

# Performance von Photovoltaik-Anlagen: Resultate einer internationalen Zusammenarbeit im IEA-PVPS Task 2

Ulrike Jahn

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln / Emmerthal (ISFH)

Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal

Tel.: (0049 -5151) 999-0, Fax: (0049-5151) 999-400, E-Mail: [ujahn@easynet.de](mailto:ujahn@easynet.de)

Wolfgang Nasse

Solar Engineering Decker & Mack GmbH

Tel.: (0049-511) 9357-330, Fax: (0049-511) 9357-339

E-Mail: [nasse@solar-engineering.de](mailto:nasse@solar-engineering.de)

Internet: <http://www.task2.org>

## 1. Einleitung

Die Qualität und Zuverlässigkeit von photovoltaischen Anlagen gewinnt immer mehr an Bedeutung, vor allem für Betreiber, Hersteller, Installateure und Investoren, die mit dem Anlagenertrag nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) rechnen. Aufgrund des langfristigen Finanzierungsplans muss auch die langfristige Qualitätssicherung der PV-Anlagen angestrebt werden. Dies ist jedoch „draußen Vorort“ schwieriger zu realisieren als die Qualitätssicherung der Komponenten im Labor oder in der Produktion.

Eine Arbeitsgruppe der Internationalen Energieagentur, Task 2 des Photovoltaic Power Systems (PVPS)-Programms, hat langjährige Betriebsergebnisse aus verschiedenen nationalen Mess- und Demonstrationsprogrammen sowie Lernerfahrungen zur Verbesserung der PV-Anlagen in der Planungs- und Installationsphase ausgewertet und zusammengestellt. Weitere Aktivitäten beschäftigen sich mit der Verfügbarkeit von Strahlungsdaten, der Betriebsanalyse von PV-Inselsystemen [1], dem Einfluss von Abschattungs- und Temperatureffekten [2] und der Zuverlässigkeit von PV-Anlagen. Die Ergebnisse der Analysen sowie eine Datenbank mit aufbereiteten Daten zum Langzeitverhalten von PV-Anlagen (PV Performance Database) sind auf der Webseite <http://www.task2.org> zu finden [3].

Die im Folgenden ausgewerteten Betriebsdaten stammen aus der Task-2-Datenbank, wobei hier nur netzgekoppelte PV-Anlagen aus 14 Ländern berücksichtigt werden. Es wird versucht, die Trends der Anlagenqualität in diesen Ländern darzustellen und die Ursachen für die Verbesserungen aufzuzeigen.

## 2. Kenngrößen zur Beurteilung von PV-Anlagen

Die wichtigsten Größen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von PV-Anlagen sind Ertrag, Wirkungsgrad und Performance Ratio. Diese Parameter sind definiert in den europäischen Richtlinien [4] und dem IEC-Standard 61724 [5]. Der spezifische Ener-

Energieertrag  $Y_f$  (engl.: Final yield) ist die gesamte Energieausbeute innerhalb eines Zeitraumes bezogen auf die Nennleistung des PV-Generators in kWh pro kWp. Die spezifischen Anlagenverluste werden durch  $L_c$  „capture losses“ (Abweichung des Generatornutzungsgrades vom Modulwirkungsgrad, geringere Modulleistung, Mismatchverluste) und durch Systemverluste  $L_s$  (ohmsche Verluste der DC-Komponenten, Wechselrichterumwandlungsverluste) ausgedrückt. Die Summe  $Y_f + L_c + L_s$  stellt die theoretisch verfügbare Energie (reference yield)  $Y_r$  der Anlage dar, die erreichbar wäre, wenn die gesamte Einstrahlung  $H_i$  auf die Generatorflächen entsprechend den Standardprüfbedingungen (engl.: STC) erfolgen würde und keinerlei Verluste ( $L_c$  und  $L_s$ ) auftreten würden.

Zum Vergleich von netzgekoppelten PV-Anlagen an verschiedenen Standorten wird der Performance Ratio als entscheidende Kenngröße verwendet. Der Performance Ratio (PR) ist der Quotient aus dem realen Energieertrag ( $Y_f$ ) und dem theoretischen Ertrag ( $Y_r$ ):  $PR = Y_f / (Y_f + L_c + L_s)$ . Damit ist der PR ein weitgehend vom Standort (Einstrahlung) unabhängiges Maß zur Qualitätsbeurteilung von netzgekoppelten PV-Anlagen. Der PR ist ein geeigneter Indikator für die Summe der Verluste, die beim PV-Generator durch Modultemperatur, Reflektion, geringe Bestrahlungsstärke auftreten, für Wirkungsgradverluste beim Wechselrichter und für Verluste, die durch Abschattung oder Betriebsausfälle vorkommen. Allerdings bestimmt die Nennleistung des PV-Generators direkt den PR-Wert, so dass Abweichungen der „wahren“ (gemessenen) Nennleistung von der Leistungsangabe des Herstellers den PR verfälschen. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass bei gut funktionierenden netzgekoppelten PV-Anlagen jährliche PR-Werte zwischen 0,60 und 0,80 erreicht werden. Unter Berücksichtigung der verbesserten Umwandlungswirkungsgrade von neueren Wechselrichtern, ergeben sich heute ideale PR-Jahreswerte von 0,80 bis 0,84.

### 3. Performance Ratio im Ländervergleich

Für die Untersuchungen der netzgekoppelten PV-Anlagen in 14 verschiedenen Ländern wurden die Kenngrößen aus 1110 Jahresdatensätzen berechnet. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Minimum- und Maximum-Werte des Performance Ratio für sechs Länder zum Vergleich. Dabei stehen aus Deutschland (413), der Schweiz (301) und aus Japan (208) deutlich mehr Jahresdatensätze zur Verfügung als aus Italien (81), den Niederlanden (52) und Österreich (44), was bei der Interpretation des Mittelwertes (rechte Spalte) zu berücksichtigen ist.

Die große Schwankungsbreite der über die Betriebsperiode gemittelten PR-Jahresmittelwerte ist bemerkenswert und differiert stark von Anlage zu Anlage ( $PR_{min} = 0,423$  und  $PR_{max} = 0,859$  für Deutschland). Sie spielt in Japan mit dem höchsten PR-Durchschnittswert eine geringere Rolle als in Deutschland.

Tabelle 1: Jährlicher Performance Ratio von 315 netzgekoppelten PV-Anlagen in sechs Ländern mit Minimum und Maximum-Werten

Land	Anlagen	Betriebsjahre	Betriebszeitraum		Performance Ratio		
			Begin	Ende	Min	Max	Mittel
Deutschland	106	413	1992	2002	0,423	0,859	0,673
Italien	29	81	1992	2002	0,448	0,826	0,673
Japan	76	208	1995	2002	0,532	0,873	0,723
Niederlande	20	52	1992	2000	0,588	0,796	0,694
Österreich	22	44	1994	2002	0,425	0,798	0,639
Schweiz	62	301	1990	2002	0,497	0,854	0,694

Die Streubreite der Anlagenqualität kommt auch in den Bildern 1a und b zum Ausdruck. Die Mehrzahl der 106 PV-Anlagen in Deutschland mit Nennleistungen zwischen 1 kWp und 1 MWp erreichen gute Jahreswerte zwischen 0,6 und 0,8. Allerdings liegen nicht wenige Datensätze – meist von älteren Anlagen – deutlich unter 0,6. Die 76 japanischen PV-Systeme mit Nennleistungen zwischen 1 kWp und 214 kWp weisen eine geringere Streuung auf, wobei spätere Installationen und kürzere Betriebszeiträume (1995-2002) zu berücksichtigen sind.

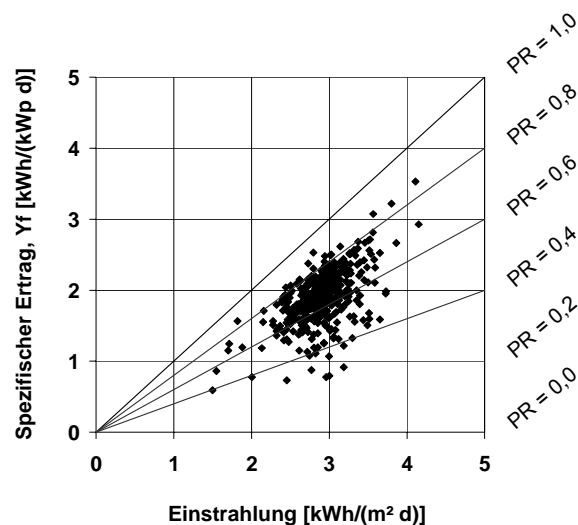


Bild 1a: 106 PV-Anlagen in Deutschland

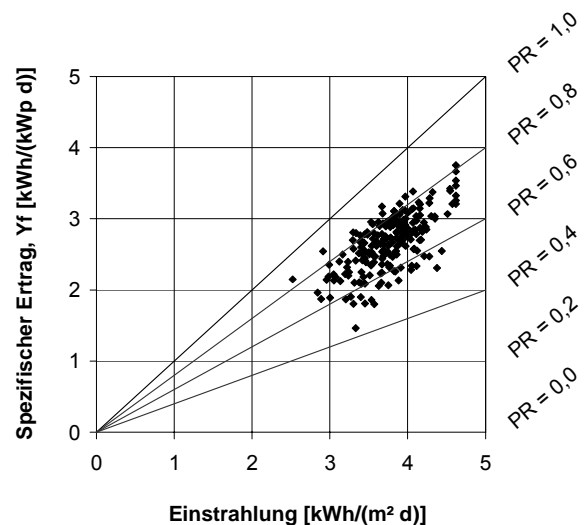


Bild 1b: 76 PV-Anlagen in Japan

Bild 1a und b: Jahreswerte des spezifischen Ertrags als Funktion der Einstrahlung für 413 Datensätze von 106 PV-Anlagen in Deutschland (Bild 1a) und für 208 Datensätze von 76 PV-Anlagen in Japan (Bild 1b). Beispielsweise lässt sich bei einer Jahreseinstrahlung von 3 kWh/(m²\*d) [1095 kWh/m²] und einem Jahresertrag von 2,4 kWh/(kWp\*d) [876 kWh/kWp] ein PR-Wert von 0,80 ablesen.

#### 4. Anlagenqualität und Wechselrichterwirkungsgrad

Zum Vergleich der Anlagenqualität werden 796 Datensätze von 274 PV-Anlagen in 14 Ländern herangezogen und in 147 Altanlagen (Baujahr 1983-1994) und 127

Neuanlagen (Baujahr 1995-2002) aufgeteilt. Bild 2a zeigt die Verteilung des jährlichen PR und die Verbesserung der Werte bei den Neuanlagen. Der durchschnittliche Jahres-PR der Installationen vor 1995 liegt bei 0,67 (362 Datensätze) und der Installationen nach 1995 bei 0,70 (434 Datensätze). Demnach hat sich die durchschnittliche Anlagenqualität der 274 internationalen Anlagen um 4% erhöht.

Bild 2b zeigt die gemessenen Jahreswerte der Wechselrichterwirkungsgrade für die gleichen Anlagen und Betriebszeiträume. Obwohl starke Streuungen der Jahreswerte zu verzeichnen sind, liegen die Mittelwerte über alle Betriebsjahre bei etwa 90%. Der Vergleich der Altanlagen ( $\eta_{inv}=89,1\%$ ) mit den Neuanlagen ( $\eta_{inv}=90,0\%$ ) gibt eine geringfügige Steigerung von 1%.

Der Vergleich der Systemverfügbarkeit von Alt- und Neuanlagen im gleichen Zeitraum resultierte in einer geringen Steigerung der Zuverlässigkeit von Neuanlagen gegenüber Altanlagen in der Höhe von 1% [6]. Bei den untersuchten 274 internationalen PV-Anlagen lässt sich die moderate Steigung der mittleren Anlagenqualität (PR: 4%) auf Verbesserungen des Wechselrichterwirkungsgrads (1%) und auf die gestiegene Anlagenverfügbarkeit (1%) zurückzuführen.

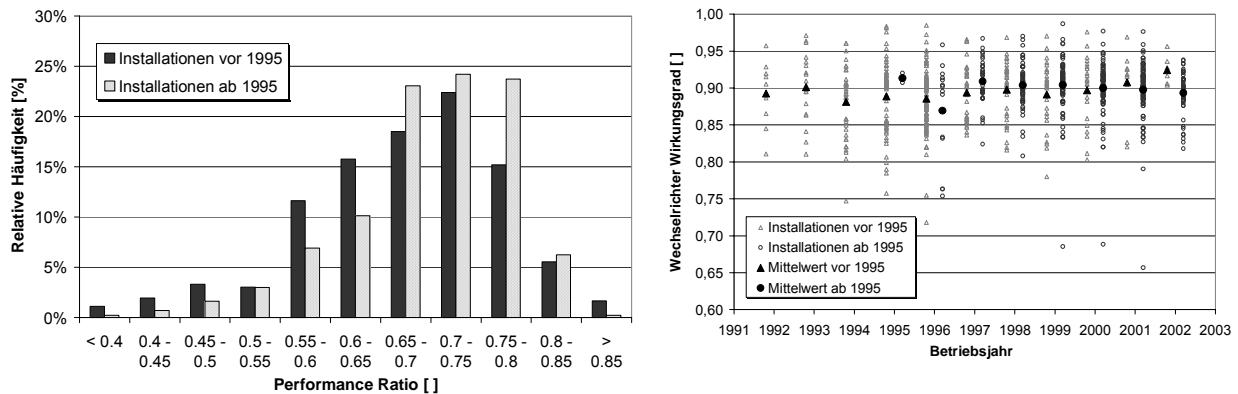


Bild 2a: Verteilung der jährlichen Performance Ratios von 274 netzgekoppelten PV-Anlagen (796 Jahresdatensätze) in 14 Ländern für zwei verschiedene Installationsperioden

Bild 2b: Streuung der jährlichen Wechselrichterwirkungsgrade der gleichen 274 PV-Anlagen mit 147 Altanlagen (362 Datensätzen) und von 127 Neuanlagen (434 Datensätze) in den Betriebsjahren 1992-2002

## 5. Verbesserung der Anlagenqualität in Deutschland

Wie ist die Entwicklung der Anlagenqualität über einen längeren Zeitraum? In Abb. 3a und b sind die jährlichen PR-Werte von 235 PV-Anlagen über 10 Betriebsjahre dargestellt, eingeteilt in zwei Installationsperioden. Die Daten stammen aus dem 1000-Dächer-Programm und aus laufenden Messprogrammen wie z.B. Sonne in der Schule. Die jährlichen PR-Werte der Anlagen aus den frühen 90er Jahren weisen eine erhebliche Streuung von Anlage zu Anlage (Bild 3a) auf und zeigen über die Jahre eine deutlich abnehmende Tendenz, die im wesentlichen auf Wechselrichterausfälle zurückzuführen ist. Der mittlere Jahres-PR fällt von 0,67 in 1993 auf 0,60 in 2000. Die PR-Werte der neueren Anlagen ab 1997 streuen dagegen weniger stark und erreichen durchweg bessere Jahresmittelwerte (0,73 bis 0,76). Eine abnehmen-

de Tendenz im Verlauf der Jahre 1998-2002 ist nicht zu erkennen. Heutige PV-Anlagen besitzen nicht nur leistungsfähigere Komponenten (z.B. Wechselrichter) und erreichen im einzelnen sehr gute PR-Werte von über 0,80, sie zeigen auch keine Leistungseinbußen im Laufe der Betriebsjahre.

Aufgrund der deutlich gestiegenen PR-Durchschnittswerte von 0,65 für die 177 älteren Anlagen auf 0,74 für die 58 neueren Anlagen (Bild 3b) kann abgeleitet werden, dass die Anlagenqualität in Deutschland signifikant gestiegen ist. Als Hauptursachen für diese positive Entwicklung sind die geringeren Toleranzen und die genauere Angabe der Nennleistung der PV-Module, die verbesserte Wechselrichter-effizienz sowie die gestiegene Anlagenverfügbarkeit (weniger Ausfälle, kürzere Stillstandzeiten) zu nennen.

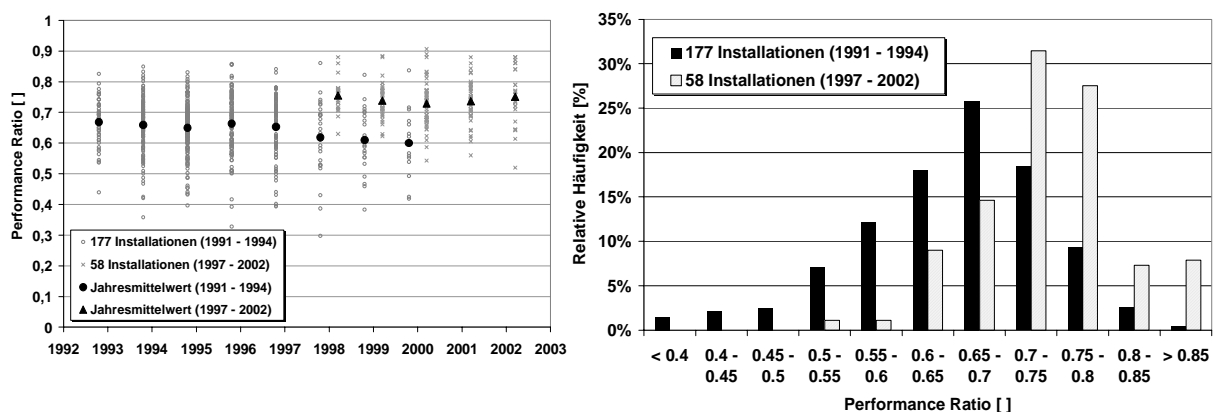


Bild 3a: Trends in der Anlagenqualität über 10 Betriebsjahre: 609 jährliche Werte des Performance Ratio von 177 Altanlagen aus dem 1000-Dächer-Programm, 1991-1994, im Vergleich zu 178 Jahresdaten von 58 neueren Anlagen, 1997-2002

Bild 3b: Die Verteilung der jährlichen PR-Werte zeigt eine signifikante Steigerung von 0,65 (Altanlagen) auf 0,74 (Neuanlagen) um 13%.

## 6. Schlussfolgerungen

Der Performance Ratio wird häufig als die Kenngröße zur Beurteilung der Anlagenqualität verwendet, weil der Anlagenertrag zum Vergleich verschiedener PV-Anlagen nicht herangezogen werden kann. Der PR-Wert als Qualitätskriterium muss jedoch kritisch hinterfragt werden, wenn die installierten Module nicht genau vermessen wurden, was in der Praxis häufig der Fall ist. In Zukunft sollte unterschieden werden zwischen einem PR-Wert, der auf gemessener Nennleistung und einem PR-Wert, der auf der Modulleistung nach Herstellerangaben basiert. Andere, geeignete Qualitätskriterien sind zu finden.

Die Auswertungen der Anlagedaten hat eindeutige Trends für bestimmte Länder und Installationsperioden aufgezeigt. Die Absolutwerte der Ergebnisse, z.B. die Steigung der Anlagenqualität in Deutschland von 13%, sind stark abhängig von der zugrund-

liegenden Datenmenge. Die Auswahl der Datensätze kann das Ergebnis wesentlich beeinflussen.

Die Überwachung der PV-Anlagen auch im kleineren Leistungsbereich hat enorm zugenommen. Es liegt im Interesse eines jeden Betreibers, einen optimalen und störungsfreien Betrieb seiner Anlagen zu erzielen. Mit der Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ist das Interesse deutlich gestiegen; der Einsatz des Betreibers und die schnelle Behebung von Betriebsstörungen wird finanziell belohnt. Heute existiert bereits eine breite Palette verschiedener Methoden zur Betriebsüberwachung, diverse Systeme zur kontinuierlichen Messung der Anlagenleistung sind kommerziell verfügbar, die dem Betreiber eine geeignete Anlagenkontrolle ermöglichen. Als positiver Nebeneffekt hat sich gezeigt, dass überwachte PV-Anlagen neben höheren Erträgen ein erhöhtes Engagement der beteiligten Fachfirmen und Hersteller zur Folge haben.

Die Qualitätssicherung der PV-Anlagen aber kann und darf nicht den Betreibern der Anlagen und den Herstellern der Komponenten allein überlassen werden. Die Forschungsinstitute, Prüfstellen und Ingenieurbüros verfügen über ein langjähriges Know-how, das geeignet ist, Konzepte und Maßnahmen zur Qualitätssicherung von PV-Anlagen zu entwickeln und einzuführen.

## 8. Literatur

- [1] D. Mayer, M. Heidenreich: Performance analysis of stand-alone PV systems from a rational use of energy point of view. Proceedings 3<sup>rd</sup> World Conference on PV Energy Conversion, Osaka, Japan, May 2003
- [2] Th. Nordmann, L. Clavadetscher: Understanding temperature effects on PV system performance. Proceedings 3<sup>rd</sup> World Conference on PV Energy Conversion, Osaka, Japan, May 2003
- [3] Internet-Webseite der internationalen Arbeitsgruppe Task 2 und des Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS) der Internationalen Energieagentur (IEA): **[www.task2.org](http://www.task2.org)** und **[www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)**.
- [4] Commission of the European Communities: Analysis and Presentation of Monitoring Data. Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants, Document B, version 4.3, March 1997
- [5] International Electrotechnical Commission: Photovoltaic system performance monitoring - Guidelines for measurement, data exchange and analysis International Standard IEC 61724, Geneva, Switzerland, first edition, April 1998
- [6] Forschungsverbund Sonnenenergie, Themenheft „Photovoltaik – neue Horizonte“, März 2004

# Performance of Photovoltaic Systems Results of Task 2 of the IEA PVPS Programme

Ulrike Jahn

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln / Emmerthal (ISFH)

Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal

Tel.: (0049 -5151) 999-0, Fax: (0049-5151) 999-400, Email: [ujahn@easynet.de](mailto:ujahn@easynet.de)

Wolfgang Nasse

Solar Engineering Decker & Mack GmbH

Tel.: (0049-511) 9357-330, Fax: 0049-511) 9357-339

Email: [nasse@solar-engineering.de](mailto:nasse@solar-engineering.de)

Internet: <http://www.task2.org>

## Summary

Task 2 is an international collaborative group focusing on the operational performance, long-term reliability and sizing of PV systems and subsystems, providing technical information to the engineering sector, research sector, industry, utilities, system designer & installers, educational sector and to end-users. Task 2 started its work in 1999 with the overall objective to improve PV system operation and sizing by analyzing and disseminating information on technical performance. During the five years of Task 2 collaboration, the work has resulted in a number of remarkable deliverables (PV Performance Database, technical reports, workshops), which can be downloaded from the website: <http://www.task2.org>.

This paper focuses on the final results on long-term performance and reliability issues of selected PV systems in 14 different countries in Europe and in Japan. Particularly complete data sets and results are available from 334 grid-connected PV systems ranging from small-decentralized systems (PV roofs), dispersed systems (BIPV, sound barrier) to centralized systems (PV power plants). Performance ratios (PR) obtained from PV installations in different countries are compared on monthly and annual basis. Building integrated as well as non-integrated PV systems are compared with respect to performance ratio and reliability. Energy efficiency values of various PV array and inverter set-ups are also pooled and presented.

The conclusions of this work allow to state trends on long-term performance analysis and reliability of grid-connected PV systems in different countries in Europe and in Japan. This includes recommendations on improved PV system design and installation gained from reduced yield analysis on well-monitored PV systems under special investigation.