



## Performance von Photovoltaik-Anlagen

Abb 1



- ▶ **„Frühe“ und experimentelle Photovoltaik-Anlagen häufig mit Ertragsminderung**
- ▶ **Betriebsstörungen sind dominierende Ursache für geringe Erträge**
- ▶ **Heutige Anlagen ertragreicher und zuverlässiger**
- ▶ **Anlagen-Monitoring deckt Fehler auf und steigert Engagement der Anlagenanbieter**

*Photovoltaik-Anlage als Eingangsüberdachung für das Hallenbad in Emmerthal. Die Betreiber von PV-Anlagen interessieren sich zunehmend für die „Performance“, d. h. für die Energieeffizienz und die Zuverlässigkeit ihrer Anlage (Foto: Solar Engineering GmbH).*

**S**pätestens mit der Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) haben die Betreiber von Photovoltaik-Anlagen ein vitales Interesse an leistungsfähigen Anlagen. Nur gut geplante und fehlerfrei installierte sowie über Jahre störungsfrei arbeitende Anlagen erbringen die erwünschte Solarrendite. Doch ein genauer Blick zeigt, dass einige Anlagen im Laufe der Jahre ihre Schwächen haben – nur wenige Eigentümer erfahren rechtzeitig davon. Insbesondere bei kleinen Anlagen entfällt meist die laufende Leistungskontrolle, die allein im Störfall eine schnelle Fehlerbehebung erlaubt.

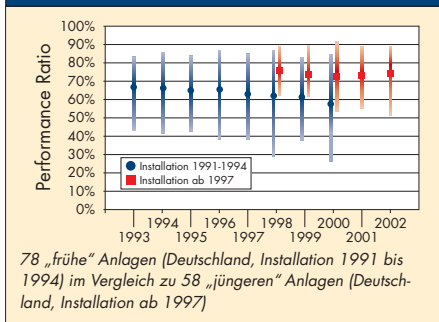
Photovoltaik-Anlagen haben keine bewegten Teile und brauchen daher keine besonderen Instandhaltungsmaßnahmen. Dennoch kommt es noch immer zu folgenschweren Planungsfehlern, und manch mangelhaft installierte Anlage hat Störungen, die zu teilweise erheblichen Ertragseinbußen führen. Besonders die Wechselrichter von Anlagen aus den 90er Jahren verursachten häufiger Betriebsunterbrechungen, aber auch Defekte an Sicherheits- und Schutzvorrichtungen, defekte Kabel oder Anschlüsse schmälern die Einspeisevergütung.

Schon seit vielen Jahren werden weltweit die Erfolgsfaktoren von leistungsfähigen und zuverlässigen Photovoltaik-Anlagen untersucht. Die in diesen Monitoring-Programmen gewonnenen Daten hat jetzt eine international zusammengesetzte Arbeitsgruppe der Internationalen Energieagentur (Task 2 des Photovoltaikprogramms PVPS) zusammengetragen und in Form einer Datenbank aufbereitet. Die „PV Performance Database“ ermöglicht vielfältige Analysen und auch den Blick auf das Langzeitverhalten der Demonstrationsanlagen, welche in den 90er Jahren errichtet wurden. Im Folgenden werden in ausgewählten Analysen und Fallbeispielen aus dem Datenbestand die Erfolgsfaktoren zuverlässiger und leistungsstarker PV-Anlagen vorgestellt. Eine Leistungsprüfung nach Inbetriebnahme oder die systematische und laufende Qualitäts- oder Ertragskontrolle findet nur bei ganz großen Anlagen statt, weil dafür die Sonneneinstrahlung genau ermittelt werden muss. Inzwischen gibt es einige Konzepte zur systematischen Betriebsüberwachung, welche sich immer dann amortisieren, wenn Störungen vermieden oder Betriebsunterbrechungen von einigen Wochen auf wenige Tage verkürzt werden können.

## 1. Auf lange Sicht

Wie gut sind Photovoltaik-Anlagen nach vielen Betriebsjahren? Interessant ist hier die Beobachtung der jährlichen Performance Ratio (PR-Wert) über einen längeren Zeitraum (Abb 2). Die Daten stammen aus dem deutschen 1.000 Dächer-Programm und aus laufenden Monitoring-Programmen wie z.B. „Sonne online“.

**Abb 2: Performance Ratio über lange Zeit**



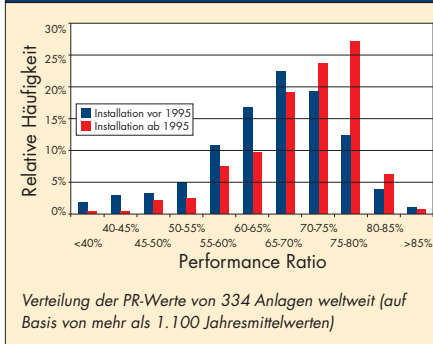
78 „frühe“ Anlagen (Deutschland, Installation 1991 bis 1994) im Vergleich zu 58 „jüngeren“ Anlagen (Deutschland, Installation ab 1997)

Die PR-Werte der „frühen“ Anlagen streuen erheblich und zeigen über die Jahre eine deutlich abnehmende Tendenz. Die PR-Werte der „jüngeren“ Anlagen streuen weniger stark und liegen durchweg höher. Eine abnehmende Tendenz im Verlauf der Jahre ist hier nicht zu erkennen. Eine vergleichbare Auswertung von 51 Anlagen aus der Schweiz zeigt ein ähnliches Bild: Anlagen der Jahre 1989 bis 1993 zeigen im Laufe der Jahre eine deutlich abnehmende Tendenz, bei den Anlagen der Jahre 1993 bis 1995 nimmt der PR-Wert nur geringfügig ab und für die neueren Anlagen seit 1995 bleibt der PR-Wert im Laufe der Jahre stabil. Heutige PV-Anlagen sind nicht nur leistungsfähiger sondern zeigen auch weniger Leistungseinbußen im Laufe der Jahre.

## 2. Alt gegen Neu

Sind die Komponenten von PV-Anlagen im Lauf der Jahre wahrnehmbar besser geworden? Werden heutige Anlagen sorgfältiger geplant und besser installiert? Der Blick auf die PR-Werte alter und neuer Anlagen zeigt: Es hat sich einiges getan, doch noch immer streut die Qualität der Anlagen stark (Abb 3).

**Abb 3: PR-Werte weltweit – neu und alt**



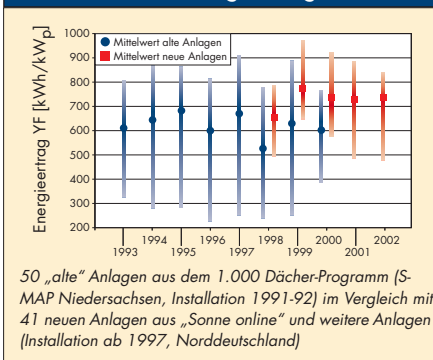
Verteilung der PR-Werte von 334 Anlagen weltweit (auf Basis von mehr als 1.100 Jahresmittelwerten)

Die „jüngeren“ Anlagen weisen überwiegend eine höhere Performance Ratio auf. Die Werte der „jüngeren“ Anlagen sind im Mittel etwa 5 Prozentpunkte höher und streuen etwas weniger aber immer noch relativ breit. Detailuntersuchungen von Modulen und Wechselrichtern bestätigen den Trend hin zu größerer Effizienz und verbesserter Zuverlässigkeit.

## 3. Solarrendite in Norddeutschland?

Wie stark unterscheiden sich die Energieerträge an Standorten mit vergleichbarer Einstrahlung? Abb 4 zeigt, wie extrem unterschiedlich die Solarrendite ausfallen kann.

**Abb 4: Jährliche Energieerträge**



50 „alte“ Anlagen aus dem 1.000 Dächer-Programm (S-MAP Niedersachsen, Installation 1991-92) im Vergleich mit 41 neuen Anlagen aus „Sonne online“ und weitere Anlagen (Installation ab 1997, Norddeutschland)

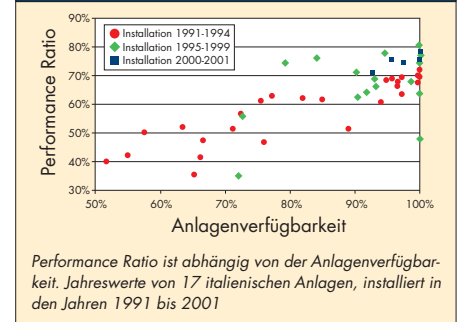
Die neuen, ab 1997 gebauten Anlagen sind eindeutig besser als die, welche bereits Anfang der 90er errichtet wurden. Auch streuen hier die Werte weniger, die Erträge pendeln sich bei den neuen Anlagen bei

ungefähr jährlich 730 kWh pro kW<sub>p</sub> ein. Bei guter Planung und fehlerfreier Installation sind in Norddeutschland heute 800 kWh pro kW<sub>p</sub> und Jahr durchaus erreichbar – in Süddeutschland sind es immerhin etwa 900 kWh.

## 4. Zuverlässigkeit und Ertrag

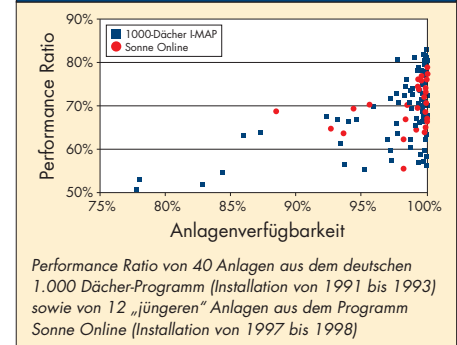
Wie zuverlässig sind Photovoltaik-Anlagen über viele Jahre? Sind heutige Anlagen zuverlässiger als die der 90er Jahre?

**Abb 5: Ertrag und Zuverlässigkeit I**



Performance Ratio ist abhängig von der Anlagenverfügbarkeit. Jahreswerte von 17 italienischen Anlagen, installiert in den Jahren 1991 bis 2001

**Abb 6: Ertrag und Zuverlässigkeit II**



Performance Ratio von 40 Anlagen aus dem deutschen 1.000 Dächer-Programm (Installation von 1991 bis 1993) sowie von 12 „jüngeren“ Anlagen aus dem Programm Sonne Online (Installation von 1997 bis 1998)

Abb 5 und 6 zeigen deutlich: Eine hohe Anlagenzuverlässigkeit garantiert – weitgehend – hohe Energieerträge. Und neuere Anlagen sind tendenziell zuverlässiger als die Anlagen aus den 80er und den frühen 90er Jahren. Die Streuung der PR-Werte bei sehr hoher Anlagenverfügbarkeit (bei 100%) zeigt, dass es weitere Einflussfaktoren für die Anlageneffizienz gibt: Wechselrichtereffizienz, Verschattung, Modultemperatur etc.

## PV Performance Database

Die „PV Performance Database“ enthält langjährige und detaillierte Betriebsdaten von derzeit 372 PV-Anlagen aus Deutschland, Italien, Japan, Österreich und der Schweiz sowie aus zehn weiteren Ländern. Die Angaben umfassen Standort, Anlagentyp, Komponenten, Konfiguration, Orientierung der Module sowie Monatswerte für Energieerträge, Sonneneinstrahlung und Temperatur. Aus den Daten können Energiebilanzen erstellt und die weiteren Größen Performance Ratio und System- und Komponentenwirkungsgrade berechnet werden. Ergänzt werden die Daten durch Angaben zu Verfügbarkeit, Wartungsaufwand, Kosten oder Montageart. Die Arbeitsgruppe Task 2 des Photovoltaikprogramms PVPS der IEA hat die Daten aufbereitet und zusammengestellt. Sie stammen überwiegend aus gut dokumentierten nationalen Breitentestprogrammen oder Demonstrationsprojekten und sind vor allem für Hersteller, Anbieter, Planer aber auch für Installationsfirmen und Ausbildungseinrichtungen interessant. Weitere Angaben zur PV Performance Database auf Seite 4.

## Glossar

**Y<sub>F</sub>** Final Yield: Spezifischer gesamter Energieertrag eines Jahres (in kWh pro kW<sub>p</sub>). Der Wert wird auch davon beeinflusst, wie exakt die Hersteller die Nennleistung der Module (P<sub>0</sub>, in kW<sub>p</sub>) klassifizieren. Oft sind die realen Leistungswerte geringer als angegeben.

**PR** Performance Ratio = Energieertrag / (Jahreseinstrahlung auf unverschattete Modulfläche • Modulwirkungsgrad STC).

PR ist ein weitgehend vom Standort unabhängiges Maß für die Anlagenqualität, allerdings haben die Modultemperatur und die Genauigkeit der Leistungsangaben STC (P<sub>0</sub>) einen deutlichen Einfluss auf den PR-Wert. PR ist eine reine Definitionsgröße und könnte sogar Werte größer 100% annehmen.

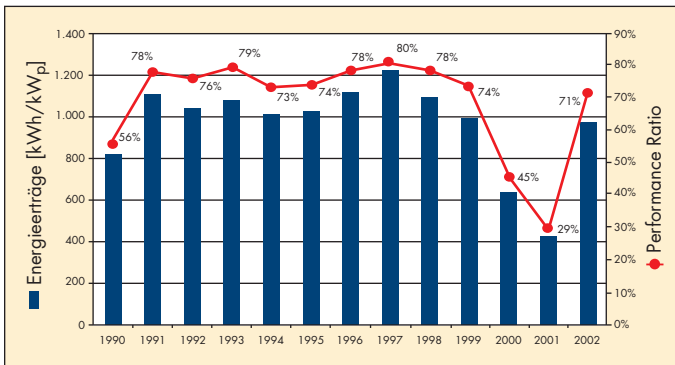
# Anlagen im Detail

## 1. Hohe Leistung und einzelne Probleme

Die weltweit erste Photovoltaik-Anlage an einer Lärmschutzwand ist als Schweizer Pionierprojekt seit 1989 in Betrieb.

Anlagensteckbrief	
<b>Inbetriebnahme</b>	1989
<b>Investitionskosten</b>	13.980 €/kW <sub>p</sub> (20.485 CHF/ kW <sub>p</sub> in 1989)
<b>Standort</b>	Domat/Ems an der A13, Schweiz
<b>Nominelle Leistung</b>	103,97 kW <sub>p</sub>
<b>Energieertrag Y<sub>F</sub></b>	947 kWh/kW <sub>p</sub> •a (1990 - 2002, auf Basis gemessener Modulleistung), 1.035 kWh/kW <sub>p</sub> •a (1991 bis 1999, s. o.)
<b>Performance Ratio PR</b>	68% (insg.), 75% (1991 bis 1999, s. o.)
<b>Anlagenverfügbarkeit</b>	88% (von 1990 bis 2002)

2.208 Module LA361J48 (47 Watt, Kyocera) in 92 Strängen, Montage auf Schallschutzwand, SSO (-25°), 45° Neigung  
Zentraler 100 kW Wechselrichter Simoreg/ Simatic (Siemens)



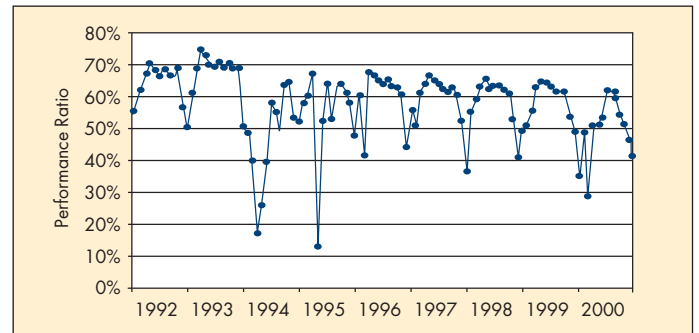
Die Anlage zeigte – von Startschwierigkeiten einmal abgesehen – über viele Jahre sehr gute Erträge und eine hohe Verfügbarkeit. Zwar mussten im Laufe der Jahre 33 Module ersetzt werden (21 verkehrsbedingte Zerstörungen und 12 Module wurden gestohlen), doch erst im 11. Betriebsjahr kam es zu bedeutenden Betriebsunterbrechungen. In den Jahren 2000 und 2001 war die Anlage an insgesamt 286 Tagen wegen verschiedener Wechselrichterdefekte nicht betriebsbereit. Nach fast 10 zuverlässigen Betriebsjahren wurde in 2001 der Wechselrichter dann komplett gegen ein Neugerät ausgetauscht.

## 2. Kleine Pionieranlage mit Schwächen

Eine typische „frühe“ Photovoltaik-Anlage aus dem 1.000 Dächer-Programm steht in Hannover. Die im so genannten S-MAP-Programm durchgeführte Langzeitauswertung zeigt die „Kinderkrankheiten“ von Anlagen dieser Generation. Für die Jahre 1994 bis 2000 bestätigt sich der tendenzielle Leistungsabfall „früher“ Anlagen (Abb 2). Die nur mäßigen Energieerträge sind zum großen Teil durch die ungenügende Anlagenzuverlässigkeit verursacht.

Anlagensteckbrief	
<b>Inbetriebnahme</b>	1991
<b>Investitionskosten</b>	14.750 €/kW <sub>p</sub> (in 1991)
<b>Standort</b>	Hannover, Deutschland
<b>Nominelle Leistung</b>	3,6 kW <sub>p</sub>
<b>Energieertrag Y<sub>F</sub></b>	654 kWh/kW <sub>p</sub> •a (von 1992 bis 2000, auf Basis der Leistungswerte des Herstellers)
<b>Performance Ratio PR</b>	60% (von 1992 bis 2000, s. o.)
<b>Anlagenverfügbarkeit</b>	ca. 85% (geschätzt, von 1992 bis 2000)

72 Module SM 50 (50 Watt, Siemens) in 12 Strängen, Auf-Dach-Montage, SSO (-12°), 40° Neigung  
2mal 1,5 kW Wechselrichter PV-WR 1500 (SMA) im Modus Master-Slave, Montage im Keller, DC-Hauptleitung 10 m



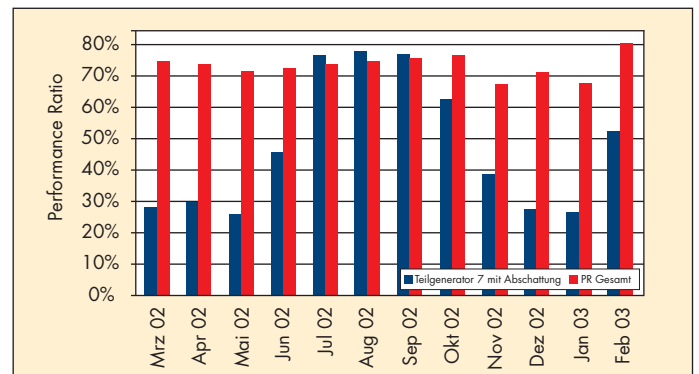
Die zunächst guten PR-Werte verringern sich von Jahr zu Jahr, wobei Störfälle und daraus resultierend oft unnötig lange Betriebsunterbrechungen das Anlagenergebnis phasenweise drastisch verschlechtern. In neun Betriebsjahren wurde der Wechselrichter siebenmal durch die Installationsfirma ausgetauscht. Doch gelang keine nachhaltige Instandsetzung, die Anlagenleistung sinkt über die Jahre signifikant.

## 3. Neue dachintegrierte Anlage

Es handelt sich um eine Photovoltaik-Anlage auf dem Erweiterungsneubau der Gesamtschule KGS Sehnde. Die Module sind in die südlich orientierte Dachfläche integriert. In Bereichen hoher zeitweiser Verschattung wurden Modulimitationen eingesetzt.

Anlagensteckbrief	
<b>Inbetriebnahme</b>	Dezember 2001
<b>Investitionskosten</b>	8.002 €/kW <sub>p</sub> (in 2001)
<b>Standort</b>	Sehnde bei Hannover, D
<b>Nominelle Leistung</b>	50,4 kW <sub>p</sub> (48,08 kW <sub>p</sub> gemessene nominelle Leistung)
<b>Energieertrag Y<sub>F</sub></b>	804 kWh/kW <sub>p</sub> •a (3/02-2/03, auf Basis gemessener Modulleistung)
<b>Performance Ratio PR</b>	73,6% (3/02-2/03, auf Basis gemessener Modulleistung)
<b>Anlagenverfügbarkeit</b>	100% (3/02-2/03)

336 Module I-150 (150 Watt, Isofoton) in 14 Strängen, ganzflächige In-Dach-Montage, SSO (-6°), 40° Neigung, sieben funktionslose Modulimitationen  
14 Wechselrichter Sunny Boy 3000 (SMA), 1 Wechselrichter pro Strang á 24 Module, Montage auf dem Dachboden



Die PR-Werte sinken in den Sommermonaten leicht (höhere Modultemperaturen) und fallen im Winter wegen Einbußen im Teillastbetrieb der Wechselrichter etwas stärker ab. Vor allem aber der Strang 7 wird von November bis Februar stark abgeschattet. Doch die Anlage zeigt insgesamt sehr gute Leistungswerte und eine 100%ige Zuverlässigkeit.

## ► Vertrauen ist gut – Kontrolle ist besser

Systeme zur laufenden Messung der Anlagenleistungsfähigkeit zahlen sich doppelt aus: Erstens können Fehler und Betriebsstörungen schneller entdeckt und behoben werden als bei „vor sich hin“ arbeitenden Anlagen. Und zweitens steigern diese Systeme das Engagement von Herstellern und Fachfirmen merklich, denn wer möchte schon mit unzuverlässigen Komponenten oder schlechtem Service entdeckt werden.

Häufigste Ursache für geringe Energieerträge sind Wechselrichterdefekte, gefolgt von Verschattungseffekten und Wartezeiten auf Austauschkomponenten. Auch sind ungünstige Modulorientierungen, ineffiziente Wechselrichter, hohe Modultemperaturen oder verschmutzte Module oft verantwortlich dafür, dass die tatsächlich erreichten Ergebnisse hinter den Erwartungen zurückbleiben. Eine Aufstellung der häufigsten Fehlerquellen findet sich unter [www.bine.info](http://www.bine.info) in der Rubrik Service/InfoPlus.

Inzwischen gibt es verschiedene Verfahren zur systematischen Betriebsüberwachung: Sehr einfach ist die Datenerfassung mit Wechselrichtern, die verschiedene Betriebswerte bilanzieren, jedoch fehlen hier die Strahlungsdaten. Auch können die Zählerdaten von Hand abgelesen und mit Wetterdaten z. B. aus dem Internet abgeglichen oder über Anlagendatenbanken im Internet mit anderen Anlagen verglichen werden. Genauer ist die Überprüfung von Anlagen mit mobilen Systemen nach Inbetriebnahme und in bestimmten Inspektionsintervallen, da hier geeichte Strahlungssensoren vor Ort eingesetzt werden. Fest installierte Messsysteme zur Erfassung von Anlagen- und Strahlungsdaten können die Anlage kontinuierlich überwachen und evtl. Fehler oder Defekte dem Anlagenbetreiber sofort übermitteln. Eine ausreichende Genauigkeit bei der Messung der Sonneneinstrahlung ist bislang allein mit lokalen Strahlungssensoren erreichbar. Die kostengünstigen Silizium-Strahlungssensoren messen immerhin auf 3-5 Prozent genau. Eine Übersicht zu den verschiedenen Verfahren und Systemen findet sich unter [www.bine.info](http://www.bine.info) in der Rubrik Service/InfoPlus.

## ► Fazit

Die Auswertung von knapp 400 Photovoltaik-Anlagen zeigt, dass die heute verfügbaren Module geringfügig leistungsfähiger geworden sind. Auch deklarieren die Hersteller ihre Module inzwischen genauer und die Zuverlässigkeit konnte weiter gesteigert werden.

Vor allem die Wechselrichter haben in den letzten fünf Jahren zugelegt. Ihre Effizienz konnte verbessert werden, am positivsten wirkt sich die deutlich verbesserte Zuverlässigkeit auf die Anlagenqualität aus. Nach 8-10 Betriebsjahren müssen bei den älteren Anlagen viele Wechselrichter repariert oder ausgetauscht werden, was noch immer zu langen Stillstandszeiten führt. Betriebsunterbrechungen sind überhaupt die dominierende Ursache für ungenügende Energieerträge. Die Zuverlässigkeit von Anlagendesign, Komponenten und Bauausführung müssen weiter verbessert, die Lebensdauer von Wechselrichtern weiter erhöht und die Reaktionszeit bei der Instandsetzung noch verkürzt werden.

## PROJEKTORGANISATION

### ■ Förderung

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
Postfach 12 06 29  
53048 Bonn

Projektträger Jülich (PTJ) des BMWA und BMU  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Reinhard Dahl  
52425 Jülich

### ■ Förderkennzeichen

0329640 und 0329640 B

## IMPRESSUM

### ■ ISSN

0937 – 8367

### ■ Herausgeber

Fachinformationszentrum Karlsruhe,  
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische  
Information mbH  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

### ■ Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig bei  
vollständiger Quellenangabe und gegen  
Zusendung eines Belegexemplares;  
Nachdruck der Abbildungen nur mit  
Zustimmung der jeweils Berechtigten.

### ■ Autor

Johannes Lang

## BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienz-  
technologien und erneuerbaren Energien:

In kostenfreien Broschüren, unter  
[www.bine.info](http://www.bine.info) und per Newsletter zeigt  
BINE, wie sich gute Forschungsideen in  
der Praxis bewähren.

BINE ist ein vom Bundesministerium für  
Wirtschaft und Arbeit geförderter  
Informationsdienst.

### Kontakt:

Fragen zu diesem **projektinfo**?

Wir helfen Ihnen weiter – wählen Sie  
die BINE Experten-Hotline:

Tel. 0228 / 9 23 79-44

### Allgemeine Fragen?

Wünschen Sie allgemeine Informationen  
zum energie- und umweltgerechten  
Planen und Bauen? Dann wenden Sie  
sich bitte an die unten stehende  
Adresse.



# BINE

Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe  
Büro Bonn  
Mechenstraße 57, 53129 Bonn

Fon: 0228 / 9 23 79-0  
Fax: 0228 / 9 23 79-29

E-Mail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
Internet: [www.bine.info](http://www.bine.info)

## ► PROJEKTADRESSE

- Institut für Solarenergieforschung  
GmbH Hameln/Emmerthal  
Ulrike Jahn  
E-Mail: [ujahn@easynet.de](mailto:ujahn@easynet.de)  
Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal
- Solar Engineering Decker & Mack  
GmbH  
Wolfgang Nasse  
E-Mail: [nasse@solar-engineering.de](mailto:nasse@solar-engineering.de)  
Vahrenwalder Straße 7  
30165 Hannover

## ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

### Datenbank

- Das Update zur „PV Performance Database“  
ist mit Stand Mai 2003 kostenlos download-  
bar unter [www.task2.org](http://www.task2.org) und als CD-Rom  
für 20 Euro inkl. Mehrwertsteuer und  
Versand erhältlich unter E-Mail:  
[task2@solar-engineering.de](mailto:task2@solar-engineering.de)

### Link

- Weitere Informationen zu den Aktivitäten  
der Arbeitsgruppe Task 2 des  
Photovoltaikprogramms PVPS (IEA) unter  
[www.task2.org](http://www.task2.org)

### Service

- Ergänzende Informationen wie Literatur,  
Adressen aller Projektbeteiligten und Links  
sowie Informationen und Links zu Moni-  
toring-Konzepten sind unter [www.bine.info](http://www.bine.info)  
in der Rubrik Service/InfoPlus abrufbar.