleistung, die unter Standardtestbedingungen (Einstrahlung 1000 W/m<sup>2</sup>, Zelltemperatur 25°C, Lichtspektrum AM 1,5) bestimmt wird, angegeben. Diese Peakleistung wird während des Betriebes von PV-Modulen nie oder nur äußerst selten erreicht, da die genannten Bedingungen kaum gleichzeitig auftreten, sofern man sie nicht künstlich unter Sonnensimulatoren herstellt.

Dennoch hat sich die Angabe der Peakleistung zur Vergleichbarkeit der Leistungsfähigkeit bewährt. In den zurückliegenden Jahren richteten sich die Investitionszuschüsse der öffentlichen Hand innerhalb von Forschungs-, Demonstrations- und Verbreitungsprogrammen fast ausschließlich nach der angegebenen Peakleistung.

Seit Einführung der Ertragsförderung im Rahmen des Erneuerbaren Energiegesetzes rückt die tatsächliche Energieproduktion der PV-Anlagen und somit der PV-Module verstärkt in den Focus des Interesses. Die vergleichende Bewertung der Energieproduktion von PV-Modulen gestaltet sich allerdings schwierig, da der Ertrag durch die örtlichen Bedingungen beeinflusst wird. Klammert man die Einflüsse der individuellen Anlagenumgebung wie Verschattung, Reflektionen oder Installations- und Einbauspezifika aus, so verbleiben die (mikro)klimatischen Bedingungen, die für jeden Standort unterschiedlich sind. Diese Unterschiede spiegeln sich im Wesentlichen in der unterschiedlichen Lichtqualität (Intensität und Spektrum) und der Modultemperatur, die wiederum durch die Einstrahlung, die Umgebungstemperatur und die Luftbewegung in der Modul Umgebung beeinflusst wird. Die Komplexität der Einflussgrößen und deren Messung oder Bestimmung hat bisher noch nicht zu einer harmonisierten Vorgehensweise zur Ermittlung der PV-Modulerträge geführt.

Um dennoch Indizien zum Teillastverhalten von PV-Modulen zu erhalten, ist in der DIN EN 50380 „Datenblatt- und Typenschildangaben von Photovoltaik-Modulen“ (Juli 2003), die Angabe der Reduktion des Wirkungsgrades bei einer Einstrahlung von  $200 \text{ W/m}^2$  gefordert. Die Leistungsmessung wird ebenso wie die Peakleistungsmessung beim Referenzsonnenspektrum von AM 1,5 und einer Modultemperatur von  $25 \text{ °C}$  unter dem Sonnenlichtsimulator durchgeführt.

## 2. Aufgabenstellung und Ziel der Untersuchungen

Finanziell unterstützt durch den **Solarenergieförderverein Bayern e.V.** soll durch die Auswertung von Ertragsdaten eines Jahres bei drei verschiedenen Modultechnologien (Kristallines Silizium, Amorphes Silizium und High Efficiency-Zelle) festgestellt werden, wie sich das Teillastverhalten der Module darstellt und inwiefern dies im Ergebnis vergleichbar zu den Messungen der Teillastleistung bei  $200 \text{ W/m}^2$  unter einem Sonnensimulator ist.

## 3. Energieertragsmessungen auf dem Außentestfeld



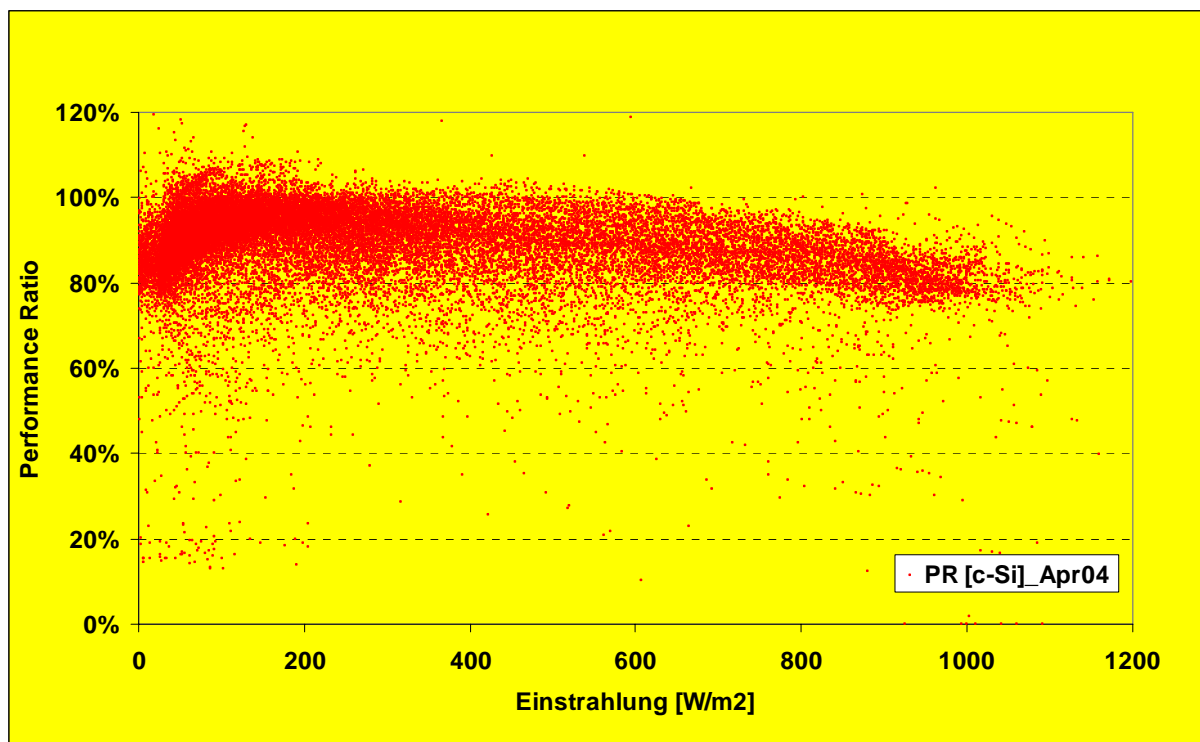
**Abb. 1: Teststand zur Energieertragsmessung der PV-Module (Südausrichtung, Neigungswinkel  $35^\circ$ )**

Die Energieertragsmessung der drei unterschiedlichen PV-Module wurde über ein Jahr unter den klimatischen Bedingungen in Köln (Breitengrad  $50,5^\circ$  Nord; Längengrad  $7^\circ$  Ost) ausgeführt. Installiert waren die PV-Module auf einem festen, offenen Gestell nach Süden hin ausgerichtet. Die Neigung von  $35^\circ$  wurde auf den Jahresenergieertrag optimiert. Ergänzend zu den meteorologischen Bedingungen (Globalstrahlung in der Horizontalen, Globalstrahlung und Diffusstrahlung in Modulebene, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit) wurden die

Modulparameter  $P_{mpp}$ ,  $U_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$  sowie Modultemperaturen jede Sekunde gemessen und als 5-Minuten-Mittelwerte gespeichert.

#### 4. Ergebnisse der Außenmessungen

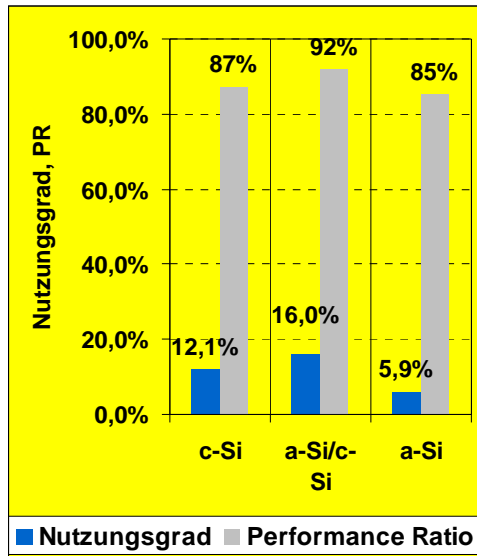
Um einen Überblick über die Varianz der Erträge innerhalb der verschiedenen Einstrahlungsbereiche bekommen zu können, werden im Nachfolgenden die Messwerte für das kristalline Siliziummodul als **Performance Ratio** (PR[c-si]), dem Quotienten aus dem gemessenen Energieertrag und dem theoretisch möglichen Energieertrag dargestellt. Dieser errechnet sich aus dem Produkt der auf die aktive Modulfläche eingestrahlten Energie, dem STC-Wirkungsgrad des PV-Moduls und der aktiven Modulfläche.



**Abb. 2: Performance Ratio [PR] (5-Minuten-Werte, wegen der Darstellbarkeit nur April 04) in Abhängigkeit von der Einstrahlung während des Messzeitraumes von einem Jahr**

Es ist erkennbar, dass sich bedingt durch die unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen (Temperatur und Wind) bei den verschiedenen Einstrahlungsklassen eine breite Varianz der erzeugten Energie und damit der Performance Ratio, die noch zusätzlich über die unterschiedlichen Lichtspektren und die Wärmekapazität des Moduls in Verbindung mit den schwankenden Windverhältnissen beeinflusst wird, einstellt. Eine Überschreitung der 100 % -Linie ist

im Wesentlichen auf die geringeren Modultemperaturen und die Wärmekapazität des Moduls bei den 5-Minutenwerten zurückzuführen.



Für den nachfolgenden Technologievergleich bietet sich der PR an, wodurch eine von den jeweilig sehr unterschiedlichen Wirkungs- bzw. Nutzungsgraden (siehe Abb. 3) unabhängige Betrachtung durchgeführt werden kann.

Abb. 3: Performance Ratio [PR] und Nutzungsgrad der drei Modultechnologien über die gesamte Messperiode von einem Jahr

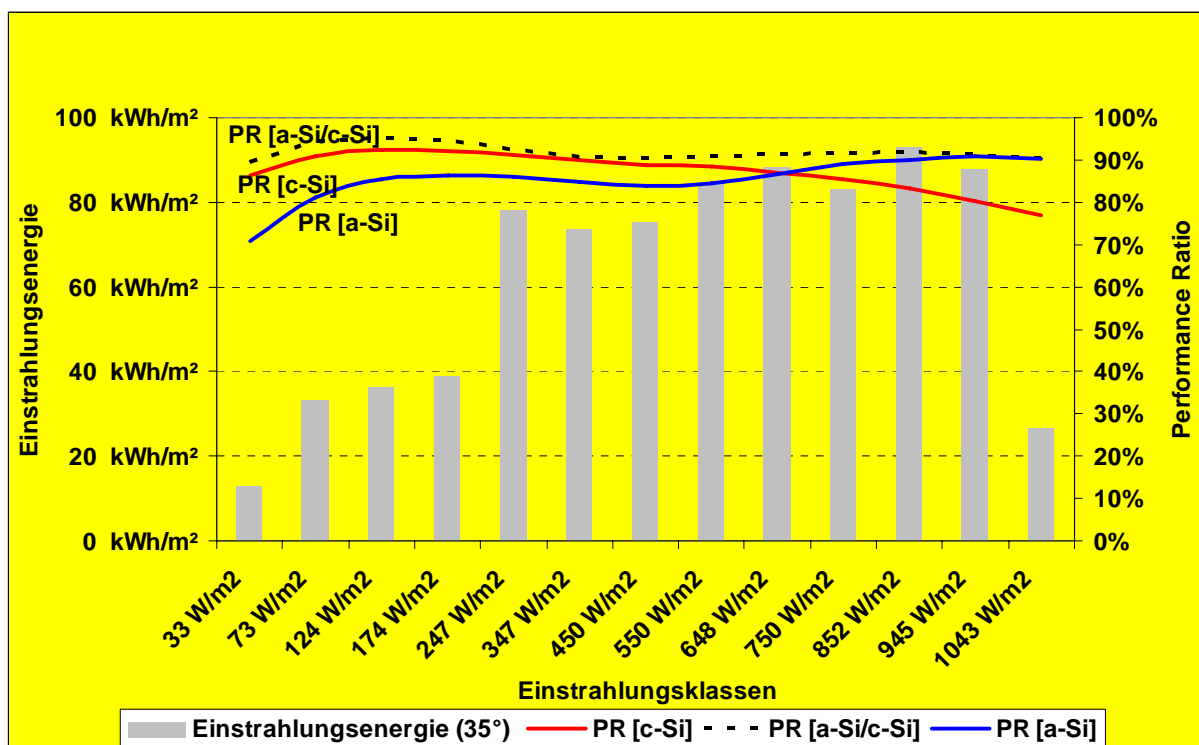


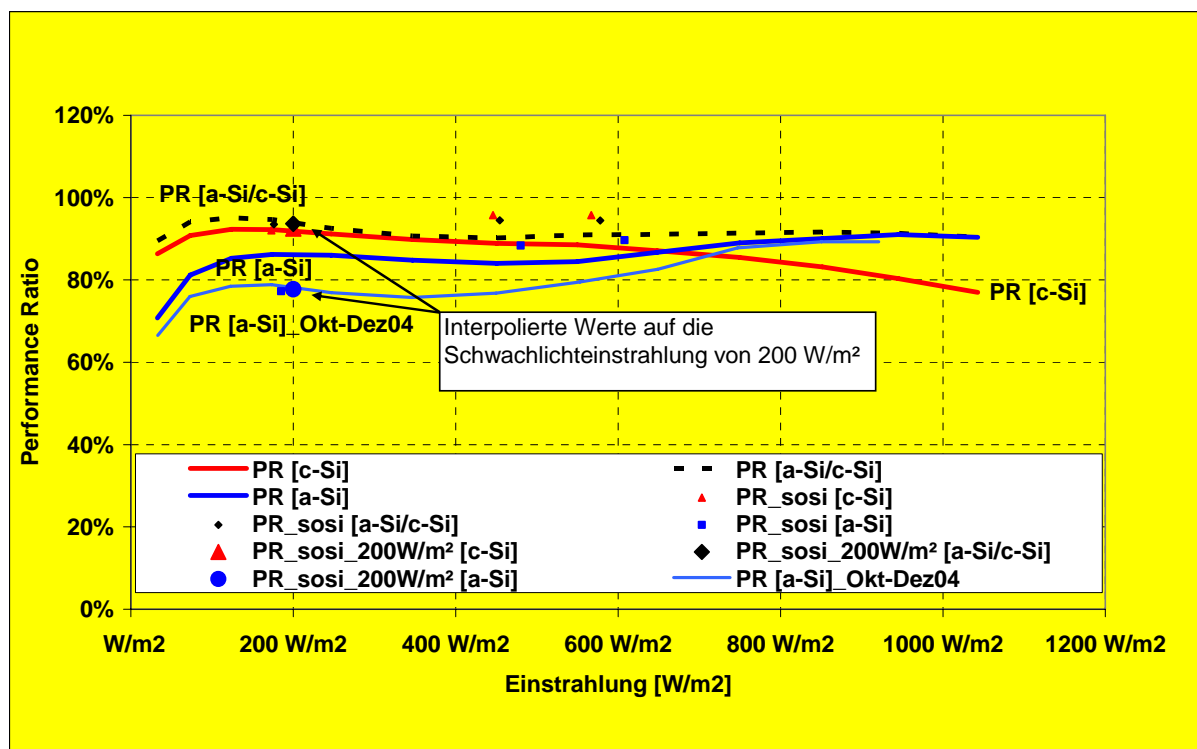
Abb. 4: Verlauf des Performance Ratio [PR] für die drei Modultechnologien bei den Einstrahlungsklassen

Die Abbildung 4 zeigt den Verlauf des mittleren PR über die verschiedenen Einstrahlungsbereiche, der aus den Messwerten (analog zur Abb.2) für die drei betrachteten Modultechnologien ermittelt wurde. Es ist erkennbar, dass das Modul mit der High Efficiency-Zelle [a-Si/c-Si] einen sehr gleichmäßigen PR über den

gesamten Einstrahlungsbereich ausweist, während das amorphe Silizium [a-si] bei geringen Einstrahlungen und das kristalline Silizium [c-si] bei höheren Einstrahlungen geringere PR zeigen. Fokussiert man die Betrachtung auf den Teillastbereich, so ist erkennbar, dass das Modul mit den amorphen Siliziumzellen den bei diesem Vergleich geringsten PR aufweist.

#### 4. Vergleich der Messungen Außenexponierung/ Sonnensimulator

Durch den nachfolgenden Vergleich der Messwerte bei der Außenexponierung der PV-Module mit den Messungen unter dem Sonnensimulator entsprechend der in der DIN EN 50380 genannten Randbedingungen (Einstrahlung von 200 W/m<sup>2</sup>, AM 1,5, Zelltemperatur 25 °C) soll festgestellt werden, inwieweit diese im Labor ermittelten Werte charakteristisch für das Schwachlichtverhalten der Module im realen Betrieb sein können.



**Abb. 5: Vergleich des Performance Ratio [PR] für die drei Modultechnologien mit den Messungen unter dem Sonnensimulator**

Die Messungen unter dem Sonnensimulator bei geringeren Einstrahlungen als 1000 W/m<sup>2</sup> wurden durch die Verwendung von großflächigen, homogenen Gittern realisiert. Dabei konnten Einstrahlungen in der Modulebene etwas unterhalb von 200 W/m<sup>2</sup> und oberhalb im Bereich von 400 -600 W/m<sup>2</sup> eingestellt werden. Interpoliert man diese Messwerte, so konnten die Ergebnisse der Außenmessungen durch die

Sonnensimulatormessungen bestätigt werden. Lediglich beim amorphen Material lag der gefundene Messpunkt bei der Sonnensimulatormessung weit unterhalb der Jahrestrendkurve der Außenmessungen. Um die Leistungs-degradation, die bei diesem Modul während des Jahres aufgetreten ist, zu berücksichtigen, wurde in das Diagramm neben der Gesamtjahreslinie die Trendlinie über den letzten Messzyklus von Oktober bis Dezember eingezeichnet. Hierbei ergab sich eine gute Übereinstimmung mit dem Sonnensimulatormesswert. Inwieweit hier die unterschiedlichen Temperaturniveaus und Verschiebungen des Sonnenspektrums Einfluss nehmen konnte noch nicht untersucht werden.

#### **4. Zusammenfassung**

Die Auswertungen bezgl. des Performance Ratio der drei ausgewählten Module unterschiedlichster Technologien zeigen signifikante Unterschiede in den einzelnen Einstrahlungsbereichen. Diese Unterschiede werden im Wesentlichen durch die Modultemperatur und das Lichtspektrum verursacht.

Durch die Messungen im PV-Labor unter dem Sonnenlichtsimulator konnten die im Außenversuch gemessenen Werte bestätigt werden. Als Ergebnis der bisherigen Messungen und Auswertungen scheint es also möglich zu sein, die Charakterisierung des Schwachlichtverhaltens bei  $200 \text{ W/m}^2$  entsprechend der DIN EN 50380 unter dem Sonnensimulator durchführen zu können. Hier müssen weitere Untersuchungen von anderen Dünnschichttechnologien und kristallinen PV-Modulen zeigen bzw. erhärten, dass eine geeignete vergleichende Charakterisierung von PV-Modulen auf der Basis einer Laboruntersuchung möglich ist.