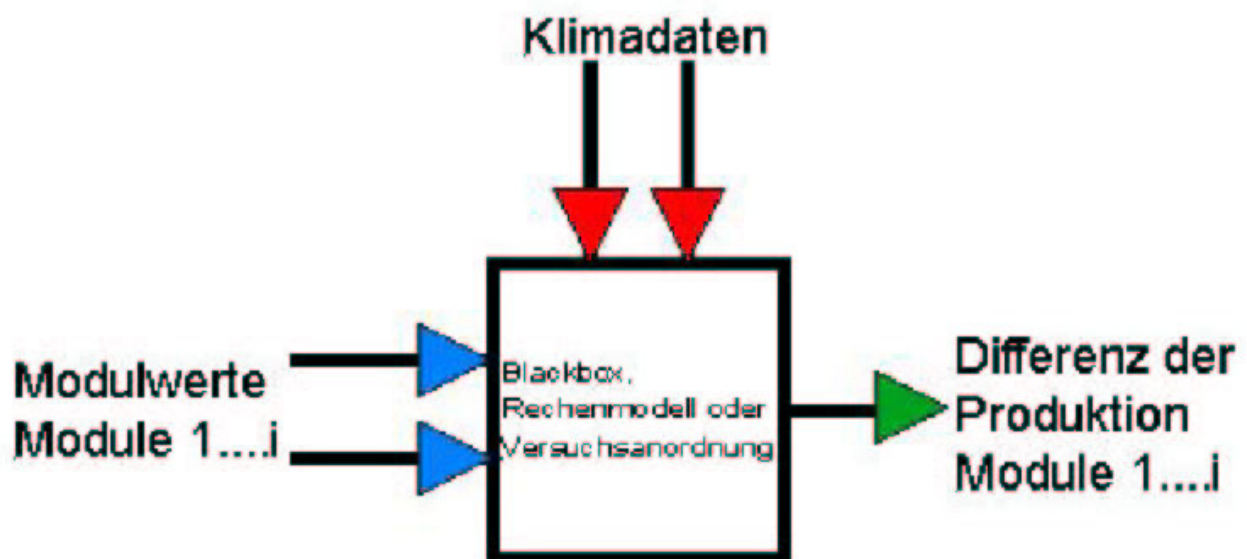


Schlussbericht PV Forschung, DIS 42918 / 82867, Dezember 2002

# Energy Rating of Solar Modules

## Workshop March 22, 2002 in Zürich

ausgearbeitet durch:

**Robert Kröni****Enecolo AG****Lindhofstrasse 52, 8617 Mönchaltorf**

## Abstract

As there are commercial investors in photovoltaic, they need a better declaration of the most costly component of a PV installation: the solar modules. Today, we just know about the peak Power at STC. The actual purchase of modules is comparing the price vs. power output at STC. But it should compare price vs. the energy production. With the actual data, it's not possible. That's the reason why a workshop was held in March 2002 in Zurich to get an overview of existing methods of energy rating. There were three comparable methods found, that need to be tested to see which one gives the best information.

The workshop has been a good success, more than 30 people attended the workshop. As a result of the workshop a continuing project has been defined and is starting end of 2002.

## Zusammenfassung

Ausgangspunkt war die derzeit unbefriedigende Situation bei der Charakterisierung von Solarmodulen. Wünschenswert wäre eine Charakterisierung von Modulen dergestalt, dass Aussagen über die Energieproduktion bei realen Bedingungen ermöglicht.

Das Ziel für den Anwender: Ein einfaches Verfahren, mit dem er herausfinden kann, wie sich die verschiedenen Module ertragsmässig im Vergleich zueinander verhalten, in zweiter Linie ein Verfahren zur Bestimmung des absoluten Modulertrages.

Um einen Überblick über die aktuelle Situation zu erhalten, wurde mit Hilfe des Bundesamtes für Energie und dem ewz ein Workshop durchgeführt.

Das Ziel des Workshop: Die Übersicht über die verschiedenen Ansätze zu erhalten, die Verfahren zu diskutieren und die Mängel herauszufinden. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Modelle sollen im Workshop miteinander verglichen werden.

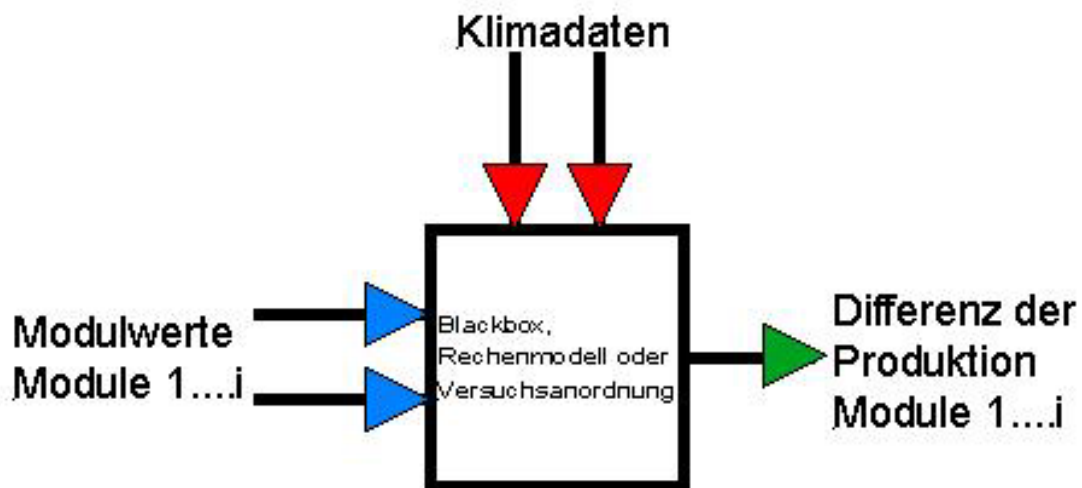
## Kurzbeschreibung des Workshop

Im Workshop wurden Vertreter der derzeit relevanten Ansätze eingeladen, um deren Verfahren kennen zu lernen.

| Lösungsansatz                                                                                                            | Institution                                                   | Status                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Vergleichsmessung am gleichen Standort, Messung des Ertrags                                                              | LEEE-TISO                                                     | laufende Messungen                                                  |
| Charakterisierung der Energieproduktion aufgrund von Referenztagen                                                       | IEEE/IEC                                                      | Entwurf für eine Empfehlung (IEEE P1749/D4) und IEC 1853D liegt vor |
| Optimod                                                                                                                  | internationale Arbeitsgruppe                                  | EU-Projekt                                                          |
| STC Plus, d.h. drei weitere physikalische Kriterien, welche mit bestehenden Meteodaten leicht verarbeitet werden können. | Gruppe PSI/Durisch, Ing.-Büro Hostettler, Enecolo AG/R. Kröni | Projektvorschlag                                                    |

Der Workshop konnte mit einer erfreulichen Beteiligung durchgeführt werden. Mehr als 30 Personen konnten im ewz Kundenzentrum begrüsst werden. Folgende Referenten hielten einen Vortrag.

| Referent                                 | Themen                                                                                                |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Domenico Chianese, LEEE-TISO Lugano      | Ertragsmessung unter realen Bedingungen                                                               |
| Wilhelm Durisch, PSI Villigen            | Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell                                                           |
| Hermann Laukamp, FH-ISE Freiburg         | Jahreswirkungsgrad, Erfahrungen mit einem Prognoseverfahren RRC                                       |
| Peter Toggweiler, Enecolo AG Mönchaltorf | Verfahren mit Teillastwirkungsgraden, derzeit im JRC Ispra in Entwicklung.                            |
| Markus Real, Alpha Real AG               | Methoden zur Energieertragsbestimmung von PV-Modulen - Gegenwärtige Internationale Standards-Entwürfe |



## Workshop vergleichender Modulertrag vom 22. März 2002 in Zürich

### Tagungsunterlagen

unterstützt durch:



Gesellschaft  
Mont Soleil



März 2002

# Inhaltsverzeichnis

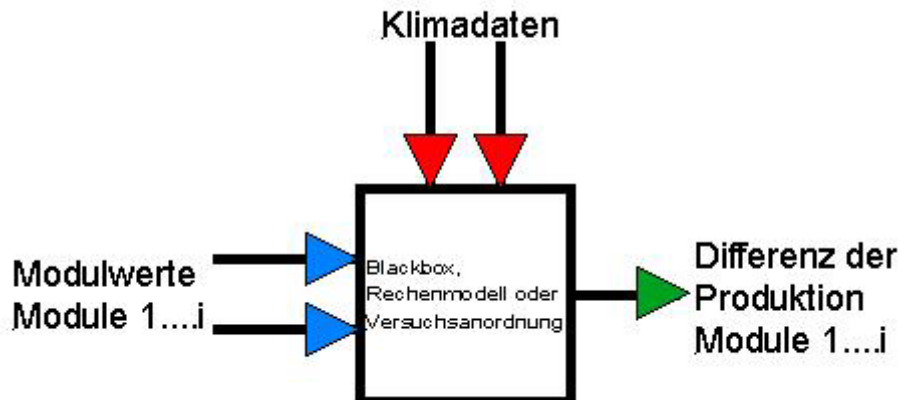
1. Einleitung, Robert Kröni, Enecolo AG Mönchaltorf
2. Ertragsmessung unter realen Bedingungen, Domenico Chianese und Gabi Friesen, LEEE-TISO Lugano
3. Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell, Wilhelm Durisch, PSI Villigen
4. Jahreswirkungsgrad, Erfahrungen mit einem Prognoseverfahren RRC, Hermann Laukamp, FH-ISE Freiburg
5. Verfahren mit Teillastwirkungsgraden, derzeit im JRC Ispra in Entwicklung, Peter Toggweiler, Enecolo AG Mönchaltorf
6. Methoden zur Energieertragsbestimmung von PV-Modulen - Gegenwärtige Internationale Standards-Entwürfe, Markus Real, Alpha Real AG
7. Übersicht der Verfahren, Robert Kröni, Enecolo AG Mönchaltorf
8. Zusammenfassung, Stefan Nowak, NET AG St.Ursen

# **1. Einleitung, Robert Kröni, Enecolo AG Mönchaltorf**

## Workshop vergleichender Modulertrag vom 22. März 2002 in Zürich, Einleitung von Robert Kröni, Enecolo AG

### Zielsetzung

Das Ziel für den Anwender: Ein einfaches Verfahren, mit dem er herausfinden kann, wie sich die verschiedenen Module ertragsmässig im Vergleich zueinander verhalten, in zweiter Linie ein Verfahren zur Bestimmung des absoluten Modulertrages.



Das Ziel des Workshop: Die Übersicht über die verschiedenen Ansätze zu erhalten, die Verfahren zu diskutieren und Mängel herauszufinden.

### Referenten, Themen und Bewertungskriterien

| Referent                                 | Themen                                                                                                |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Domenico Chianese, LEEE-TISO Lugano      | Ertragsmessung unter realen Bedingungen                                                               |
| Wilhelm Durisch, PSI Villigen            | Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell                                                           |
| Hermann Laukamp, FH-ISE Freiburg         | Jahreswirkungsgrad, Erfahrungen mit einem Prognoseverfahren RRC                                       |
| Peter Toggweiler, Enecolo AG Mönchaltorf | Verfahren mit Teillastwirkungsgraden, derzeit im JRC Ispra in Entwicklung.                            |
| Markus Real, Alpha Real AG               | Methoden zur Energieertragsbestimmung von PV-Modulen - Gegenwärtige Internationale Standards-Entwürfe |

#### Bewertungskriterien

- Sind Inputdaten Klima zumindest für Europa, allgemein verfügbar?
- Ist das Verfahren zur Ermittlung der Modulwerte Standard?
- Sind diese Werte einfach, schnell und kostengünstig zu ermitteln?
- Kann der Anwender diese Werte auf einfache Art und zu vernünftigen Kosten nachprüfen?
- Ist das Rechenverfahren für den Anwender handhabbar (Rechenzeit, Eingabe Inputdaten etc.)
- Kann das Verfahren innert nützlicher Zeit zur Verfügung gestellt werden.

## **Verdankungen**

Dieser Workshop ist zu Stande gekommen dank:

- Der Unterstützung des BfE
- Einer Beitragszusage der Gesellschaft Mont Soleil
- Dem ewz, das den Raum zur Verfügung gestellt hat
- Den Referenten, die für wenig Geld hier antreten

## **Relevanz aus der Praxis**

Beispiel: eine 130-kW-Anlage mit folgenden Rahmenbedingungen:

- Modulpreis Fr. 5.80 pro Watt
- Jahresertrag Fr. 82'000.- während 20 Jahren

Eine Ertragsabweichung von 3% bedeutet:

- Einen Wert von Fr. 31'000.- (Barwert über 20 Jahre)
- Oder eine Preisdifferenz von 25 Rp./W Modulpreis

Die aus der Ertragsdifferenz der angenommenen 3% resultierende Differenz im Modulpreis ist ungefähr das, was die verschiedenen Angebote auseinander liegen. Die Kenntnis über diese Eigenschaft kann also eine Ausschreibung entscheiden. Oder noch einmal anders: Die Kenntnis dieses Wertes erlaubt es, den Strompreis bis 2 Rp./kWh billiger zu kalkulieren. Zurzeit wird mit den Elektrizitätswerken um halbe Rappen gefeilscht. Die Kenntnis über den Modulertrag kann matchentscheidend sein.

Die Kenntnis der Differenz der Produktion hat also handfeste wirtschaftliche Konsequenzen. Drei Prozent Produktionsunterschiede sind nach Aussagen von Fachleuten sogar noch vorsichtig geschätzte Werte.

## **Mögliche Probleme**

Die Deklaration des Modulertrages erfordert von den Lieferanten eine zusätzliche Anstrengung (sofern die Angaben von den Lieferanten bereitgestellt werden sollen). Wenn die Situation mit den  $P_{mpp}$  bei STC betrachtet wird, so sind die Prognosen nicht so gut. Es kann von einem eigentlichen „STC-Malaise“ gesprochen werden.

## **Weshalb Schwerpunkt beim vergleichenden und nicht beim absoluten Ertrag**

Wie die Erfahrungen zeigen, hat die Einbausituation einen sehr grossen Einfluss auf den Ertrag. Einzelne Einflüsse sind bekannt, andere nicht. Hinzu kommen noch die Wechselrichterrahmenbedingungen. Die Unsicherheitsfaktoren für den absoluten Ertrag sind also noch sehr gross. Deshalb interessiert in erster Linie die Differenz der Produktion von verschiedenen Modulen. Wenn ein Kalkulationsfehler gemacht wird, dann für alle in der gleichen Art, so dass der Vergleich trotzdem stimmt.

26. März 2002, Robert Kröni

## **2. Ertragsmessung unter realen Bedingungen, Domenico Chianese und Gabi Friesen, LEEE-TISO Lugano**



# DRAFT VERSION: Matrix Method for Energy Rating Calculations

## 1. Energy Rating Measurements and Matrix Method

At the LEEE-TISO Test Centre, the quality and reliability of a large number of PV modules is investigated in terms of energy production and power degradation over time. The modules tested are exposed outdoors on fixed open-racks for a whole year (cycle) under MPP. Each minute the electrical outdoor characteristics of the modules are stored simultaneously with the meteo data and every 3 months indoor measurements @STC are made ( $P_0$ ,  $P_3$ ,  $P_6$ ,  $P_9$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{15}$ ). The experimental data are used to develop a matrix method for energy rating calculations for different local sites and climatic conditions.

The energy rating is obtained by multiplying the elements of the power matrix  $P_m(G_i, T_a)$  of an open-rack structure by the corresponding climatic condition matrix  $N(G_i, T_a)$  elements. The method can be implemented easily through the use of a spreadsheet and a program as METEONORM.

The results of the modules tested by TISO during the 7<sup>th</sup> test-cycle will be presented (sc-Si, mc-Si, a-Si and CIS).

## 2. Input: Climatic Condition Matrix

Usually the basic meteorological parameters available are those of the monthly horizontal plane irradiation  $G_0$  and the average ambient temperature  $T_a$ . By importing these monthly values into a program as METEONORM and by selecting the orientation and tilt angle of the modules ( $-7^\circ$  south azimuth and  $45^\circ$  tilted angle for the TISO stand) the hourly values  $G_i$  and  $T_a$  can be generated. The for the energy calculation needed climatic condition matrix can be easily generated by importing these hourly METEONORM values into a specific program or by simply implementing the matrix generation as additional option into the METEONORM program. The resulting climatic condition matrix shows the distribution of the number of events as a function of ambient temperature  $T_a$  and tilted irradiance  $G_i$ .

The comparison of the real module energy  $E_{real}$  (calculated with the measured climatic condition matrix) and the estimated module energy  $E_{syn}$  (calculated with a modeled climatic condition matrix) shows that even by using a minimum of available informations ( $G_0$  and  $T_a$ ) and by ignoring parameters as the diffuse irradiance, solar spectrum, wind speed etc. very good results could be obtained with the METEONORM program.

## 3. Input: Power Matrix

The most realistic power matrix is generated by using the experimental data acquired each minute over a period of one year. The experimentally obtained power matrix is extended to cover all possible climatic conditions ( $-5^\circ\text{C}$  to  $40^\circ\text{C}$  and  $50\text{ W/m}^2$  to  $1100\text{ W/m}^2$ ). The best results with the matrix extension are obtained for crystalline silicon modules where the mathematics used for the extrapolation are more straight forward (linear trends) than for other technologies. The extrapolation procedure ignores all values which have a low event number ( $N < 10$ ) and where the standard deviation of the Power is very high ( $\text{St.dev}/\text{Avg.} > 20\%$ ).

The from 1 year measurements obtained extended power matrix can be used for further studies of alternative power matrix generation methods. It is under investigation if it's possible to reduce to a minimum the measurement time and the complexity of the method. The possibilities are various. First the measurement period could be reduced from 1 year to 3-1 months (only possible for modules which shows no large degradation over time), second the matrix could be generated by using indoor measurements (problems with these technologies which are difficult to measure indoor and difficulty to translate the cell temperature to ambient temperature) and third the measurement time could be reduced by using a sun tracked system.

To compare different type of modules and to consider as well the possible degradation over time of the power matrix should be normalized with the stabilized Power ( $P_{15}$ ).

## 4. Future work

*Indoor studies:* Comparison of power matrices created by indoor measurements with outdoor generated power matrices.

*Sun Tracker system:* Energy Rating measurements with the TISO sun tracker system.

*Supporting structure and thermal behavior:* Transition of the power matrix of an open rack structure to the power matrix for various module mounting systems (isolated roof mounted, ventilated roof mounted,...). Comparison of translated matrices with real power matrices (measurements with different mounting structures).

## 5. Output : Final Report (Draft)

Additional Informations such as histograms of the monthly and yearly energy production for standard days or locations could be included in the final report (easier understandable by the end user).

|                                                               |                                             |                                                               |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Scuola Universitaria Professionale<br>della Svizzera Italiana | Dipartimento<br>Costruzioni<br>e Territorio | Laboratorio di Energia, Ecologia ed Economia<br><br>LEEE-TISO |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|

**Module type:** .....  
**Manufacturer:** .....

## 1. NOMINAL BEHAVIOUR

| $P_m$ [W] | $V_m$ [V] | $I_m$ [A] | $V_{oc}$ [V] | $I_{sc}$ [A] |
|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
|           |           |           |              |              |

Table 1: Nominal electrical behaviour ( $P_m$ : max power;  $V_m$ : voltage at  $P_m$ ;  $I_m$ : current at  $P_m$ ;  $V_{oc}$ : open circuit voltage;  $I_{sc}$ : short circuit current).

| $\beta$ [mV/°C/cell] | $\alpha$ [mA/°C/cell] |  |  |  |
|----------------------|-----------------------|--|--|--|
|                      |                       |  |  |  |

Table 2: Nominal electrical behaviour ( $\beta$ : open circuit voltage temperature coefficient;  $\alpha$ : short circuit current temperature coefficient).

| L [cm] | W [cm] | H [cm] | Weight [kg] |  |
|--------|--------|--------|-------------|--|
|        |        |        |             |  |

Table 3: Nominal mechanical behaviour.

## 2. MEASURED BEHAVIOUR

| $P_n$ [W] | $P_a$ [W] | $P_0$ [W] | $P_3$ [W] | $P_6$ [W] | $P_9$ [W] | $P_{12}$ [W] | $P_{15}$ [W] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
|           |           |           |           |           |           |              |              |
| ---       | - %       | - %       | - %       | - %       | - %       | - %          | - %          |

Table 4: Power measured at STC vs. time ( $P_n$ : nominal power;  $P_a$ : power to the acquisition;  $P_0$ : after 20kWh/m<sup>2</sup> exposure;  $P_3$ : power after 3 months;  $P_6$ : power after 6 months; etc.).

| NOCT [°C] | $P_m$ [W] | $V_m$ [V] | $I_m$ [A] | $V_{oc}$ [V] | $I_{sc}$ [A] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
|           |           |           |           |              |              |

Table 5: Electrical behaviour measured at NOCT (NOCT: Nominal Operating Cell Temperature).

| Ta \ Gi | 400 [W/m <sup>2</sup> ] | 600 [W/m <sup>2</sup> ] | 800 [W/m <sup>2</sup> ] | 1000 [W/m <sup>2</sup> ] |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 5 [°C]  |                         |                         |                         |                          |
| 15 [°C] |                         |                         |                         |                          |
| 25 [°C] |                         |                         |                         |                          |
| 35 [°C] |                         |                         |                         |                          |

Table 6: Power at different climatic conditions for an open-rack structure.

**Power Matrix** (included as excel file)

range:  $50 < G_i < 1100$  [W/m<sup>2</sup>];  $-5 < T_a < 40$  [°C]

mesh size:  $50$  [W/m<sup>2</sup>] x  $2$  [°C]

# Ertragsmessungen unter realen Bedingungen

## LEEE-TISO

Domenico Chianese, Gabi Friesen

Sandro Rezzonico, Nerio Cereghetti,  
Antonella Realini, Enrico Burà

leee@dct.supsi.ch

SUPSI, DCT, LEEE-TISO

<http://leee.dct.supsi.ch>

## Verzeichnis

- LEEE-TISO Zentrale
  - Prüfungsverfahren
  - Testbedingungen
  - Nominal und Reale Leistung
- Energieertrag
  - Zielsetzung und Zielpublikum
  - Matrix Methode
  - ... mit gemessenen Meteo Daten (Minutenwerte)
  - ... mit simulierten Meteo Daten (Stundenwerte)
  - Ergebnisse
  - Final report
  - Alternativmethoden zur Generation der Leistungsmatrix
  - Transposition der Leistungsmatrix (  $T_{\text{bom}} \rightarrow T_{\text{a}}$  )
- Conclusions ...

## Energie Stands LEEE-TISO



Anonym gekaufte Module (2 Module pro Typ)

## Prüfungsverfahren

- Registrierung  $P_n$  (vom Hersteller gelieferte Nennleistung)
- Iniziale Leistung @ STC –  $P_0$   
(gepulster Solar Simulator,  $1000 \text{ W/m}^2$  und  $25^\circ\text{C}$ )
- Ertragsmessungen unter realen Umwelt-Bedingungen →  **$E(G_i, T_a)$**
- Leistungs Messungen @ STC (alle 3 Monate) –  $P_3, P_6, P_9, P_{12}, P_{15}$

# Ertragsmessungen unter realen klimatischen Bedingungen

CH-Lugano

Open-rack Struktur, Azimut  $-7^\circ$ , Neigung  $45^\circ$

MPPT

$V_m$   $I_m$   $G_{i, glob}$   $G_{h, glob}$   $G_{h, diff}$   $T_a$   $T_{bom}$

Intervall: 1 Minute

Nur Modulertragsmessungen !

## Testzyklus 7 (2000-2001)

**Testdauer: 15 Monate**

7 sc-Si, 7 mc-Si, 2a-Si und 1 CIS

$P_0 - P_3$  Degradierung möglich

$P_3 - P_{15}$  Energieertragsmessungen

# Nominal und Reale Leistungen

## $P_0 \dots P_{15}$ (Zyklus 7)

| Typ       | Zelle | Pmax @ STC [W] |       |       |          | Dp (%)                  |                         |                            |
|-----------|-------|----------------|-------|-------|----------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
|           |       | $P_n$          | $P_0$ | $P_3$ | $P_{15}$ | $\frac{P_0 - P_n}{P_n}$ | $\frac{P_3 - P_0}{P_0}$ | $\frac{P_{15} - P_n}{P_n}$ |
| SW50T     | sc-Si | 50             | 40.5  | 36.7  | 31.6     | -19                     | -9.4                    | -36.8                      |
| Sunslates | sc-Si | 12             | 10.9  | 10.2  | 10.2     | -9.2                    | -6.4                    | -15                        |
| SM55      | sc-Si | 55             | 52.6  | 50.1  | 49.5     | -4.4                    | -4.8                    | -10                        |
| M-S36-53  | sc-Si | 53             | 48.4  | 48.6  | 47.5     | -8.7                    | 0.4                     | -10.4                      |
| M500A     | sc-Si | 55             | 49.3  | 48.8  | 48.9     | -10.4                   | -1                      | -11.1                      |
| BP275F    | sc-Si | 75             | 69.2  | 70    | 68.5     | -7.7                    | 1.2                     | -8.7                       |
| RSM50     | mc-Si | 49             | 45.3  | 44.9  | 44.6     | -7.6                    | -0.9                    | -9                         |
| PW1000    | mc-Si | 91             | 84.5  | 84.4  | 85.2     | -7.1                    | -0.1                    | -6.4                       |
| MSX83     | mc-Si | 83             | 78.8  | 75.2  | 75.1     | -5.1                    | -4.6                    | -9.5                       |
| KC60      | mc-Si | 60             | 55.1  | 53.7  | 54.1     | -8.2                    | -2.5                    | -9.8                       |
| GPV75P    | mc-Si | 75             | 63.1  | 63.2  | 62       | -15.9                   | 0.2                     | -17.3                      |
| ASE-100   | mc-Si | 100            | 100.7 | 97.5  | 96.9     | 0.7                     | -3.2                    | -3.1                       |
| APX90     | mc-Si | 90             | 69.2  | 68.6  | 66.7     | -23.1                   | -0.9                    | -25.9                      |
| US64      | a-Si  | 64             | 68.7  | 58.9  | 57       | 7.3                     | -14.3                   | -10.9                      |
| DS40      | a-Si  | 40             | 38.7  | 34.4  | 32.1     | -3.2                    | -11.1                   | -19.8                      |
| ST40      | CIS   | 38             | 38.4  | 35.4  | 32.8     | 1.1                     | -7.8                    | -13.7                      |

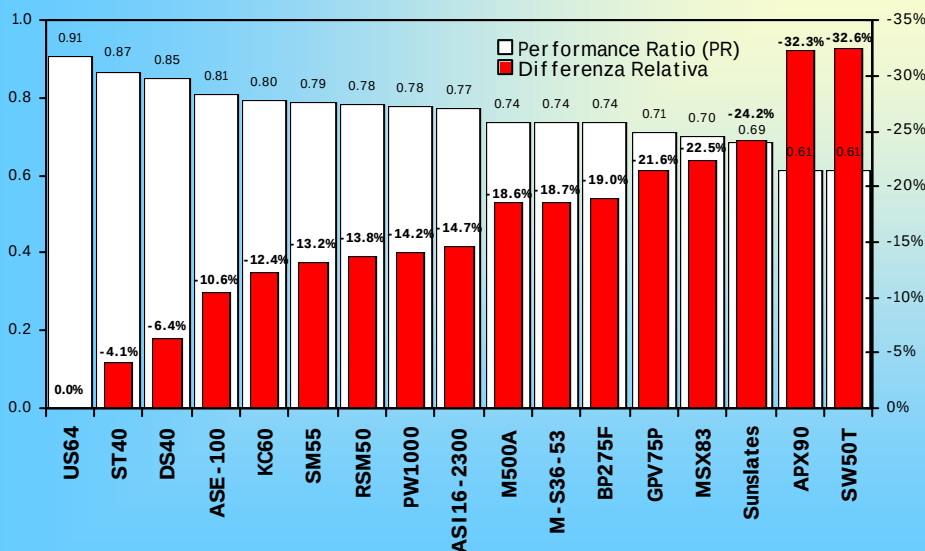


⇒ E

SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

7

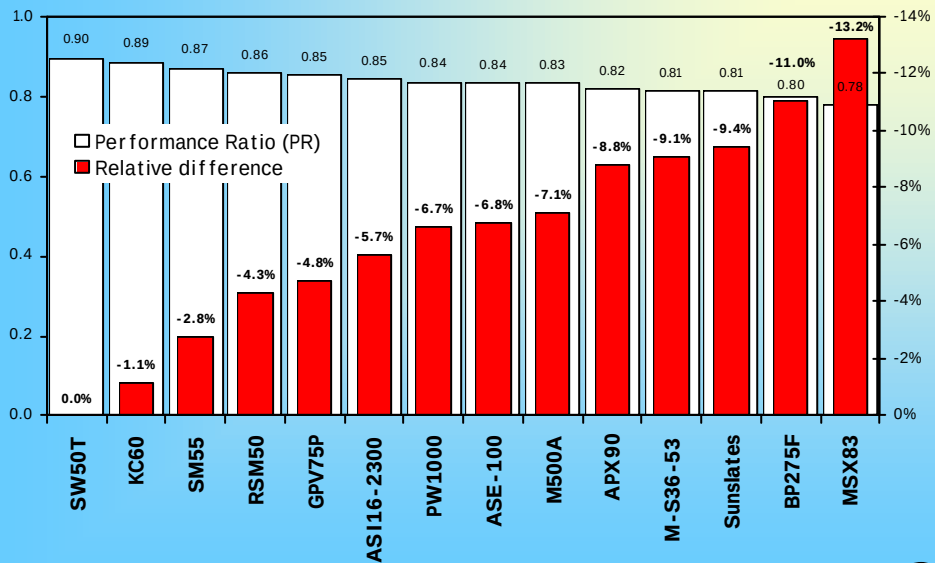
## PERFORMANCE RATIO vs. Nennleistung $P_n$



SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

8

## PERFORMANCE RATIO vs. reale Leistung $P_{15}$



SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

9

## Zielsetzung & Zielpublikum

Anwender:

1. Vorhersage des Jährlichen Modulertrags für einen Mitteleuropäischen Ort.
2. Modulertragsberechnung einfach und schnell.
3. Vergleich verschiedener Module unter bestimmten klimatischen und Installationsbedingungen.
4. METEO Daten einfach verfügbar.

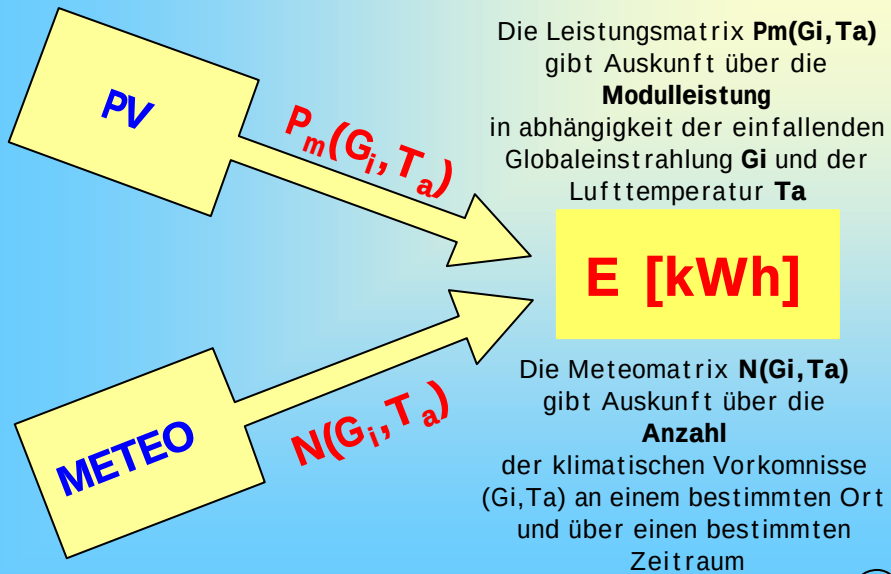
Verfahren zur Modulmessung :

1. In jedem anerkannten PV Testlabor reproduzierbar.
2. Akzeptable Testdauer.
3. Akzeptable Präzision.

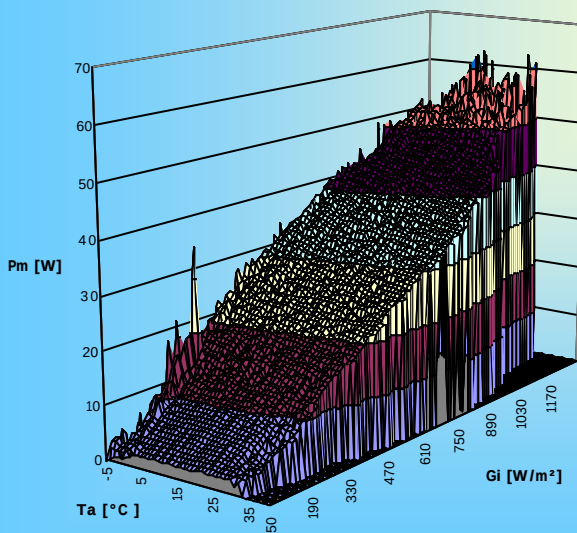
SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

10

# Matrix Methode



## Mittlere Leistung (Lugano)



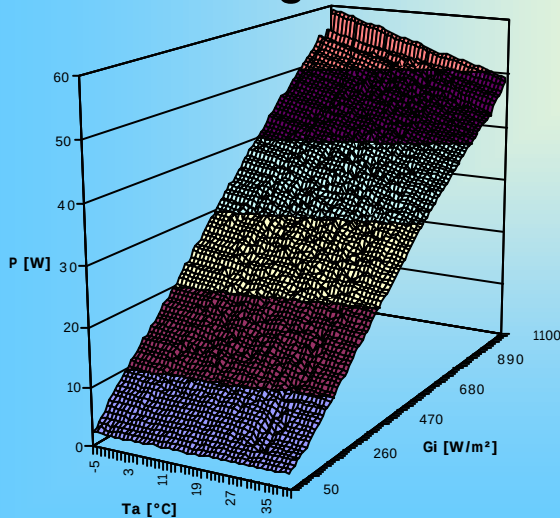
Minutenwerte !

$$P_m(G_i, T_a)$$

**Matrixgitter :**  
**1 °C und 10 W/m²**



## Erweiterung der mittleren Leistungs Matrix (Lugano)



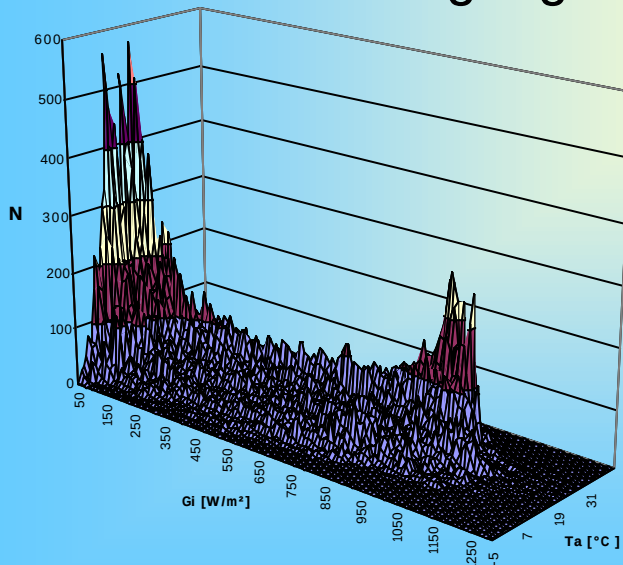
$$P_m(G_i, T_a)$$

**Matrixgitter :**  
**1 °C und 10 W/m²**

SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

13

## Meteo Bedingungen (Lugano)



Minutenwerte

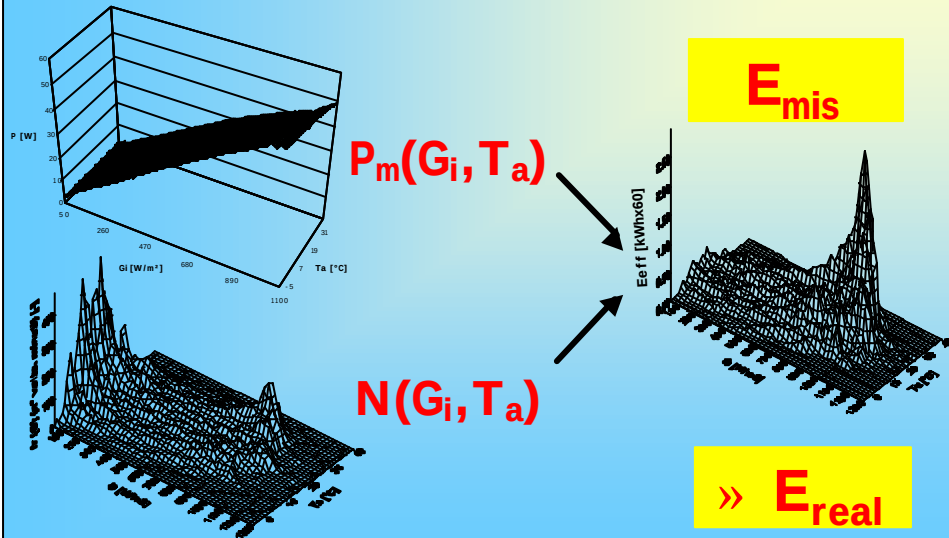
$$N(G_i, T_a)$$

**Matrixgitter :**  
**1 °C und 10 W/m²**

SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

14

# Matrix Methode mit gemessenen Meteodaten (Lugano)



SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

15

# Matrix Methode mit simulierten Meteodaten

Monatswerte  $H_{h, glob}$   $T_a$

- LEEE-TISO Testzyklus 7
- Lugano
- Beliebiger Ort

- Meteonorm
- PVsyst

Software

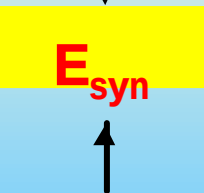
Azimet  
Neigung

Stundenwerte  $G_i$   $T_a$

Software

$P_m(G_i, T_a)$

$E_{syn}$



$N(G_i, T_a)$

SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

16

## Vergleich: realer Energieertrag mit simuliertem Energieertrag (I)

| METEOPROGRAMM |       | MN     |        | PVS    | MN      | PVS     |
|---------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
|               |       | Ereal  | Esyn   | Esyn   | Er-Esyn | Er-Esyn |
| Modules       |       | [kWh]  | [kWh]  | [kWh]  | [kWh]   | [kWh]   |
| SW50T         | sc-Si | 40.26  | 41.57  | 40.42  | 3.27%   | 0.39%   |
| Sunslates     | sc-Si | 60.60  | 61.54  | 59.13  | 1.54%   | -2.43%  |
| SM55          | sc-Si | 62.36  | 63.84  | 61.55  | 2.38%   | -1.29%  |
| M-S36-53      | sc-Si | 57.05  | 57.87  | 55.67  | 1.43%   | -2.41%  |
| M500A         | sc-Si | 58.69  | 59.24  | 56.88  | 0.94%   | -3.08%  |
| BP275F        | sc-Si | 78.40  | 80.76  | 77.92  | 3.02%   | -0.62%  |
| ASI16-2300    | sc-Si | 42.43  | 42.57  | 40.81  | 0.32%   | -3.81%  |
| RSM50         | mc-Si | 52.90  | 53.37  | 51.28  | 0.88%   | -3.06%  |
| PW1000        | mc-Si | 104.94 | 105.68 | 101.50 | 0.71%   | -3.28%  |
| MSX83         | mc-Si | 85.39  | 88.54  | 85.51  | 3.68%   | 0.15%   |
| KC60          | mc-Si | 67.61  | 68.27  | 65.64  | 0.98%   | -2.92%  |
| GPV75P        | mc-Si | 75.29  | 77.75  | 75.10  | 3.26%   | -0.25%  |
| ASE-100       | mc-Si | 117.46 | 118.86 | 114.36 | 1.20%   | -2.64%  |
| APX90         | mc-Si | 81.14  | 80.79  | 77.36  | -0.43%  | -4.66%  |
| US64          | a-Si  | 83.19  | 85.38  | 82.73  | 2.63%   | -0.55%  |
| DS40          | a-Si  | 49.32  | 49.35  | 47.78  | 0.06%   | -3.13%  |
| ST40          | CIS   | 49.11  | 50.05  | 48.13  | 1.91%   | -1.99%  |
| Maximum error |       |        |        |        | 3.68%   | 4.66%   |
| Average error |       |        |        |        | 1.71%   | 2.41%   |

**Matrixgitter : 1 °C und 10 W/m²**

MN : Meteoronorm  
PVS : PVSyst

SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

17

## Vergleich: realer Energieertrag mit simuliertem Energieertrag (II)

| METEOPROGRAMM |       | MN     |        | PVS    | MN      | PVS     |
|---------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
|               |       | Ereal  | Esyn   | Esyn   | Er-Esyn | Er-Esyn |
| Modules       |       | [kWh]  | [kWh]  | [kWh]  | [kWh]   | [kWh]   |
| SW50T         | sc-Si | 40.26  | 41.70  | 40.52  | 3.58%   | 0.65%   |
| Sunslates     | sc-Si | 60.60  | 61.71  | 59.29  | 1.83%   | -2.16%  |
| SM55          | sc-Si | 62.36  | 64.03  | 61.69  | 2.68%   | -1.07%  |
| M-S36-53      | sc-Si | 57.05  | 58.05  | 55.81  | 1.75%   | -2.17%  |
| M500A         | sc-Si | 58.69  | 59.42  | 57.00  | 1.24%   | -2.88%  |
| BP275F        | sc-Si | 78.40  | 81.00  | 78.06  | 3.32%   | -0.43%  |
| ASI16-2300    | sc-Si | 42.43  | 42.72  | 40.91  | 0.68%   | -3.58%  |
| RSM50         | mc-Si | 52.90  | 53.54  | 51.41  | 1.21%   | -2.82%  |
| PW1000        | mc-Si | 104.94 | 106.05 | 101.74 | 1.06%   | -3.05%  |
| MSX83         | mc-Si | 85.39  | 88.81  | 85.72  | 4.01%   | 0.39%   |
| KC60          | mc-Si | 67.61  | 68.48  | 65.78  | 1.29%   | -2.71%  |
| GPV75P        | mc-Si | 75.29  | 77.97  | 75.28  | 3.56%   | -0.01%  |
| ASE-100       | mc-Si | 117.46 | 119.23 | 114.63 | 1.51%   | -2.41%  |
| APX90         | mc-Si | 81.14  | 81.07  | 77.54  | -0.09%  | -4.44%  |
| US64          | a-Si  | 83.19  | 85.65  | 82.96  | 2.96%   | -0.28%  |
| DS40          | a-Si  | 49.32  | 49.56  | 47.96  | 0.49%   | -2.76%  |
| ST40          | CIS   | 49.11  | 50.20  | 48.25  | 2.22%   | -1.75%  |
| Maximum error |       |        |        |        | 4.01%   | 4.44%   |
| Average error |       |        |        |        | 1.99%   | 2.20%   |

**Matrixgitter : 2 °C und 50 W/m²**

MN : Meteoronorm  
PVS : PVSyst

SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

18

# Vergleich der Module

| METEOPROGRAMM ▾ Meteonorm |            |         |               |
|---------------------------|------------|---------|---------------|
| Modules                   |            |         | $E_{syn}/P_n$ |
|                           |            | [kWh/W] |               |
| 1                         | US64       | a-Si    | 1.33          |
| 2                         | ST40       | CIS     | 1.32          |
| 3                         | DS40       | a-Si    | 1.23          |
| 4                         | ASE-100    | mc-Si   | 1.19          |
| 5                         | PW1000     | mc-Si   | 1.16          |
| 6                         | SM55       | sc-Si   | 1.16          |
| 7                         | ASI16-2300 | sc-Si   | 1.15          |
| 8                         | KC60       | mc-Si   | 1.14          |
| 9                         | M-S36-53   | sc-Si   | 1.09          |
| 10                        | RSM50      | mc-Si   | 1.09          |
| 11                        | M500A      | sc-Si   | 1.08          |
| 12                        | BP275F     | sc-Si   | 1.08          |
| 13                        | MSX83      | mc-Si   | 1.07          |
| 14                        | GPV75P     | mc-Si   | 1.04          |
| 15                        | Sunslates  | sc-Si   | 1.03          |
| 16                        | APX90      | mc-Si   | 0.90          |
| 17                        | SW50T      | sc-Si   | 0.83          |

| METEOPROGRAMM ▾ Meteonorm |            |         |                  |
|---------------------------|------------|---------|------------------|
| Modules                   |            |         | $E_{syn}/P_{15}$ |
|                           |            | [kWh/W] |                  |
| 1                         | DS40       | a-Si    | 1.54             |
| 2                         | ST40       | CIS     | 1.53             |
| 3                         | US64       | a-Si    | 1.50             |
| 4                         | SW50T      | sc-Si   | 1.32             |
| 5                         | SM55       | sc-Si   | 1.29             |
| 6                         | KC60       | mc-Si   | 1.26             |
| 7                         | GPV75P     | mc-Si   | 1.25             |
| 8                         | ASI16-2300 | sc-Si   | 1.25             |
| 9                         | PW1000     | mc-Si   | 1.24             |
| 10                        | ASE-100    | mc-Si   | 1.23             |
| 11                        | M-S36-53   | sc-Si   | 1.22             |
| 12                        | M500A      | sc-Si   | 1.21             |
| 13                        | Sunslates  | sc-Si   | 1.21             |
| 14                        | APX90      | mc-Si   | 1.21             |
| 15                        | RSM50      | mc-Si   | 1.20             |
| 16                        | BP275F     | sc-Si   | 1.18             |
| 17                        | MSX83      | mc-Si   | 1.18             |

$E_{syn}/P_n$

$E_{syn}/P_{15}$

SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

19

Module type: ASE-100-GT-FT  
 Manufacturer: ASE GmbH

## 1. NOMINAL BEHAVIOUR

| $P_n$ [W] | $V_m$ [V] | $I_m$ [A] | $V_{oc}$ [V] | $I_{sc}$ [A] |
|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| 100       | 34.5      | 2.9       | 42.5         | 3.2          |

Table 1: Nominal electrical behaviour ( $P_n$ : max power;  $V_m$ : voltage at  $P_n$ ;  $I_m$ : current at  $P_n$ ;  $V_{oc}$ : open circuit voltage;  $I_{sc}$ : short circuit current).

| $\beta$ [mV/°C/cell] | $\alpha$ [mA/°C/cell] |
|----------------------|-----------------------|
| -2.1                 | 0.7                   |

Table 2: Nominal electrical behaviour ( $\beta$ : open circuit voltage temperature coefficient;  $\alpha$ : short circuit current temperature coefficient).

| $L$ [cm] | $W$ [cm] | $H$ [cm] | Weight [kg] |
|----------|----------|----------|-------------|
| 128.2    | 64.4     | 3.5      | 8.5         |

Table 3: Nominal mechanical behaviour.

## 2. MEASURED BEHAVIOUR

| $P_n$ [W] | $P_{15}$ [W] | $P_{10}$ [W] | $P_5$ [W] | $P_{15}$ [W] | $P_{10}$ [W] | $P_5$ [W] | $P_{15}$ [W] |
|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|
| 100       | 100.6        | 98.3         | 97.6      | 96.8         | 97.6         | 96.4      | 96.7         |
| —         | 0.6%         | -2.3%        | -3.7%     | -0.9%        | 0.9%         | -3.2%     | -2.3%        |

Table 4: Power measured at STC vs. time ( $P_n$ : nominal power;  $P_{15}$ : power to the acquisition;  $P_{10}$ : after 20kWh/m<sup>2</sup> exposure;  $P_5$ : power after 3 months;  $P_{15}$ : power after 6 months; etc.).

| NOCT [°C] | $P_n$ [W] | $V_m$ [V] | $I_m$ [A] | $V_{oc}$ [V] | $I_{sc}$ [A] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| 45        | 73.7      | 31.6      | 2.3       | 39.6         | 2.6          |

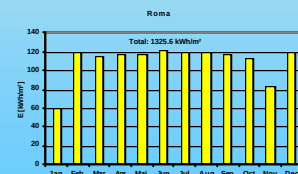
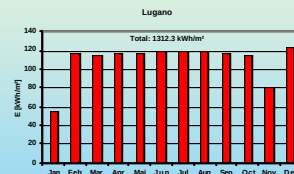
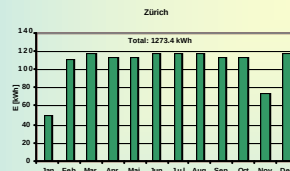
Table 5: Electrical behaviour measured at NOCT (NOCT: Nominal Operating Cell Temperature).

| $I_A$ [A] | 400 [W/m <sup>2</sup> ] | 600 [W/m <sup>2</sup> ] | 800 [W/m <sup>2</sup> ] | 1000 [W/m <sup>2</sup> ] |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 5 [°C]    | 55.9                    | 71.0                    | 91.7                    | 107.1                    |
| 15 [°C]   | 57.7                    | 71.5                    | 90.4                    | 106.1                    |
| 25 [°C]   | 57.5                    | 70.4                    | 89.2                    | 104.9                    |
| 35 [°C]   | 57.3                    | 69.8                    | 88.9                    | 103.7                    |

Table 6: Power at different climatic conditions.

Power Matrix (included as excel file)  
 range: 5.0 <  $G_i$  < 1100 [W/m<sup>2</sup>]; 5 <  $T_a$  < 40 [°C]  
 mesh size: 50 [W/m<sup>2</sup>] x 2 [°C]

# Final Report



SUPSI, DCT, LEEE-TISO Workshop Modulertrag, Zürich, 22.03.2002

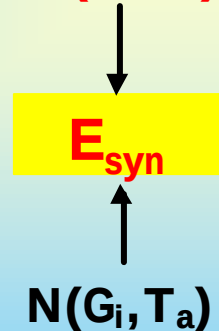
20

# Generation der Leistungsmatrix

**Fixed outdoor 1 Jahr**   **$P_m(G_i, T_a)$**

## Alternativen :

- Fixed outdoor 1-3 Monate
- Indoor
- Sun Tracker



## Achtung :

- Degradierungs und Regenerierungs Effekte in a-Si
- Zuverlässigkeit von Indoormessungen (Thin Films) ?

## Testdauer: 1Jahr ® 1 Monat

| ASE-100       | $E_{syn}$    | D $E_{syn}(1Jahr)$ |
|---------------|--------------|--------------------|
| Testdauer     | [kWh]        | [kWh]              |
| <b>1 Jahr</b> | <b>117.9</b> |                    |
| Januar        | 54.9         | -53.43 %           |
| Februar       | 117.8        | -0.11 %            |
| Marz          | 115.7        | -1.84 %            |
| April         | 115.9        | -1.65 %            |
| Mai           | 116.3        | -1.37 %            |
| Juni          | 119.3        | 1.18 %             |
| Juli          | 118.5        | 0.49 %             |
| August        | 118.4        | 0.40 %             |
| September     | 116.1        | -1.54 %            |
| Oktober       | 114.5        | -2.89 %            |
| November      | 81.0         | -31.31 %           |
| Dezember      | 124.0        | 5.20 %             |

## Conclusions (I)

Anwender:

1. Einfach verständliche Ergebnisse.
2. Einfache und schnelle Anwendung mit Excel und Meteonorm.
3. Monatliche  $G_{h, glob}$  und  $T_a$  Meteowerte sind ausreichend.
4. Einfacher und schneller Vergleich von Modulen möglich.
5. Software zur Generierung der klimatischen Matrix N muss implementiert werden (Excel, Meteonorm, PVSyst,... ?).

Verfahren:

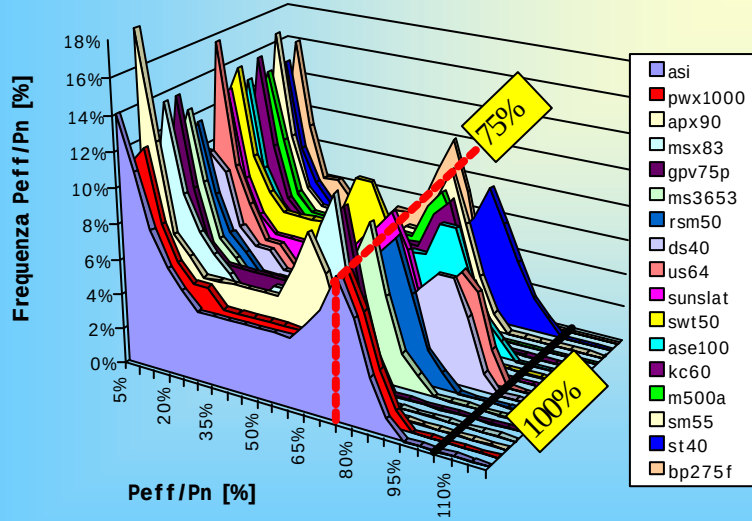
1. Alle Module zeigen gute Ergebnisse (Average Error < 2.5%)
2. CdTe?
3. MPPT ermöglicht Realitätsnahe Ertragsmessungen.

## Conclusions (II)

4. Die Testdauer kann auf einen Monat reduziert werden (Outdoor).
5. Ein Vergleich mit Alternativmethoden (Sun Tracker und Indoor) wird in Zukunft durchgeführt
6. Die Matrix Methode funktioniert für die klimatischen Bedingungen in Lugano und für eine open-rack Struktur
7. Ein Vergleich mit verschiedenen klimatischen Bedingungen und Montagestrukturen muss noch überprüft werden
8. Achtung: Degradationseffekte (a-Si) sind von klimatischen Bedingungen abhängig
9. Die Transpositionsmethode  $T_{bom} \rightarrow T_a$  kann dazu verwendet werden den Energieertrag mit diversen Montagestrukturen (Roof mounted ventilated, isolated etc.) vorherzusehen.

Wir haben nur vom Modulertrag gesprochen aber was ist mit dem ganzen System? Wechselrichter, Schatten, usw.

# Wechselrichter



**P<sub>n</sub>:** Vom Hersteller gelieferter Leistungswert  
**P<sub>eff</sub>:** effektive outdoor Leistung

### **3. Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell, Wilhelm Durisch, PSI Villigen**



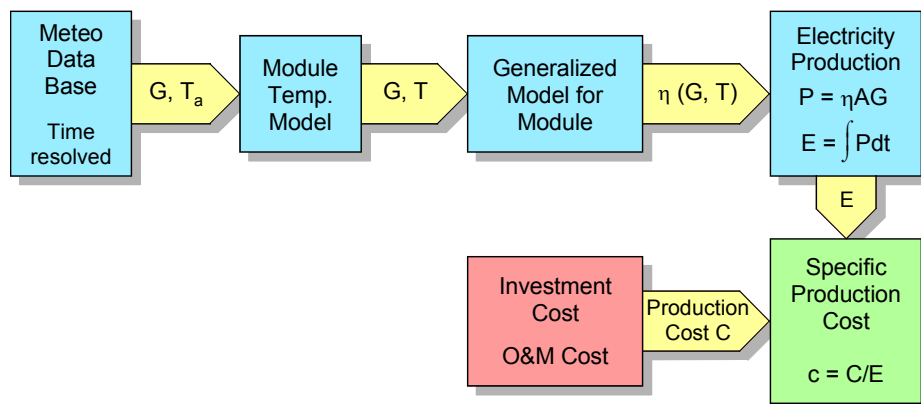
# Jahresertragsrechnung mit Wirkungsgradmodell

W. Durisch, J.-C. Mayor

Paul Scherrer Institut, PSI  
CH-5232 Villigen PSI, Switzerland  
phone: 0041 (0)56 310 26 25, fax: 0041 (0)56 310 21 99  
email: wilhelm.durisch@psi.ch

## Zusammenfassung

Ziel der vorgeschlagenen Ertragsrechnung ist die genaue Ermittlung des Jahresertrags für verschiedene Modultypen unter realen Betriebsbedingungen. Bei vorgegebenem Standort erlaubt dies die Wahl des Modultyps mit maximalem spezifischen Jahresertrag. Da die Daten der Modulhersteller für genaue Ertragsrechnungen nicht ausreichen und zudem oft zu optimistisch sind, wurde eine neue, von den Herstellerangaben unabhängige Berechnungsmethode entwickelt. Sie stützt sich auf Wirkungsgradmessungen unter realen Betriebsbedingungen sowie auf zeitlich gut aufgelöste Daten der Einstrahlung und Umgebungstemperatur. Erfahrungsgemäss hängt der Wirkungsgrad von verschiedenen Einflussgrössen ab, wie Einstrahlungsintensität, Zelltemperatur, Luftmasse usw. Dies soll an Hand einiger Beispiele aufgezeigt werden. In vereinfachter Form ist die Anwendung der Methode in der folgenden Abbildung dargestellt:



- G Irradiance, W/m<sup>2</sup>
- T<sub>a</sub> Ambient temperature, °C
- T Cell temperature, °C
- η Module efficiency, W/W
- A Module area, m<sup>2</sup>
- P Module power, W
- E Annual electricity production, kWh

Zur Anwendung der Methode müssen für ein durchschnittliches Jahr für jede Tageszeit die Einstrahlung und die Umgebungstemperatur verfügbar sein, z. B. in Form von 5-Min.-Mittelwerten. Daraus kann über ein einfaches Modell die Zelltemperatur bestimmt werden. Einstrahlung und Zelltemperatur führen via Wirkungsgradmodell zum Modulwirkungsgrad und via Modulfläche zur Modulleistung. Aufsummierung aller 5-Min.-Erträge führt schliesslich zum gesuchten Jahresertrag. Damit können nun auch die spezifischen Produktionskosten berechnet werden. Die Erweiterung der Methode zur

gleichzeitigen Mitberücksichtigung der jeweiligen relativen Luftmasse  $AM$  zeigen die folgenden Gleichungen:

$$T = T_a + hG \quad (1)$$

$$AM = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)} \quad (2)$$

$$\eta = p \cdot \left[ q \cdot \frac{G}{G_0} + \left( \frac{G}{G_0} \right)^m \right] \cdot \left( 1 + r \frac{T}{T_0} + s \frac{AM}{AM_0} \right) \quad (3)$$

$$G_0 = 1000 \text{ W/m}^2 \quad T_0 = 25 \text{ °C} \quad AM_0 = 1.5$$

$$E = \sum_{k=1}^n \eta(G, T, AM) \cdot G \cdot A \cdot \Delta t \quad (4)$$

$h$  Ross-Koeffizient, °Cm<sup>2</sup>/W

$\gamma$  Sonnenhöhe, °

Die Parameter  $p$ ,  $q$ ,  $r$ ,  $s$  und  $m$  im Wirkungsgradmodell (3) sind aus Kennlinienmessungen bei verschiedenen Werten von  $G$ ,  $T$ , und  $AM$  zu bestimmen. Für ein CIS- und ein CIGS-Modul wurde dies durchgeführt [1,2], ebenso für ein Tripelzellenmodul [3]. Für letzteres wurde allerdings ein flexibleres Modell verwendet. Wirkungsgradmodelle und Ertragsrechnungen für weitere Module sind in Arbeit.

Der Vorteil der hier vorgeschlagenen Methode ist, dass sie sehr genau sein dürfte, der Nachteil, dass sie vorderhand noch relativ aufwändig ist. Die Bereitstellung der Methode in einer für den Anwender geeigneten Form bleibt zu erarbeiten.

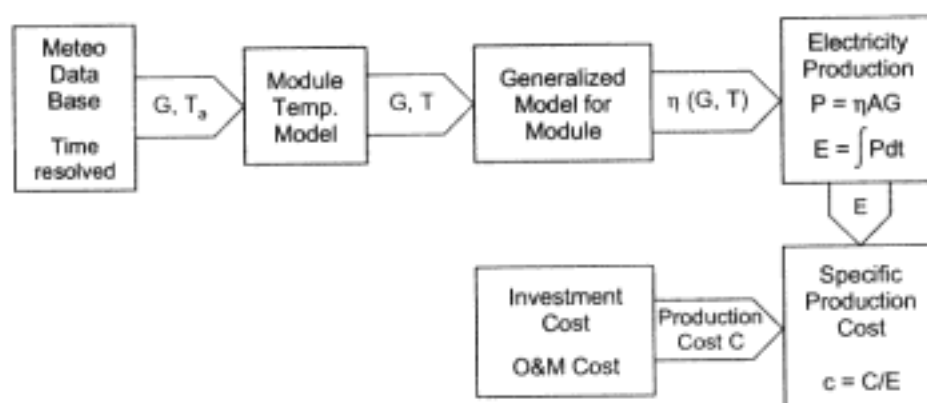
## Literatur

- [1] W. Durisch, King-hang Lam and Josie Close: *Behaviour of a Copper Indium Diselenide Module under Real Operating Conditions*. To be presented at the WREC VII, 29 June – 5 July 2002, Cologne, Germany.
- [2] W. Durisch, King-hang Lam and Josie Close: *Behaviour of a Copper Indium Gallium Diselenide Module under Real Operating Conditions*. To be presented at the WREC VII, 29 June – 5 July 2002, Cologne, Germany.
- [3] W. Durisch, O. Struss and K. Robert: *Efficiency of Selected Photovoltaic Modules under Varying Climatic Conditions*. Renewable Energy, First edition 2000, Elsevier, 779-788 (2000).

# Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell

W. Durisch, J.-C. Mayor  
Paul Scherrer Institut, PSI  
CH-5232 Villigen

## Verfahren



- G Irradiance,  $\text{W/m}^2$
- $T_a$  Ambient temperature,  $^{\circ}\text{C}$
- T Cell temperature,  $^{\circ}\text{C}$
- $\eta$  Module efficiency,  $\text{W/W}$
- A Module area,  $\text{m}^2$
- P Module power, W
- E Annual electricity production, kWh

Workshop Modulertrag, Zürich, 22. März 2002

## **Ziel**

- Jahresertrag verschiedener Modultypen an verschiedenen Standorten  
⇒ Modul mit höchstem Ertrag
  
- Wirtschaftlichkeitsrechnung  
⇒ Modul mit tiefsten Stromgestehungskosten

## Rechengang

Zeit  $t$

$$T = T_a + hG$$

$$AM = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)}$$

$$\eta = p \cdot \left[ q \cdot \frac{G}{G_0} + \left( \frac{G}{G_0} \right)^m \right] \cdot \left( 1 + r \frac{T}{T_0} + s \frac{AM}{AM_0} \right)$$

$$G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$AM_0 = 1.5$$

$$E = \sum_{k=1}^n \eta(G, \vartheta, AM) \cdot G \cdot A \cdot \Delta t$$

$E$  Modulertrag, kWh/Jahr

$\gamma$  Sonnenhöhe,  $^\circ$

Programm für PC entwickelt (Turbo-Pascal)

Parameter  $p$ ,  $q$ ,  $r$ ,  $s$ ,  $m$  und  $h$  aus Kennlinienmessungen bei verschiedenen Werten von  $G$ ,  $T$ , und  $AM$

## Inputdaten Modul

Wirkungsgrad bei:  $G = 10 \text{ bis } 1100 \text{ W/m}^2$

$T = 15 \text{ bis } 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$AM = 1.1 \text{ bis } 8 \text{ m/m}$

$D = 15 \text{ bis } 100 \%$

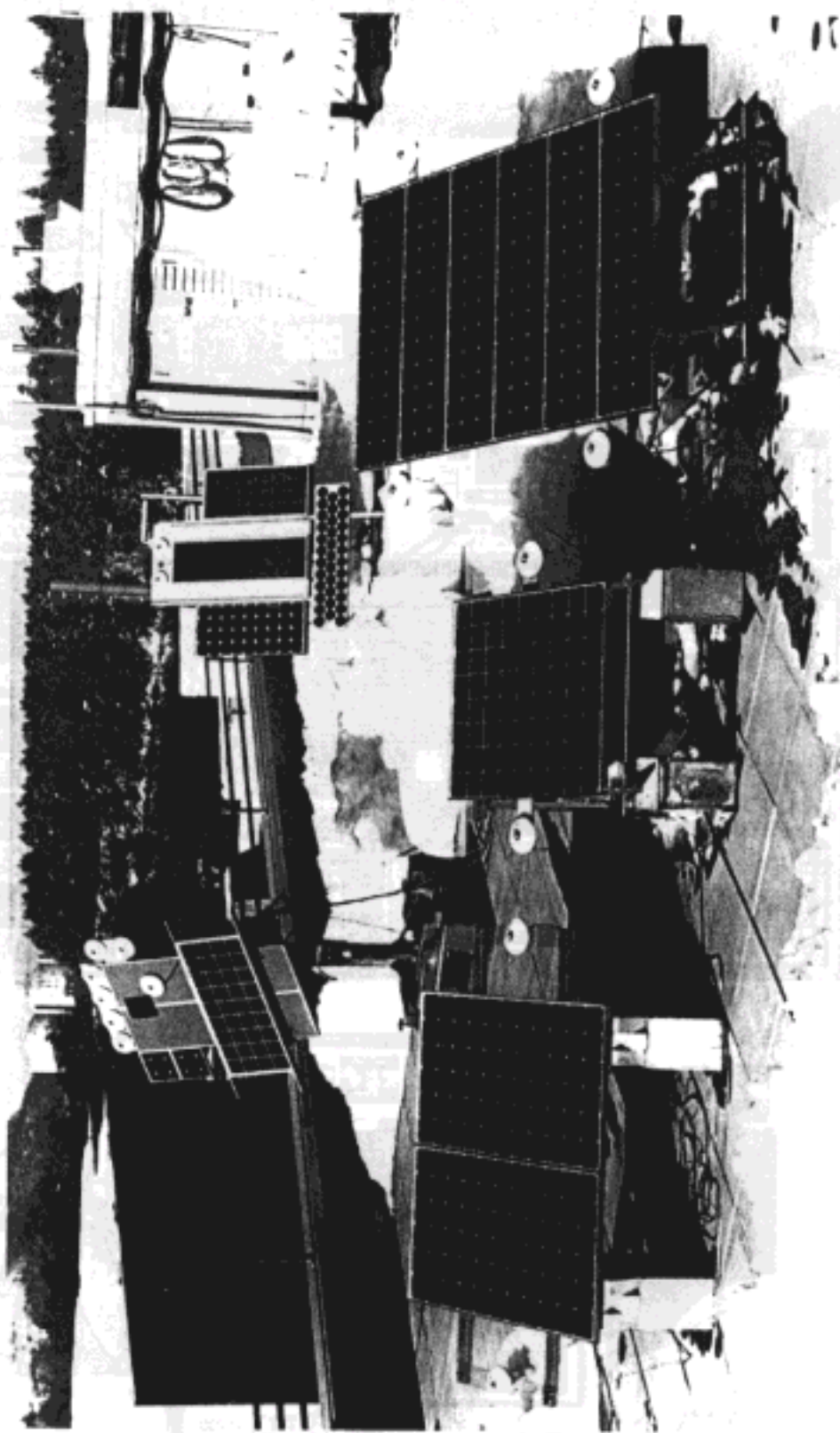
- I/V-Kennlinien- Messungen nötig, 100 bis 1000 an mehreren Messtagen

- Messzeit pro Kennlinie: 10 bis 20 s

⇒ Messaufwand hoch

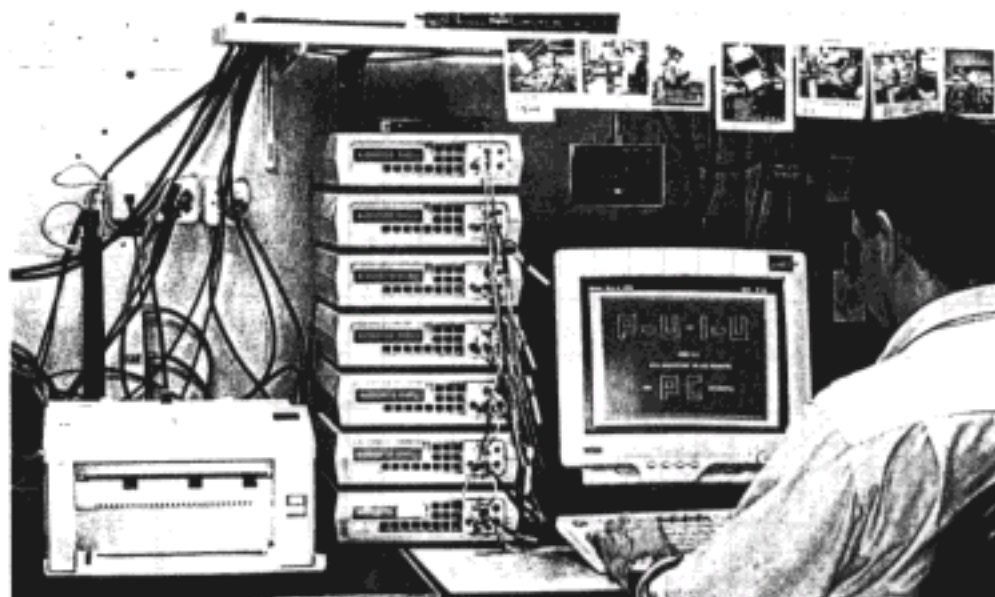
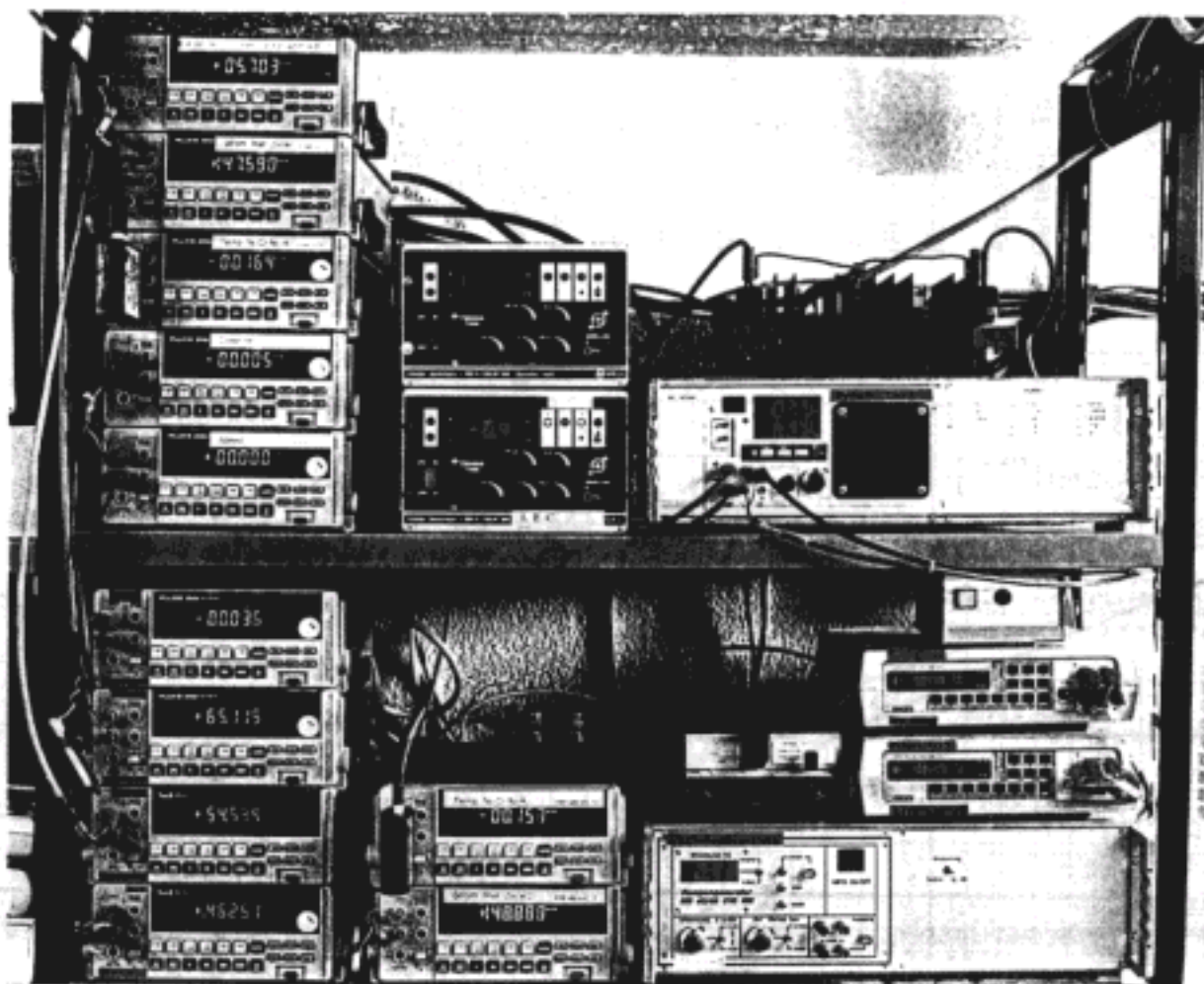
- Nutzen hoch:  
Vollständige Erfassung des Modulverhaltens  
als Voraussetzung für  $\eta$ -Modell
- Kosten: Mit Studenten und Praktikanten tragbar

# Photovoltaik-Testanlage des PSI





# Measurement System





# Error Analysis

$$\eta = IV/(AG)$$

$\eta$  Efficiency

$I$  MPP-current, A

$V$  MPP-voltage, V

$A$  Cell area, m<sup>2</sup>

$G$  Global Irradiance, Wm<sup>-2</sup>

$$\Delta\eta/\eta = \sqrt{(\Delta I/I)^2 + (\Delta V/V)^2 + (\Delta A/A)^2 + (\Delta G/G)^2}$$

$$\Delta G/G = \sqrt{(\Delta V_G/V_G)^2 + (\Sigma(\Delta s_i)^2)/(\Sigma s_i)^2}$$

$V_G$  Output voltage of series-connected pyranometers, mV

$s_i$  Sensitivity of pyranometer i, mV/(kWm<sup>-2</sup>)

## Example: Commercial 50 W module

$$\Delta V_G/V_G = 0.022 \%$$

$$\Sigma(\Delta s_i)^2 = 0.021 \text{ (mV/(kWm}^{-2}\text{))}^2$$

$$\Sigma s_i = 70.49 \text{ mV/(kWm}^{-2}\text{)}$$

$$\Rightarrow \Delta G/G = \pm 0.21 \%$$

$$\Delta A/A = 0.420 \% \quad (\Delta L/L = 0.3 \%)$$

$$\Delta V/V = 0.035 \%$$

$$\Delta I/I = 0.036 \%$$

$$\Rightarrow \Delta\eta/\eta = \pm 0.47 \%$$

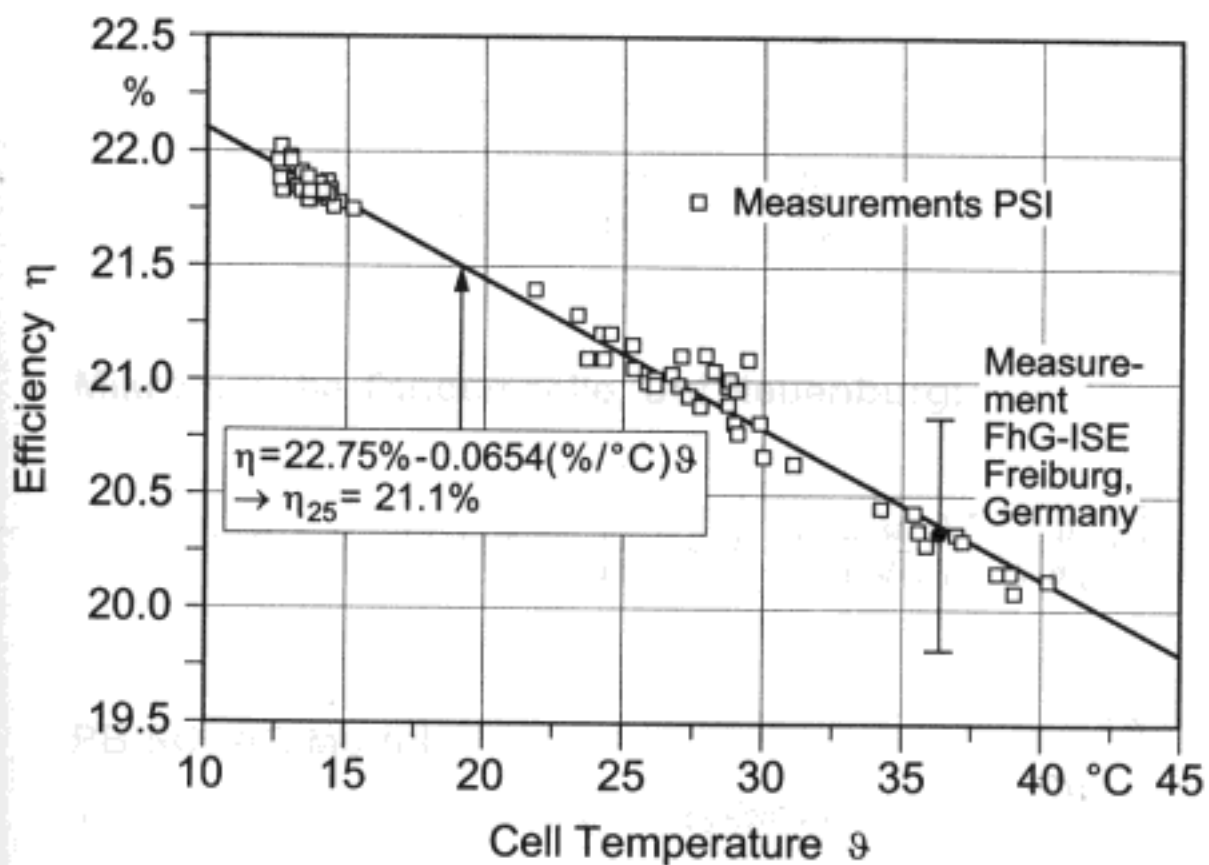
$$\text{Systematic error} \approx \pm 0.5 \%$$

$$\Rightarrow \text{Total error} \approx \pm 1.0 \%$$

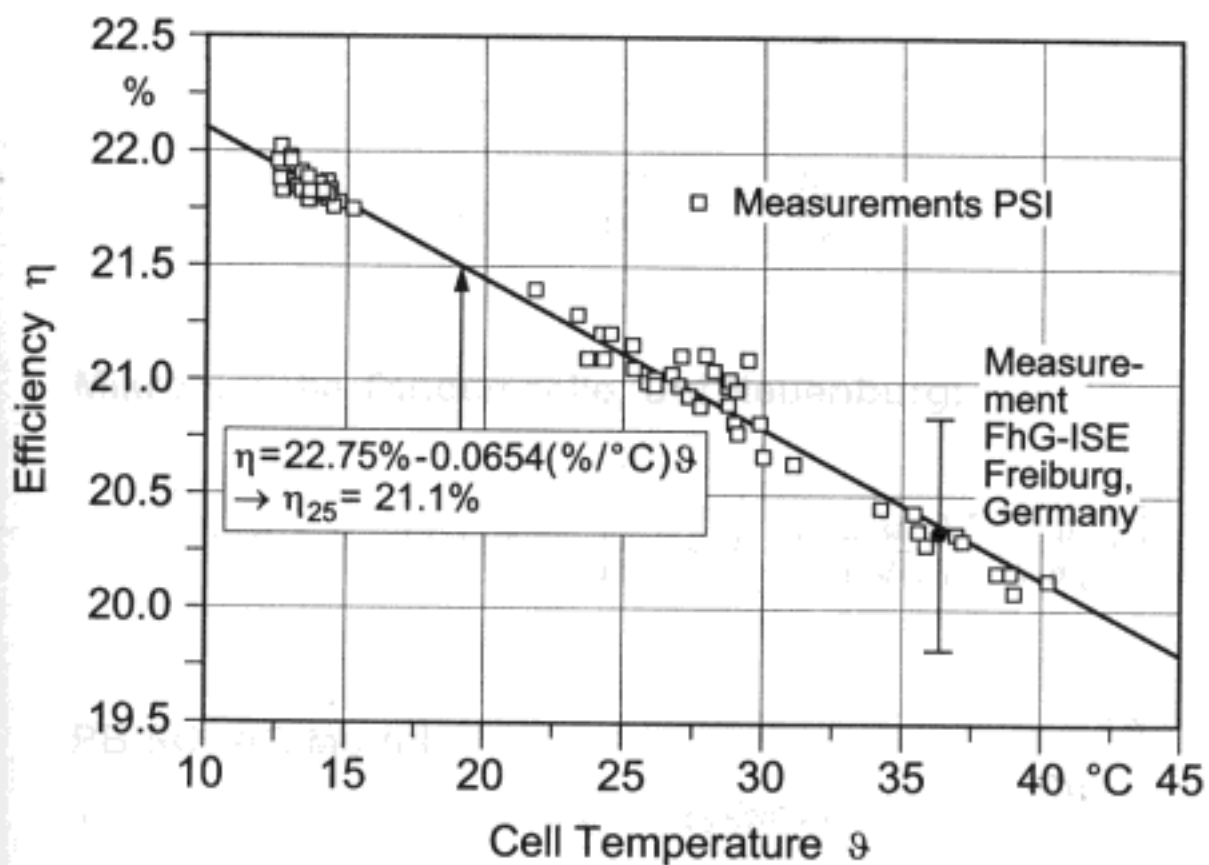
Remark:  $\Delta G/G$  and  $\Delta A/A \gg \Delta V/V$  and  $\Delta I/I$

Accuracy Measurements for Solar Cell Area is crucial

# Efficiency of PSI's Solar Cell



# Efficiency of PSI's Solar Cell



## $\eta$ -Modelle

**CIS- und CIGS-Module :** 
$$\eta = p \cdot \left[ q \cdot \frac{G}{G_0} + \left( \frac{G}{G_0} \right)^m \right] \cdot \left( 1 + r \frac{T}{T_0} + s \frac{AM}{AM_0} \right)$$

**Tripelzellen-Modul, Uni Solar:**

$$\eta = aX^e + bX^mY^n + cX^pU^q + hX^eU^rV^s + kX^eV$$

$$X = \frac{G_n}{G_{n0}} \quad Y = \frac{T}{T_0} \quad U = \frac{AM}{AM_0} \quad V = \frac{D_n}{D_{n0}}$$

**Mikromorphe Tandemzelle, Uni Neuenburg:**

$$\eta = s \cdot \left( \frac{G_n}{G_{n0}} \right)^n \cdot \left[ 1 + B \cdot \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_0} \right) + F \cdot \left( \frac{AM}{AM_0} \right)^m \cdot \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_0} \right) \right]$$

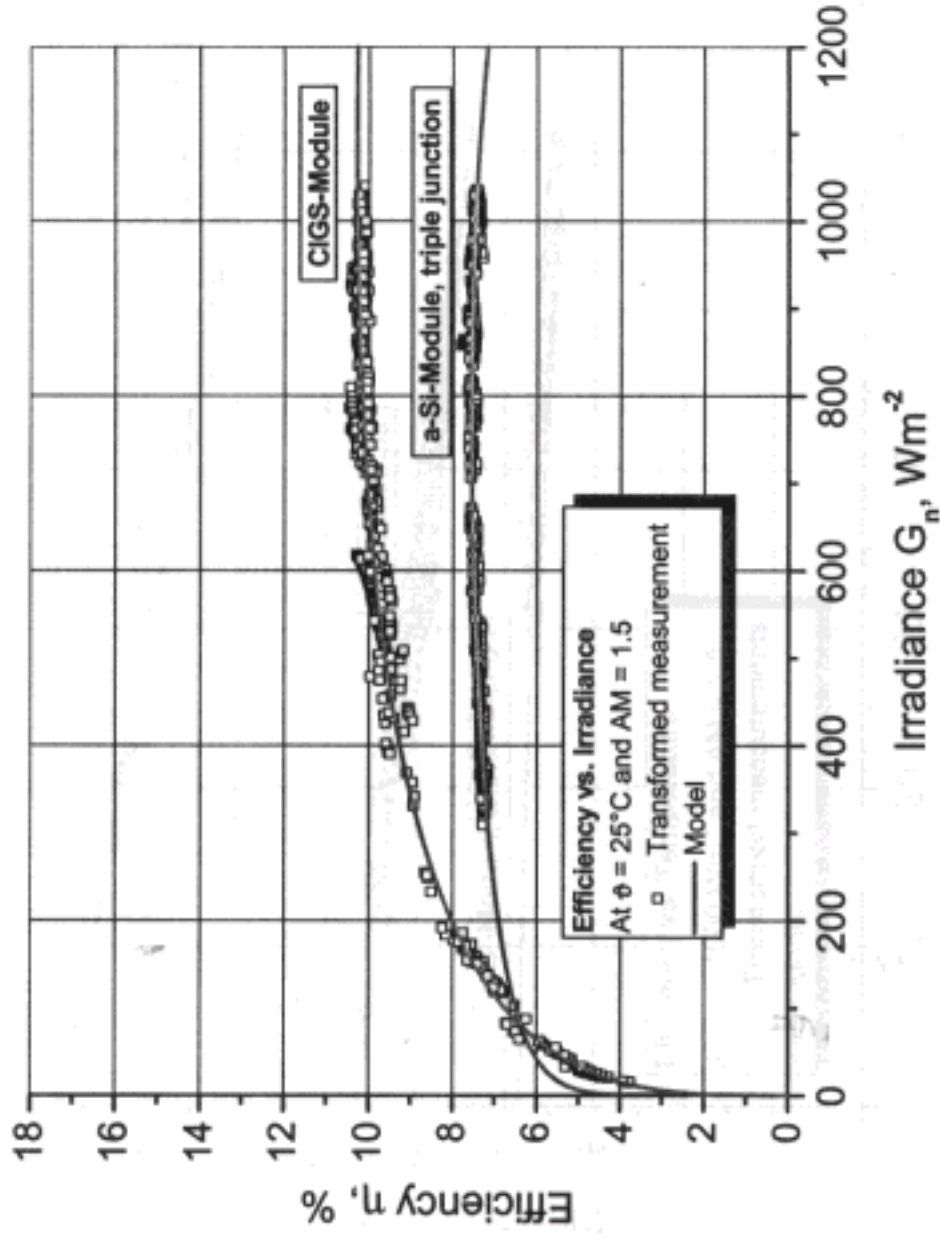
**PB SOLAR Modul:**

$$\eta = -0.5613 \cdot (G/G_0) + 10.6579 \cdot (G/G_0)^{1/2} - 45.5265 \cdot (G/G_0)^{1/3} + 65.5220 \cdot (G/G_0)^{1/4} - 29.9336 \cdot (G/G_0)^{1/5} - 0.01736 \cdot (\vartheta/\vartheta_0 - 1)$$

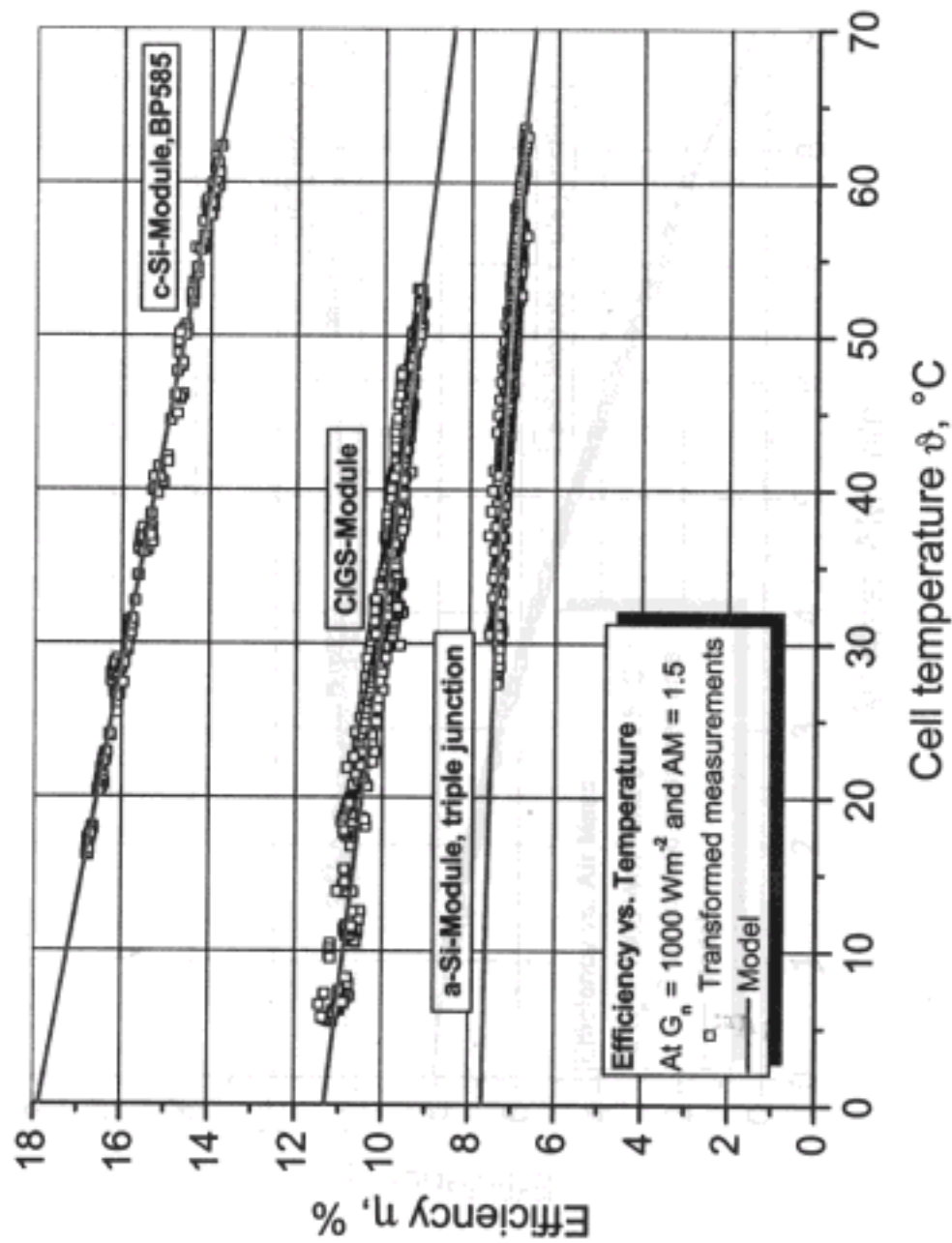
**AstroPower Modul:**

$$\eta = 659.3957 \cdot (G/G_0)^{1/2} - 4406.8985 \cdot (G/G_0)^{1/3} + 7794.7337 \cdot (G/G_0)^{1/4} - 047.1102 \cdot (G/G_0)^{1/5} - 0.0161 \cdot (\vartheta/\vartheta_0 - 1) + 0.00606 \cdot (AM/AM_0)$$

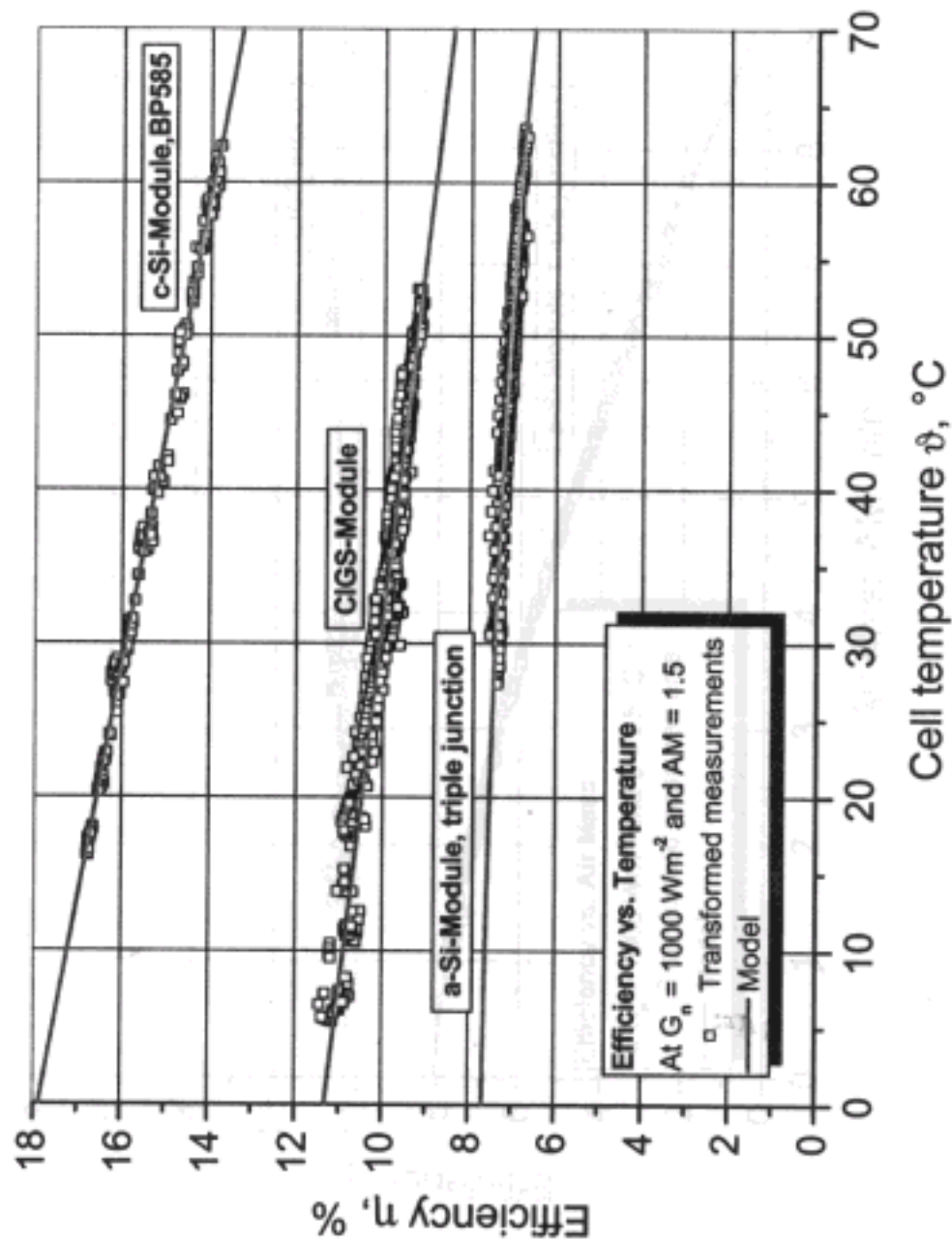
## Part Load Behaviour of Different Modules



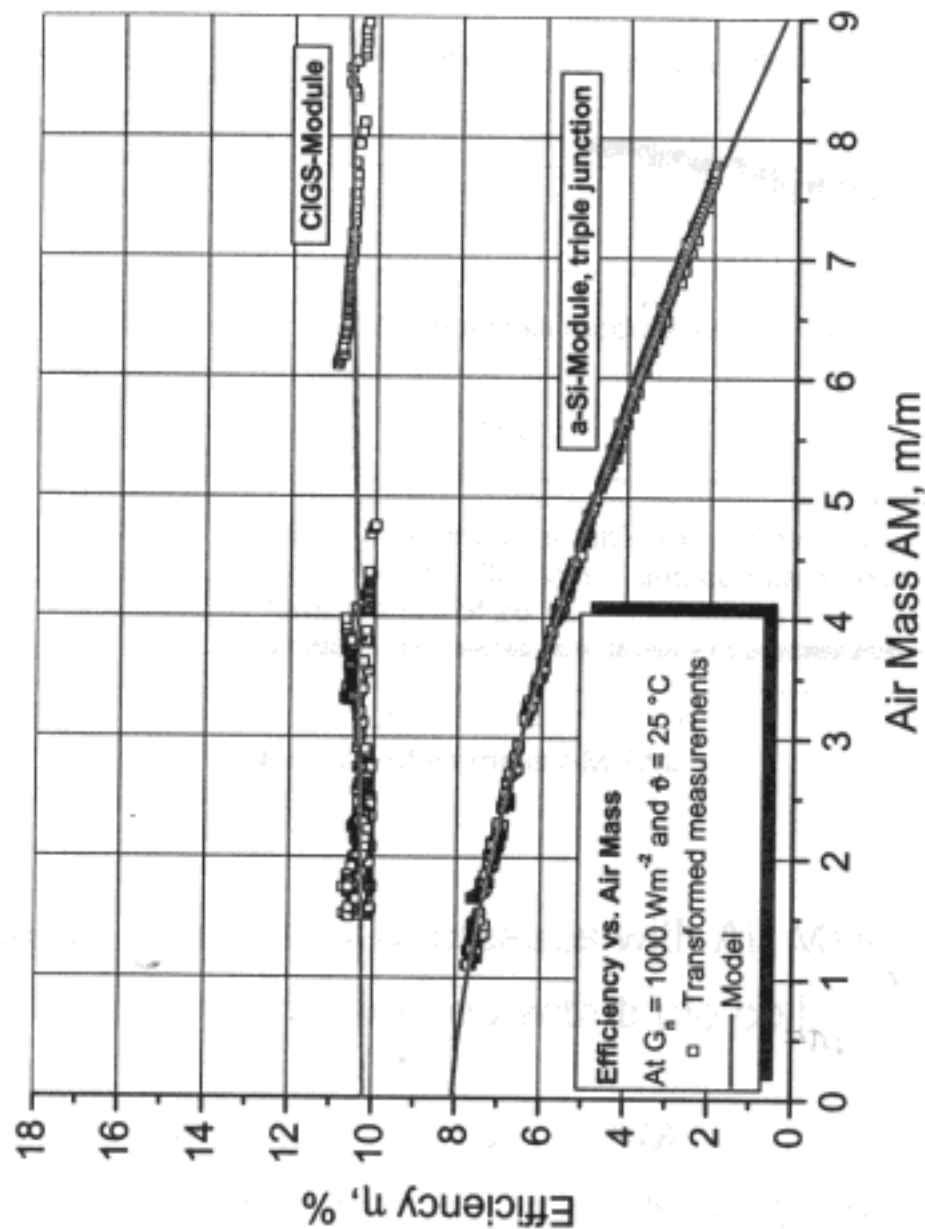
## Temperature Behaviour of Different Modules



## Temperature Behaviour of Different Modules

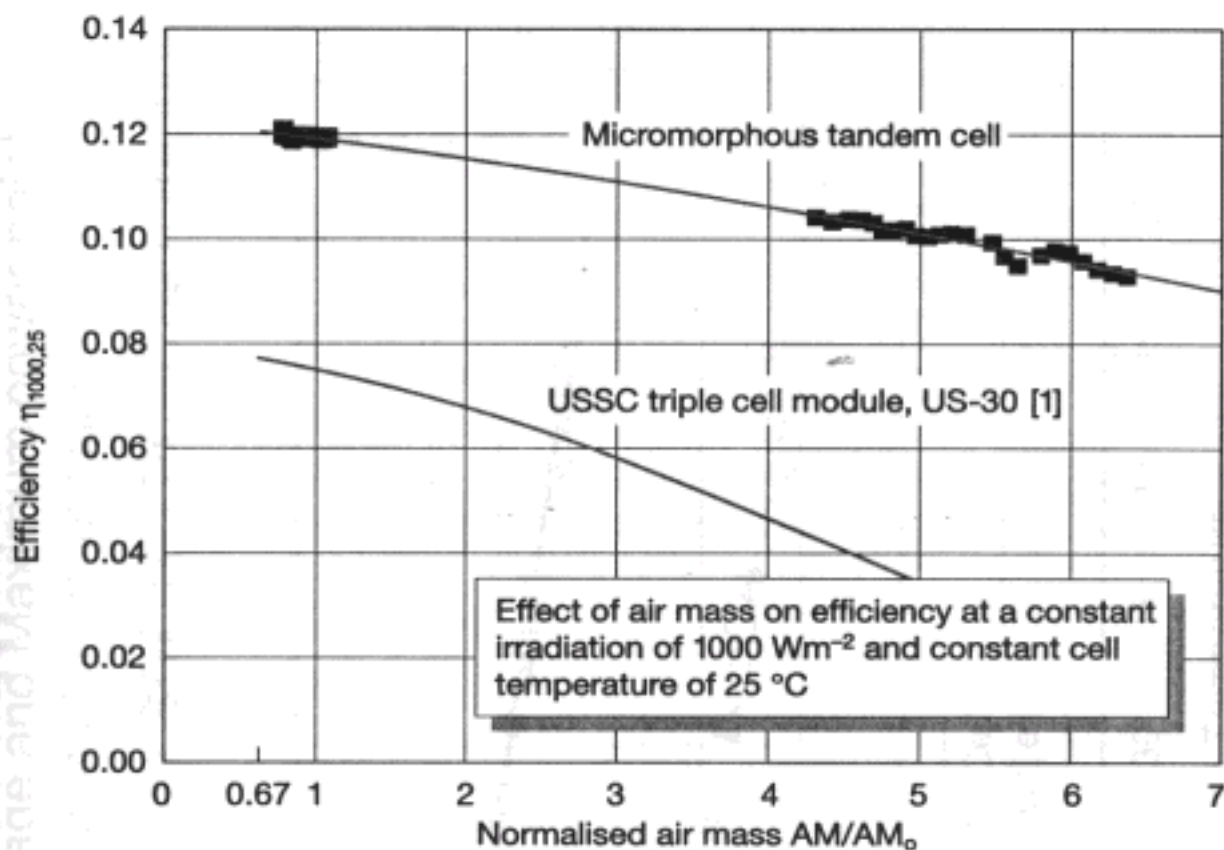


## Air Mass Behaviour of Different Modules





## Comparison of Tandem and Triple Cell



- Efficiency remarkably decreases with Air Mass
- Decrease more pronounced with triple cell

Example:  $AM = 1.5 \Rightarrow AM = 6$

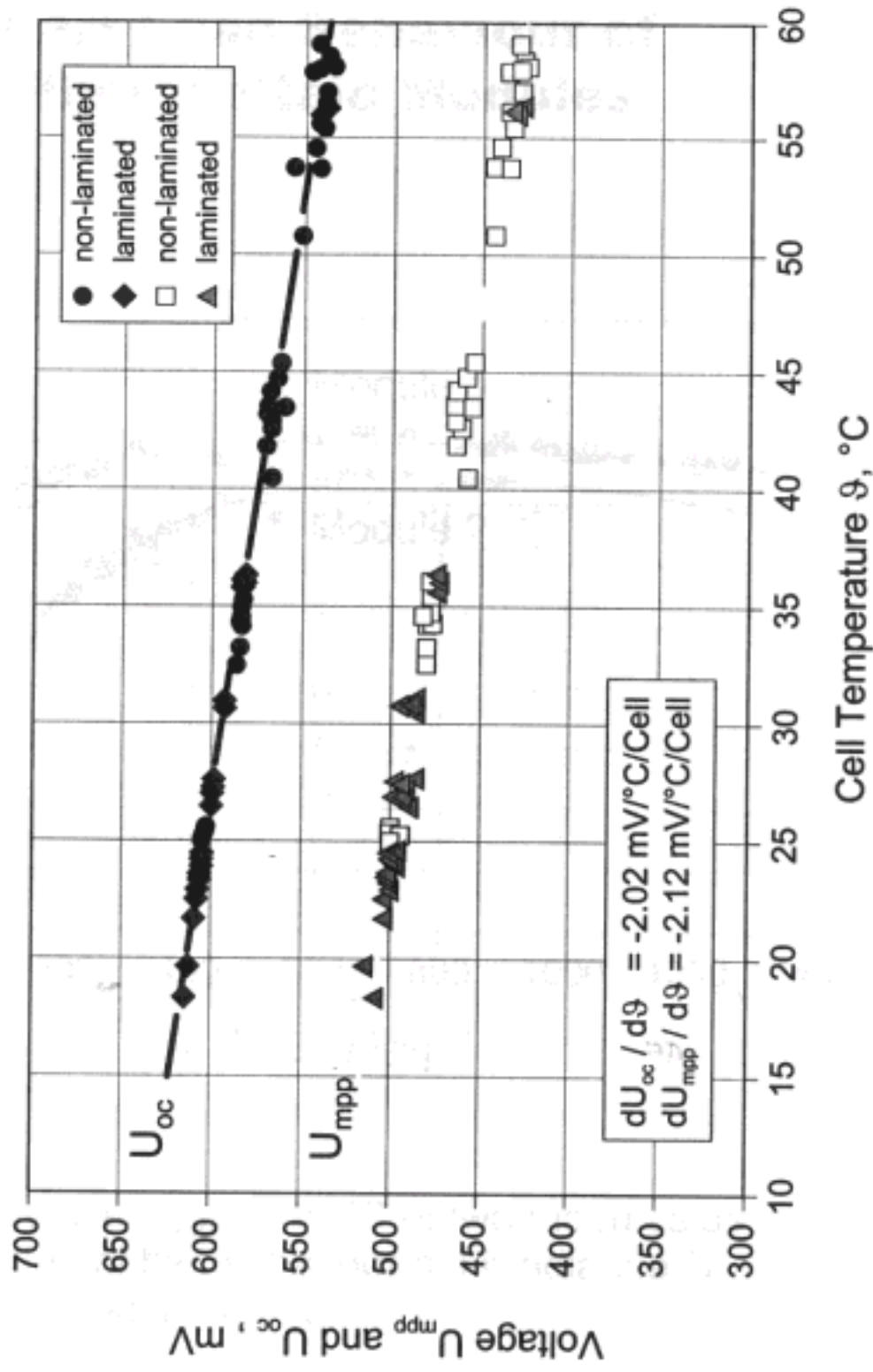
|             |                           |
|-------------|---------------------------|
| Tandem cell | $\Delta\eta/\eta = -12\%$ |
| Triple cell | $\Delta\eta/\eta = -39\%$ |

$\Rightarrow$  Triple cell suitable for "low Air Mass sites"

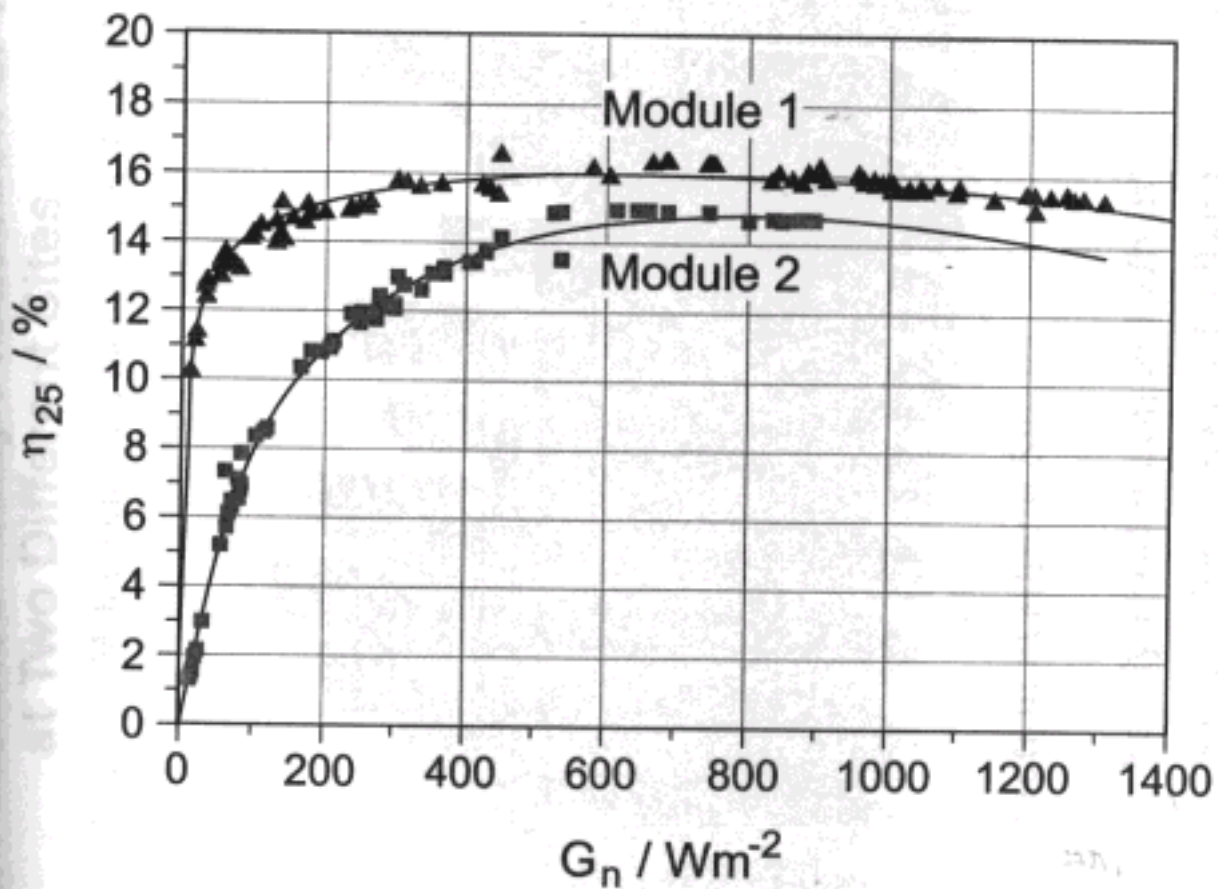
[1] Durisch, W. et al., RENEWABLE ENERGY 1(2000), 779 - 788

# Open Circuit Voltage and Maximum power-point Voltage of a Monocrystalline

## Silicon Solar Cell from SOLARTEC, Czech Republic



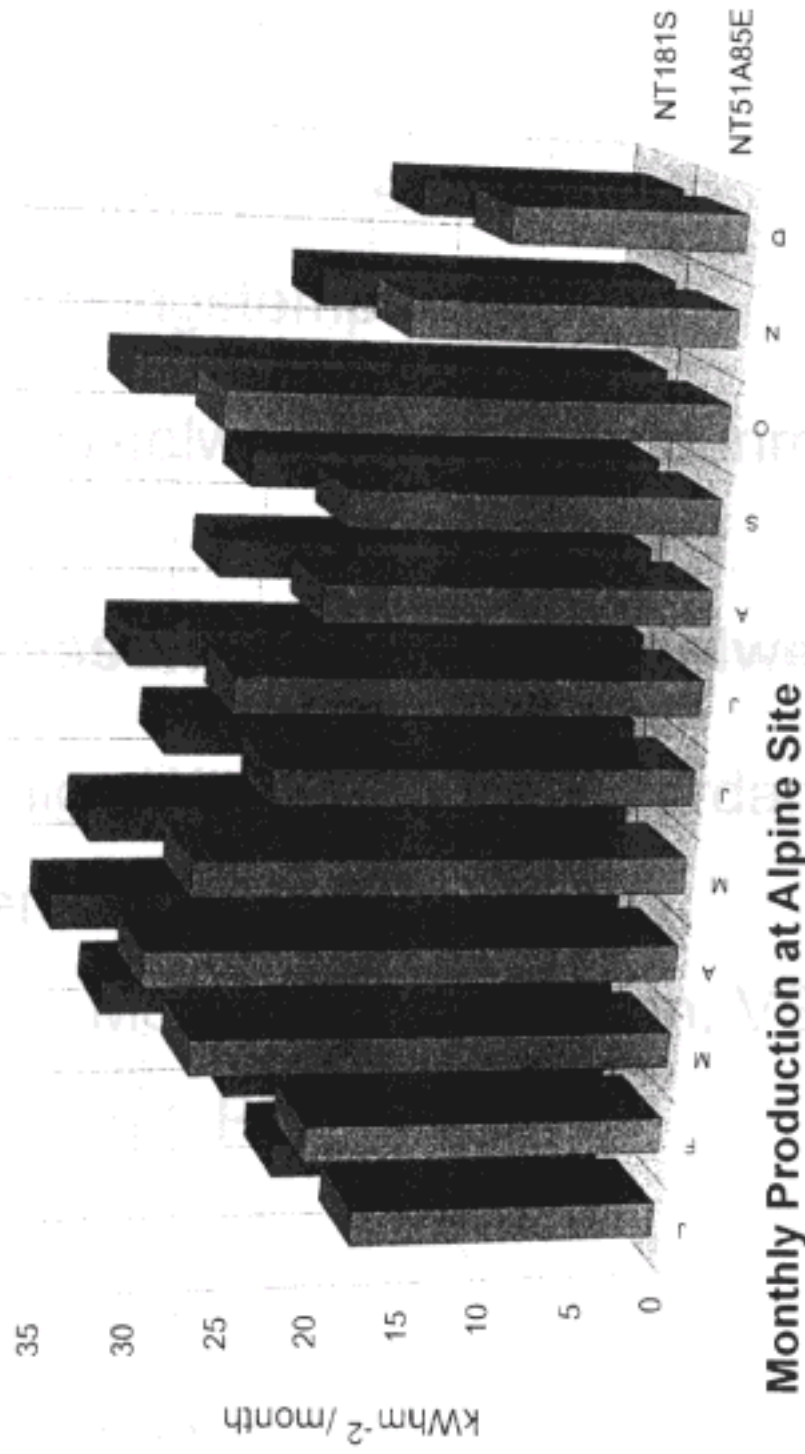
## Part Load Behaviour of Photovoltaic Modules



Efficiencies  $\eta_{25}$  at 25°C of two modules as a function of the global normal irradiance  $G_n$  incident on the modules.

# Comparison of Predicted Yearly Production of Two Modules at Two Different Sites

Basis: Measured Meteo Data and Model  $\eta = \eta (G, \theta, AM)$



Yearly Production in kWh/m²

| Module   | Swiss Alps | Swiss Midland | Alps |
|----------|------------|---------------|------|
| NT181S   | 301        | 174           | +73% |
| NT51A85E | 269        | 156           | +72% |

# Klimadaten

- Einstrahlung in Zellenebene
- Umgebungstemperatur

5-Min.-Mittelwerte, evtl. Stundenmittel

## PSI Messungen, 5-Min.-Mittelwerte

- Sonnige Wüste, Aquaba, Jordanien
- Alpen: Laj Alv, GR  
Morgins und Jeizinen, VS
- Mittelland: PSI, Villigen

## Meteonorm

In Abklärung

## **Zielpublikum**

- Modulhersteller
- Anlageplaner
- Forschungsinstitute

## **Aufträge ausgeführt für**

Sharp  
Kyocera  
Siemens Solar  
BP Solar  
Astropower  
Bekaert  
Grätzel, Shah  
ZSW, Stuttgart  
Temtec, Solution, Fabrisolar  
AS Engineering, Hollinger Solar,...

# Ausblick

- $\eta$ -Modelle für weitere Module
- Weitere Ertragsrechnungen
- Praxistaugliche Anwenderversion ?



## Literatur

- [1] W. Durisch, King-hang Lam and Josie Close: *Behaviour of a Copper Indium Diselenide Module under Real Operating Conditions*. To be presented at the WREC VII, 29 June – 5 July 2002, Cologne, Germany.
- [2] W. Durisch, King-hang Lam and Josie Close: *Behaviour of a Copper Indium Gallium Diselenide Module under Real Operating Conditions*. To be presented at the WREC VII, 29 June – 5 July 2002, Cologne, Germany.
- [3] W. Durisch, O. Struss and K. Robert: *Efficiency of Selected Photovoltaic Modules under Varying Climatic Conditions*. Renewable Energy, First edition 2000, Elsevier, 779-788 (2000).
- [4] Durisch, W., Urban, J. and Smestad, G: *Characterisation of Solar Cells and Modules under Actual Operating Conditions*. Proceedings of the World Renewable Energy Congress, June 1996, Denver, Vol. 1, p.359, Pergamon, Oxford, 1996.
- [5] W. Durisch, D. Tille, A. Würz\*, W. Plapp: *Characterisation of Photovoltaic Generators* Applied Energy 65, 273-284 (2000).
- [6] W. Durisch, O. Struss, K. Robert: *Efficiency of Selected Photovoltaic Modules under Varying Climatic Conditions*. Renewable Energy, First edition 2000, Elsevier, 779-788 (2000).
- [7] J.-C. Mayor, W. Durisch: *Application of a Generalized Model for the Electrical Characterisation of a Commercial Solar Cell*. Renewable Energy, First Edition 2000, Elsevier, 2081-2084 (2000).



## **4. Jahreswirkungsgrad, Erfahrungen mit einem Prognoseverfahren RRC, Hermann Laukamp, FH-ISE Freiburg**

# Erfahrungen mit dem Jahreswirkungsgradkonzept (RRC)

Hermann Laukamp

Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE

Workshop Modulertrag  
Zürich, 22.3.2002

## Jahreswirkungsgradkonzept (RRC)

$$\eta = \eta(G, T, E_{\text{rel}}, B_{\text{rel}})$$

G : Globale Bestrahlungsstärke  
T : Modultemperatur  
E<sub>rel</sub> : Spektrale Verteilung  
B<sub>rel</sub> : Relative Bestrahlungsichte

Vergleich unter **STC** :

G = 1000 W/m<sup>2</sup>  
T = 25° C  
E<sub>rel</sub> = AM 1.5  
B<sub>rel</sub> = senkrechter  
Strahlungseinfall

$\eta_{\text{STC}}$

Freiland-Wirkungsgrad :

**Funktion der meteorol.  
Betriebsbed. , der Bauart und  
der Aufständigung.**

$\text{JWG}$

**JWG - Konzept :**

**Schätzung des JWG auf  
der Basis repräsentativer  
Wetterdatensätze.**

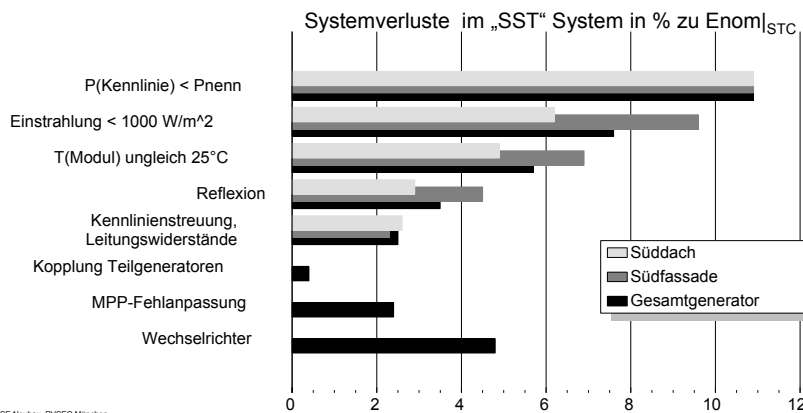
$\eta_{\text{RRC}}$

## Zielsetzung

- Wissenschaftliches Verstehen der Moduleigenschaften
- Dienstleistung des Fraunhofer ISE
- Identifizieren von Optimierungspotential beim Modulbau
- Technologiebewertung
  - Vergleich von Labormustern neuer Modultechnologien
- Marketing Argumente
  - Vergleich neuer Dünnschicht-Module mit mono-Si

## Motivation

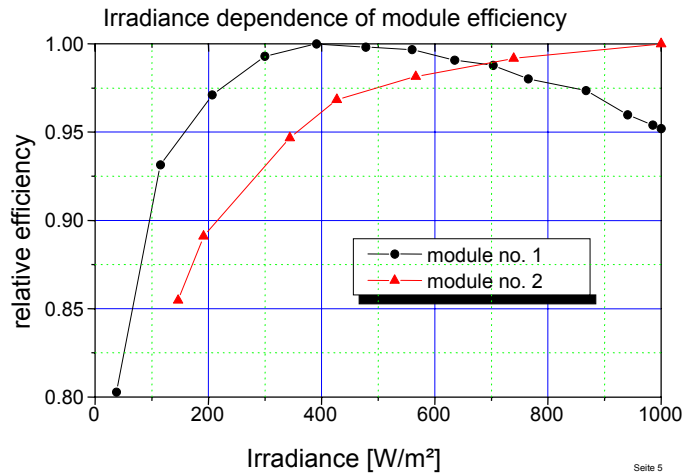
## Verstehen von Verlustmechanismen



## Verfahren

### einstrahlungsabhängiger Wirkungsgrad

zwei kommerzielle Module mit poly-Si unterscheiden sich deutlich

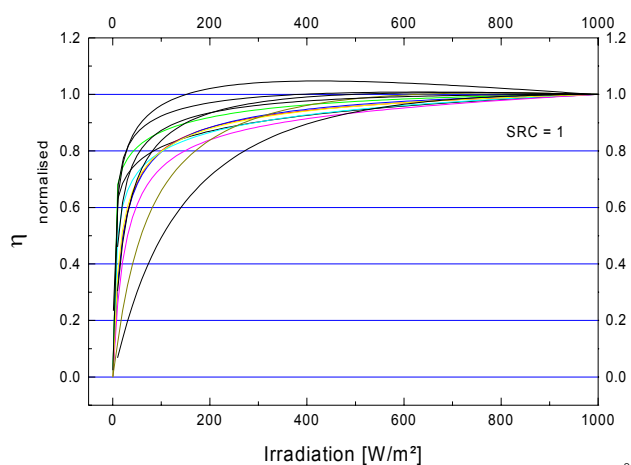


## Verfahren

### einstrahlungsabhängiger Wirkungsgrad

Der „Teillast“-Wirkungsgrad bestimmt den Jahresenergieertrag mit

Daten von Indoor- und Outdoor Messungen

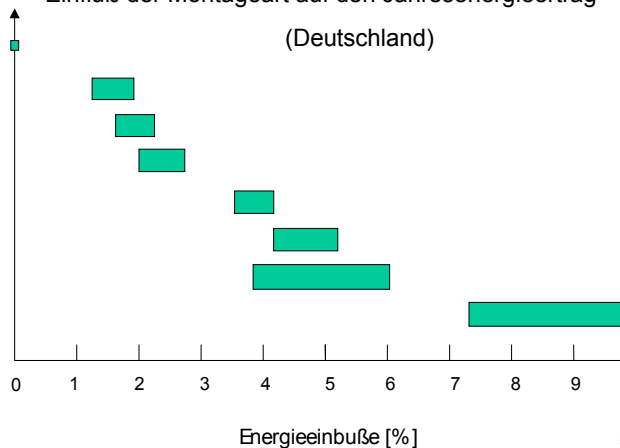


## Jahreswirkungsgradkonzept (RRC)

### Verfahren

Freistehendes Modul  
Dach, optimale HL\*  
Dach, gute HL  
Dach, mäßige HL  
Fassade, gute HL  
Fassade, schlechte HL  
Dach, keine HL  
Fassade, keine HL

Einfluß der Montageart auf den Jahresenergieertrag  
(Deutschland)



\* HL = Hinterlüftung

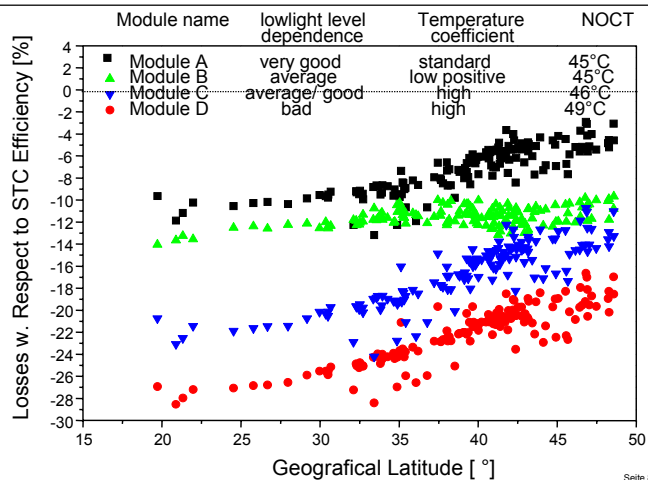
10/01 - ISE Neubau, PVSEC München

Seite 7

## Jahreswirkungsgradkonzept (RRC)

### Anwendung

Vergleich der Leistung von vier Modultypen in einer Südfassade

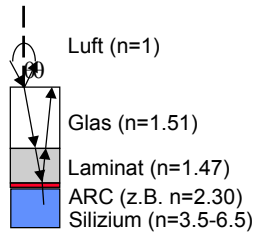


10/01 - ISE Neubau, PVSEC München

Seite 8

## Verfahren

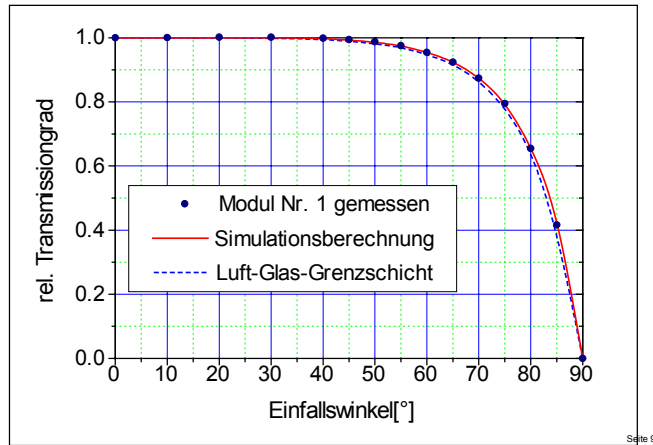
### winkelabhängige Reflexion



Kurvenverlauf ähnlich einer Luft-Glas-Grenzschicht

Prinzipieller Verlauf für Module mit glattem Glas

10/01 - ISE Neubau, PVSEC München



## RRC Rechnung - Möglichkeiten

### Berechnung des jährlichen Energieertrags eines PV Moduls in MPP Betrieb

- Auswahl von Wetterdaten aus Testreferenzjahren von über 300 Standorten weltweit möglich
- wahlweise für freie Aufständigung, dachferne und dachnahe Aufständigung oder Integration in die Gebäudehülle
- Modulneigung und Ausrichtung nach Wunsch, Standard: Ausrichtung nach Süden, Breitengradneigung oder Fassade (90°)
- Angabe des Energieertrages, Jahreswirkungsgrades oder Performance Ratio, auf Wunsch auch für saisonale Wetterdaten (Sommer, Winter, Dezember o.ä.)
- Betrieb an Batterie

10/01 - ISE Neubau, PVSEC München

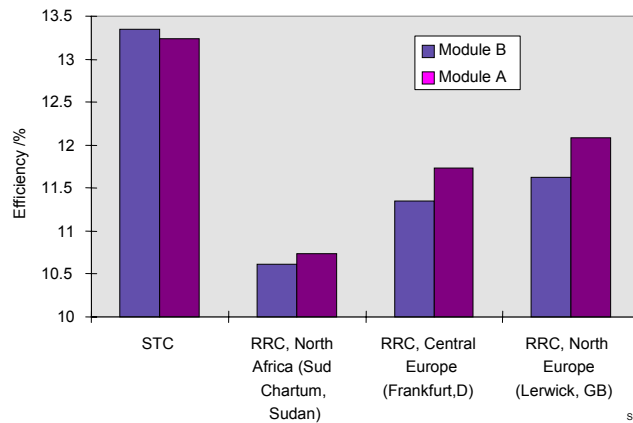
Seite 10

## RRC Rechnung

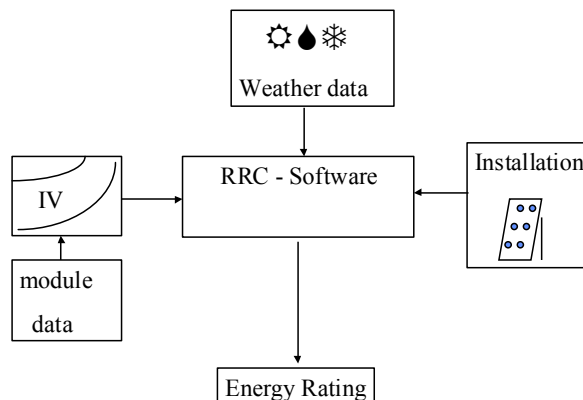
### Berechnung des jährlichen Energieertrags eines PV Moduls in MPP Betrieb

Nomineller Wirkungsgrad  $\eta_{STC}$  von Modulen mit Si-Zellen im Vergleich zu ihrem Freiland-Wirkungsgrad  $\eta_{RRC}$  an drei europäischen Standorten

The "Unfair" STC Efficiency - Indoor (STC) vs. Outdoor (RRC)



## erforderliche Eingangsdaten



## erforderliche Eingangsdaten Klima

### erforderlich

- stündliche Wetterdaten, z.B. Testreferenzjahre
  - $G_{\text{hor}}$
  - $I_{\text{norm}}$
  - $G_{\text{diff, hor}}$
  - $T_{\text{amb}}$
  - $v_{\text{wind}}$

### derzeit verfügbar

- deutsche, europäische, US und afrikanische Testreferenzjahre, ca. 300 Standorte
- Wettergenerator von Monatsmittelwerten auf Stundenwerte vorhanden

## erforderliche Moduldaten/Messungen

### Einstrahlungsabhängigkeit des Wirkungsgrads $\eta(G)$

- Messung der Einstrahlungsabhängigkeit bei 10 verschiedenen Bestrahlungsstärken im Bereich 100 bis 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Extraktion der notwendigen Parameter für die Simulation aus den Daten

### Temperaturkoeffizient

- Messung des Temperaturkoeffizienten der Leistung im Bereich von 10 °C bis 60 °C an einer einzelnen Zelle oder Referenzmodul, (5 Meßpunkte).

### NOCT des Moduls

- Freilandmessung der nominalen Betriebstemperatur (NOCT) nach IEC Norm 61215



## erforderliche Moduldaten/Messungen

### Spektrale Empfindlichkeit

- Messung der spektralen Empfindlichkeit an einer Zelle oder Referenzmodul

### Winkelabhängigkeit der Leistung

- Messung des winkelabhängigen Kurzschlußstroms für 9 Einfallswinkel im Bereich von 0° bis 90° an einem Referenzmodul

## Handhabung/ Verfügbarkeit

### Verfügbarkeit

- Dienstleistung des Fraunhofer ISE,  
Software nicht kommerziell verfügbar

### Software

- Software einfach bedienbar, leicht portierbar,  
Rechenzeit ca. 0,5 h pro Parametersatz

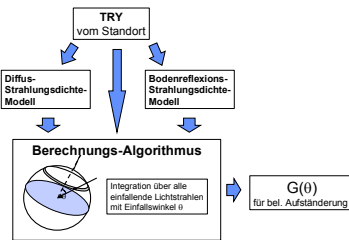
### Lieferzeit/Kosten

- Lieferzeit
  - nur Rechnen: 1 Woche
  - Vermessung und Rechnung: 2-4 Wochen
- Kosten
  - nur Rechnen 1250 E
  - inkl. aller Messungen 4700 €

## Verfahren

### Rechnungsablauf

mit stündlichen Werten



10/01 - ISE Neubau, PVSEC München

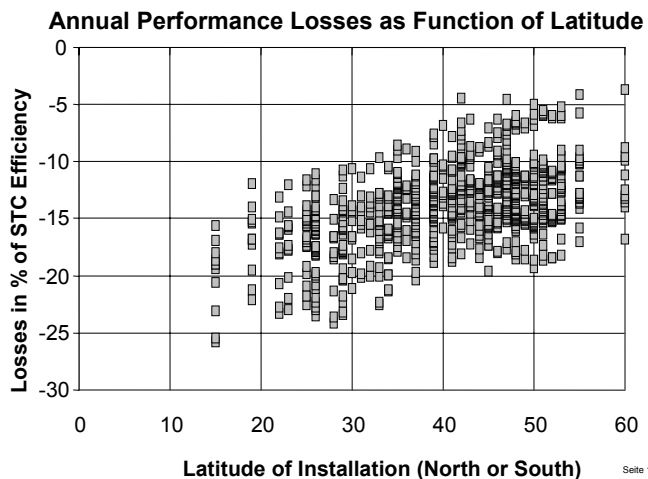
Seite 17

## Anwendung

Vergleich der Jahresenergieerzeugung von 15 Modultypen an 80 Standorten im Vergleich mit STC

(ohne Spektraleffekt)

Bandbreite ca. 12 - 15 %



10/01 - ISE Neubau, PVSEC München

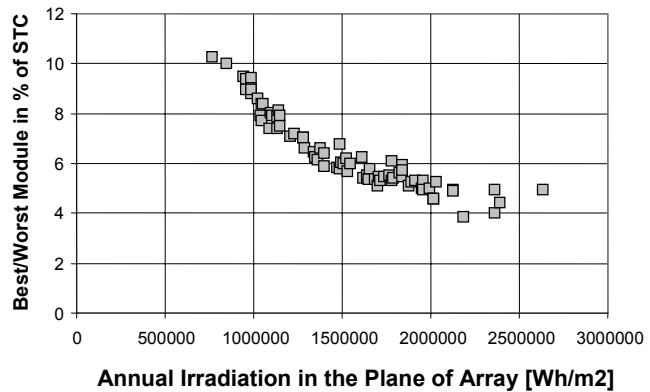
Seite 18

## Anwendung

Vergleich der  
Jahresenergieerzeugung  
von 15 Modultypen an 80  
Standorten

(ohne Spektraleffekt)

Difference in Performance Ratio between

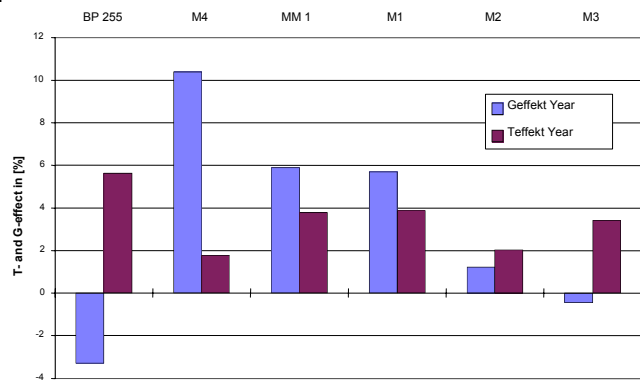


## Anwendung

Vergleich Modultechnologien

z.B. Si- mono und CdTe

Lerwick (GB), cold site



## Zusammenfassung

**Grösse der Teileffekte für  
c-Si in Mitteleuropa im  
Jahresmittel  
bezogen auf die nominelle  
Energie bei STC,  $E_{nom}$**

- Temperatureffekt 2 ... 8 %  
je nach Einbau und Windverhältnissen
- Einstrahlungseffekt 3 ... 8 %  
je nach Zelltyp und Anstellwinkel
- Winkeleffekt 2 ... 4 %  
je nach Anstellwinkel
- Spektraleffekt 1 ... 2 %
- Ertragsunterschied von Modulen  
gegenüber  $E_{nom}$  8 - 20 %

## Eingangsdaten Modul

Zellendaten

- $\eta = f(T)|_{1 \text{ Sonne}}$   
3-8 Messpunkte, 0 °C ... 70 °C, linear oder parabelförmig  
gefitted
- $\eta = f(G)|_{25 \text{ °C}}$   
6-10 Messpunkte, 50 W/m<sup>2</sup> ... 1000 W/m<sup>2</sup>, 2-Diodenmodell,  
gefitted
- spektrale Empfindlichkeit (EQE)

Moduldaten

- $I_k = f(\Theta)|_{1 \text{ Sonne, } 25 \text{ °C}}$   
0 ... 90 °, 10 Messpunkte, Standard vorhanden
- NOCT

**5. Verfahren mit Teillastwirkungsgraden,  
derzeit im JRC Ispra in Entwicklung,  
Peter Toggweiler, Enecolo AG  
Mönchaltorf**

**Dieses Referat wurde in Vertretung von Heinz  
Ossenbrink JRC Ispra, basierend auf einem  
Paper von Tony Sample, JRC Ispra, gehalten**

# OBTAINING MODULE ENERGY RATING FROM STANDARD LABORATORY MEASUREMENTS

David Anderson<sup>1 (currently 2)</sup>, Tony Sample<sup>1</sup>, Ewan Dunlop<sup>1</sup>

Contact: Email. [danderson@inwind.it](mailto:danderson@inwind.it) Tel. +39-0332-773760

<sup>1</sup>European Commission, Joint Research Centre, Renewable Energies Unit, Via Fermi 1, Ispra (VA) 21020, Italy

<sup>2</sup>University of Strathclyde, Dept. Physics & Applied Physics, Glasgow, G4 0NP, Scotland

**ABSTRACT:** An energy rating method is proposed and tested on performance data measured at ESTI. The limitations of the method are discussed, and a statistical analysis of the maximum possible accuracy is presented.

**Keywords:** Performance - 1: Modelling - 2: Monitoring - 3

## 1. INTRODUCTION

The performance of a photovoltaic module at Standard Test Conditions (STC) is a useful tool for comparing the peak performance of different module types. It does not, however, give enough information to accurately predict how much energy a module will deliver in the field when subjected to a wide range of operating conditions, as was shown clearly by [1]. There are several proposals for an energy rating for PV modules which attempt to account for the less than ideal operating conditions that one encounters in the field [1-3]. In this paper, we develop the approach of [1], with the emphasis on simplicity and practicality. The accuracy of any energy rating is fundamentally limited by a lack of knowledge of the input energy at a specific site. We present a series of method that incorporates existing standard measurements to determine the energy output as a function of global in-plane irradiance and ambient temperature. The method is tested on outdoor data, and the corresponding accuracy is indicated. Finally, we look at the features of certain novel technologies that may present problems for any energy rating method, and how these difficulties may be overcome.

## 2. ENERGY RATING OF POLY-SI

### Requirements:

- ✍ Indoor Performance Measurement [4]
- ✍ Temperature coefficients determination [5]
- ✍ Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) [6]

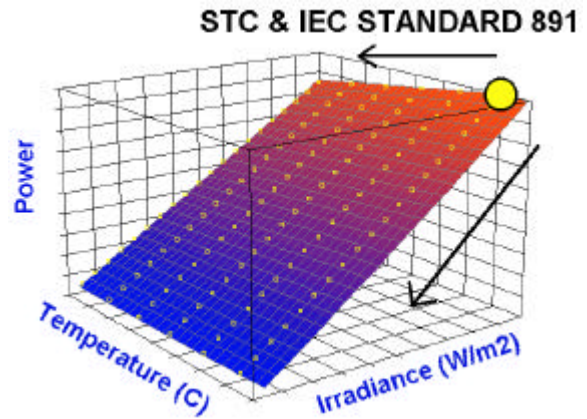
### Method:

We use the I-V curve measured at STC and the temperature coefficients of current and voltage to construct a performance surface over a suitable range of temperatures and irradiances, e.g. 25-60 °C and 100-1000 W/m<sup>2</sup>, according to [5]. This step is illustrated in Fig. 1. Using the data obtained from the above procedure, we fit the following equations using data analysis software such as Origin [7] or TableCurve3D [8]:

$$I_{SC} = a_1 + a_2.G + a_3.T \quad (1)$$

$$V_{OC} = b_1 + (b_2 + b_3.T) \cdot \ln(G) - b_4.T \quad (2)$$

$$FF = c_1 - (c_2.G + c_3) / \ln(G) - T \cdot (c_4.G + c_5) \quad (3)$$



**Fig. 1** Determination of module performance over a wide range of conditions using the I-V curve measured at STC and the translation equations in IEC-891.

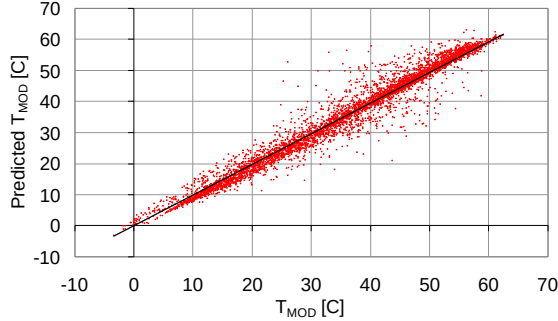
Eq. (3) for fill factor is derived in another publication by the author [9]. An essential feature of the energy rating procedure is that ambient temperature is used as an input parameter, and not the module temperature. The motivation for this is that generally there exists some sort of record of the ambient temperature for most installation sites around the globe, hence site-specific temperature data is readily available. Since the difference between the ambient and module temperature is proportional to irradiance, we can estimate the module temperature using the following equation:

$$T_{MOD} = \frac{NOCT - 20}{800} G + T_{AMB} + 2 \quad (4)$$

The extra 2°C appears in the above equation because when  $(T_{MOD} - T_{AMB})$  is extrapolated to zero irradiance we find that  $T_{MOD}$  is about 2°C colder than  $T_{AMB}$ . In order to minimise the error inherent in estimating the module temperature, it is necessary to obtain an accurate value of NOCT (ideally with a standard error of less than 1°C). From our experience of outdoor measurement, this degree of accuracy requires both a very clear day ( $K_T > 70\%$ ) and a low daily average windspeed ( $\overline{W_S} > 2.0 \text{ mS}^{-1}$ ). Even if the data filtering of  $W_S$  suggested in [6] is applied, windy conditions will still limit the accuracy of the NOCT value.

**Example:** The NOCT of a poly-Si module was measured outdoors at ESTI on 5 Jul 2000 to be  $46.2 \pm 0.7$  °C.  $T_{MOD}$  was then calculated for all the outdoor data using (4) for

the period Feb to Oct 2000, and the results are shown in Fig. 2. The residuals have a standard deviation of 2.9 °C which, as we will see later, does not cause a significant loss of accuracy in the estimation of energy production.

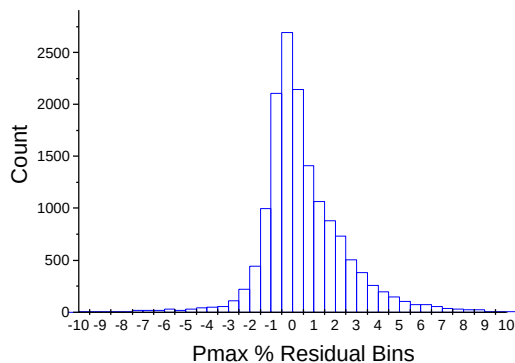


**Fig. 2** Predicting module temperature using NOCT and ambient temperature as described by Eq. (4).

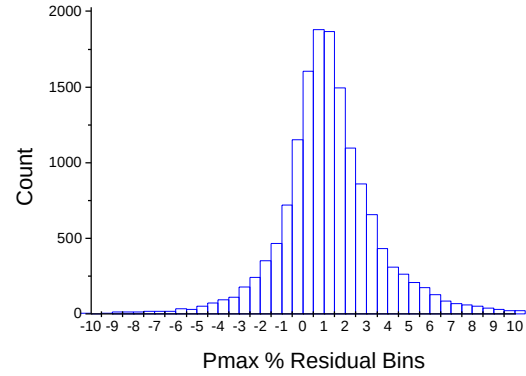
Substituting (4) into (1), (2), and (3) enables us to determine  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , and  $FF$  for any value of irradiance and ambient temperature. The instantaneous power output at a particular set of conditions is given by the product of these quantities:

$$P_{MAX} = FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC} \quad (5)$$

We are now ready to apply (5) for a given input profile of irradiance,  $G$ , and ambient temperature,  $T_{AMB}$ . Obviously the accuracy of the energy rating depends on how accurately this input profile matches the conditions under which the module will operate. Using the extensive environmental and performance data measured outdoors at ESTI, we can de-couple the error due to the rating method and the error due to the inaccuracy of the input profile. Fig. 3 shows the residuals of  $P_{MAX}$  obtained using irradiance and  $T_{MOD}$  as inputs, and Fig. 4 shows the corresponding result using  $T_{AMB}$  to calculate  $T_{MOD}$ . Using the estimated value of  $T_{MOD}$  instead of the measured value cause the standard deviation in  $P_{MAX}$  to increase from 2.2 to 2.7 % of the STC value, and the mean of the distribution shifts from 0.5% to 1.3% (i.e. slightly overestimating the power output). The errors shown in Fig. 3 and 4 represent the practical limit of accuracy of this energy rating procedure, and this accuracy will obviously decrease when less accurate input profiles are used.



**Fig. 2** Histogram of predicted  $P_{MAX}$  residuals calculated from irradiance and module temperature.



**Fig. 3** Histogram of predicted  $P_{MAX}$  residuals calculated from irradiance and ambient temperature.

When on-site irradiance data is unavailable, one can download irradiance data freely available from one of the following databases ( links taken from [10] ):

#### Satellite-Derived Data:

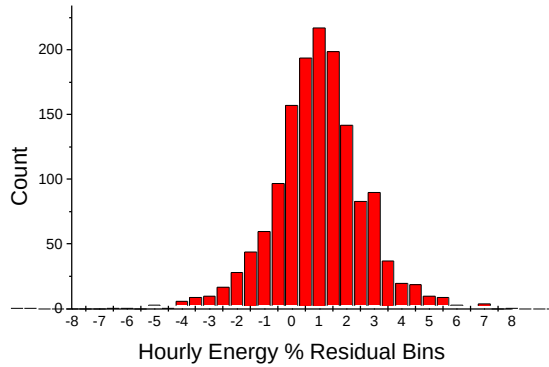
- ✍ Surface Meteorology and Solar Energy Data Set, NASA, <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- ✍ SeaWiFS Surface Solar Irradiance, NASA, <http://www.giss.nasa.gov/data/seawifs/>
- ✍ International Satellite Cloud Climatology Project, NASA, <http://isccp.giss.nasa.gov/>

#### Ground Observations:

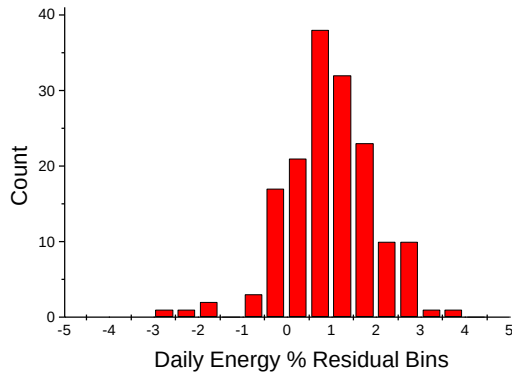
- ✍ World Radiation Data Centre Online Archive, WMO & NREL, <http://wrdc-mgo.nrel.gov/>
- ✍ Baseline Surface Radiation Network, WRMC, <http://bsrn.ethz.ch/>
- ✍ National Climatic Data Center, NOAA, <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>

When the data is given as horizontal global irradiance, the in-plane global irradiance can be calculated using one of several models [11-15]. A review of the applicability of some of these models is given in [16-18]. Databases of local ambient temperature data are more common, and many national weather centres contain online archives.

Returning to our measurements at Ispra, the energy output of a PV module is determined by integrating the predicted instantaneous power over the desired period. The errors in the power output average out when added together, hence the percentage error in the hourly or daily predicted energy output is quite low. Figs. 4 and 5 show the percentage residuals of the hourly and daily predicted energy output. In the case of the hourly accumulated energy, the residuals distribution has a standard error of 1.74% and a mean of 1.0%. The residuals for the daily energy predictions have a standard error of 1.0% and a mean of 0.9%.



**Fig. 4** Histogram of predicted hourly energy residuals calculated from on-site irradiance and ambient temperature data.



**Fig. 5** Histogram of predicted daily energy residuals calculated from on-site irradiance and ambient temperature data.

The total predicted energy output can be presented in absolute form (useful for system sizing and architects), or as a percentage of the power obtained if the module operated constantly at STC power (useful for comparison of different technologies).

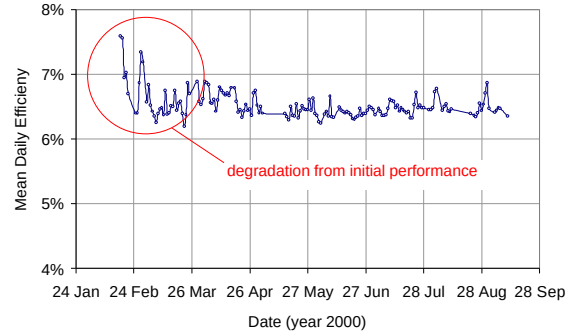
### 3. POTENTIAL PROBLEMS WITH OTHER MODULE TECHNOLOGIES

The energy rating method proposed in this paper has been shown to be accurate for the case of a poly-Si module. In this section, we draw attention to some of the issues which prevent the method being applied directly to other module technologies.

#### Light Soaking / Thermal Annealing of a-Si

Amorphous silicon devices are known to be unstable, and exhibit an initial degradation followed by a small recovery at high temperatures (the Staebler-Wronski effect [19]). Fig. 6 shows the outdoor degradation of an amorphous Si triple-junction module measured at ESTI. Clearly if the indoor flash measurements used to generate the energy rating are performed before the module has reached a

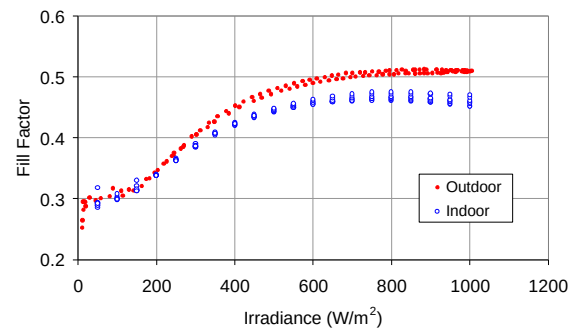
more stable state of operation, the resulting energy rating will significantly overestimate the actual output. Further reading on the issue of outdoor degradation of a-Si and characterisation of seasonal fluctuations can be found in [20-22].



**Fig. 6** Decrease in efficiency of an amorphous Si triple-junction module during the first month of outdoor exposure.

#### Underestimation of Fill Factor in CdTe

Measurements of a CdTe module at ESTI showed that the fill factor values measured indoors during flash measurements were lower than the values measured outdoors on the testfield (see Fig. 7). The indoor data was corrected for spectral mismatch, and the values of  $I_{SC}$  and  $V_{OC}$  showed good agreement between indoor and outdoor, but the fill factor remained too low. This results in an underestimation of the STC power output of about 8%. This fact was also confirmed at the end of the outdoor exposure period, and so we can exclude the possibility of the module changing over time as a possible explanation. This discrepancy is probably due to transient effects or spectral effects (the solar simulator has a higher proportion of blue light with respect to natural sunlight), and we are currently working to explain this phenomenon.



**Fig. 7** Indoor flash measurements underestimate the fill factor of a CdTe module with respect to the outdoor values.

#### Spectral Dependence of Multi-Junction Modules



Series-connected multi-junction solar cells are more sensitive to changes in the solar spectrum than single junction cells. This is because the current output of the device is limited by the output of the lowest performing cell and each cell has a different spectral response [23-24]. It has been shown [25] that this feature can have a significant effect on the total energy output of such a device. Changes in air mass affect higher bandgap cells more than lower ones. Changes in water vapour of 1 to 5 cm can reduce the power output of certain cells by up to 10%, and changes in turbidity can affect the power output by even more. The magnitude of these spectral effects is summarised for different module technologies in [26]. Regarding an energy rating, spectral effects could be accounted for by applying a seasonal correction factor. It is unlikely that a more complicated proposal would increase the accuracy of the energy rating due to the inherent uncertainty about the incident solar energy.

#### 4. CONCLUSIONS

- ✍ We have presented an energy rating that has shown to be very accurate for poly-Si, using only in-plane global irradiance and ambient temperature as input parameters.
- ✍ We have identified the following issues as requiring further attention before implementing an energy rating:
  - Quantification of a-Si degradation
  - Improved indoor determination of FF in CdTe
  - Characterisation of spectral effects working towards a seasonal correction term.

#### 5. REFERENCES

- [1] Bucher K., 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp.2097-2103, 1995.
- [2] Kroposki B., Myres D., Emery K., Mrig L., Whitaker C., & Newmiller J., Photovoltaic Module Energy Rating Methodology Development, 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1996.
- [3] King D.L., Kratochvil J.A., Boyson W.E., & Bower W.I., Field Experience With A New Performance Characterization Procedure For Photovoltaic Arrays, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 6-10 July 1998.
- [4] IEC International Standard 904-1, Measurement of Photovoltaic Current-Voltage Characteristics, 1987.
- [5] IEC International Standard 891, Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measured I-V Characteristics, 1987.
- [6] IEC International Standard 1215 - 10.5, Measurement of Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), 1993.
- [7] Originlab Corporation, Origin Homepage, <http://www.originlab.com/>, accessed 14/10/01.
- [8] SPSS Inc., TableCurve 3D Product Information, <http://www.spssscience.com/tcurve3/>, accessed 11/10/01.
- [9] Anderson D., Agostinelli G., Sample T., Dunlop E., Oral Presentation OB2.3, Modelling Outdoor Behaviour Of Fill Factor In Thin Film Modules, *In this conference*, 2001.
- [10] Otani K., Solar Irradiation Databases on the Web, <http://www.etl.go.jp/etl/divisions/~k.otani/en/doc/irrddata/index.htm>, accessed 15/10/01.
- [11] Temps R., Coulson K., **Solar Energy**, Vol. 19, pp.179-184, 1977.
- [12] Perez R., Stewart R., Arbogast C., Seals R., & Scott J., **Solar Energy**, Vol. 36, pp.481-497, 1986.
- [13] Perez R., Seals R., Ineichen P., Stewart R., & Menicucci D., **Solar Energy**, Vol. 39, pp.221-231, 1987.
- [14] Kouremenos D., Antonopoulos K., and Doulgerakis S., **Solar Energy**, Vol. 38, No. 3, pp.203-217, 1987.
- [15] Remund J., Salvisberg E., and Kunz S., **Solar Energy**, Vol. 62, No. 5, pp.331-344, 1998.
- [16] Klucher T.M., **Solar Energy**, Vol. 23, pp.111-114, 1978.
- [17] Perez R., Seals R., Zelenka A., and Ineichen P., **Solar Energy**, Vol. 44, No.2, pp.90-108, 1990.
- [18] Behr H.D., **Solar Energy**, Vol. 61, No. 6, pp.399-413, 1997.
- [19] Staebler D.L. & Wronski C.R., **Applied Physics Letters**, Vol 31, No. 4, pp.292-294, 1977.
- [20] del Cueto J. & McMahon T.J., Performance of Single-Junction a-Si Modules Under Varying Conditions in the Field, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, California, Sep 29 - Oct 3 1997.
- [21] Merten J. & Andreu J., **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 52, pp.11-25, 1998.
- [22] Gottschalg R., Perentzis G., and Infield D., Comprehensive Approach for the Estimation of Outdoor Degradation of Amorphous Silicon Photovoltaic Devices, ISES Solar World Congress 1, Jerusalem, July 1999, pp. 129-133.
- [23] Burdick J. & Glatfelter T., **Solar Cells**, Vol.18, pp.301-314, 1986.
- [24] Nell M. & Barnett A., **IEEE Transactions on Electron Devices**, Vol 34, No.2, pp.257-266, 1987.
- [25] Faine P., Kurtz S., Riordan C., & Olson J., **Solar Cells**, Vol. 31, pp.259-278, 1991.
- [26] Gottschalg R., Infield D.G., Spectral Effects on the Performance of Thin Film Solar Cells at Loughborough UK, UK-ISES Conference, Brighton, May 1999.

## **6. Methoden zur Energieertrags- bestimmung von PV-Modulen - Gegenwärtige Internationale Standards-Entwuerfe, Markus Real, Alpha Real AG**

Dieses Referat wurde von Markus Real in  
Vertretung von Heinz Ossenbrink JRC Ispra,  
basierend auf eigenen Recherchen, gehalten

# **Methoden zur Energieertragsbestimmung von PV-Modulen - Gegenwärtige Internationale Standards-Entwürfe**

**Dieses Referat wurde von Markus Real in Vertretung von Heinz Ossenbrink JRC Ispra, basierend auf eigenen Recherchen, gehalten**

## **Normenentwurf**

IEC 82/254/NP

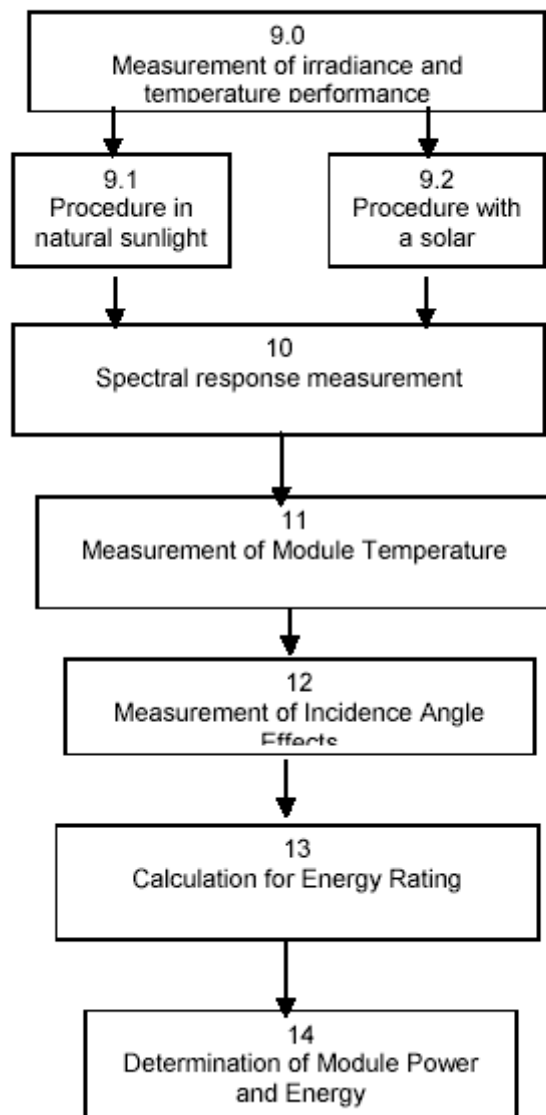
PERFORMANCE TESTING AND  
ENERGY RATING OF TERRESTRIAL  
PHOTOVOLTAIC (PV) MODULES

### **1. Grundidee des Normenentwurfes**

Die Energieproduktion soll basierend auf verschiedenen Standardtagen, die jedes Klima abbilden, definiert werden. Konkret soll es für den Anwender so aussehen: Zusammen mit dem Modul erhält er neben dem üblichen STC Wert eine Liste, in der die Energieproduktionen für diese 6 Standardtage deklariert sind. Der Anwender sucht sich den Standardtag aus, der seinem Klima am Nächsten kommt und kann dann die verschiedenen Module vergleichen. Diese Standardtage sind durch Stundenwerte in spektralen Energieeinheiten definiert. Die Norm sieht vor, dass diese Messungen sowohl Indoor in einem Simulator wie auch Outdoor mit in der Norm definierten Verfahren durchgeführt werden kann.

## 2. Generelles Vorgehen

Figure 1 -Sequence for Power and Energy Rating Process  
3 modules



## 3. Standarddefinitionen

### 8.1 Fixpunkte der Leistungsbestimmung

The modules shall be tested and the maximum power determined for the following rating conditions. For each rating condition the Air Mass 1.5 spectral irradiance distribution as given in IEC 904-3 shall be used.

#### 8.1.1 STC (Standard Test Conditions)

- Cell temperature: 25 °C
- Irradiance: 1000 W/m<sup>2</sup>

#### 8.1.2 NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)

- Cell temperature: NOCT (As determined in accordance with clause 10.5 of IEC 1215 or IEC 1646)
- Irradiance: 800 W/m<sup>2</sup>

#### 8.1.3 LIC (Low Irradiance Condition)

- Cell temperature: 25 °C
- Irradiance: 100 W/m<sup>2</sup>

#### 8.1.4 HTC (High Temperature Condition)

- Cell temperature: 75 °C

-- Irradiance:  $1000 \text{ Wm}^2$

#### 8.1.5 LTC (*Low Temperature Condition*)

-- Cell temperature:  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

-- Irradiance:  $500 \text{ Wm}^2$

### 8.2 Definitionen für die Energieproduktion

The modules shall be evaluated and the day-long specific yields and energy values (Wh) determined for 5 reference days representing extreme combinations of ambient temperature and irradiance, and for 1 nominal or average reference day. The energy values determined for these reference days are for maximum power point operation. The 6 reference days are defined in tabular form with ambient temperature, wind speed, irradiance and spectral irradiance distribution, specified as a function of time of day, and are identified as follows:

8.2.1 *HIHT (High irradiance, high temperature)* -- This day is typical of a hot day in a desert location. The peak irradiance is  $1100 \text{ Wm}^2$ , the peak ambient temperature is  $45^{\circ}\text{C}$ , sunrise is at 5:00 A.M. and sunset is at 7:00 P.M. The hourly conditions for this day are given in Table 2.

8.2.2 *HILT (High irradiance, low temperature)* -- This reference day is typical of a spring day in a mountainous region. The peak irradiance is  $1000 \text{ Wm}^2$ , the peak ambient temperature is  $6^{\circ}\text{C}$ , sunrise is at 6:00 A.M. and sunset is at 6:00 P.M. The hourly conditions for this reference day are given in Table 3.

8.2.3 *MIMT (Medium irradiance, medium temperature)* -- This day is typical of a fall day with a strong overcast. The peak irradiance is  $350 \text{ Wm}^2$ , the peak ambient temperature is  $15^{\circ}\text{C}$ , sunrise is at 6:00 A.M., and sunset is at 7:00 P.M. The hourly conditions for this reference day are given in Table 4.

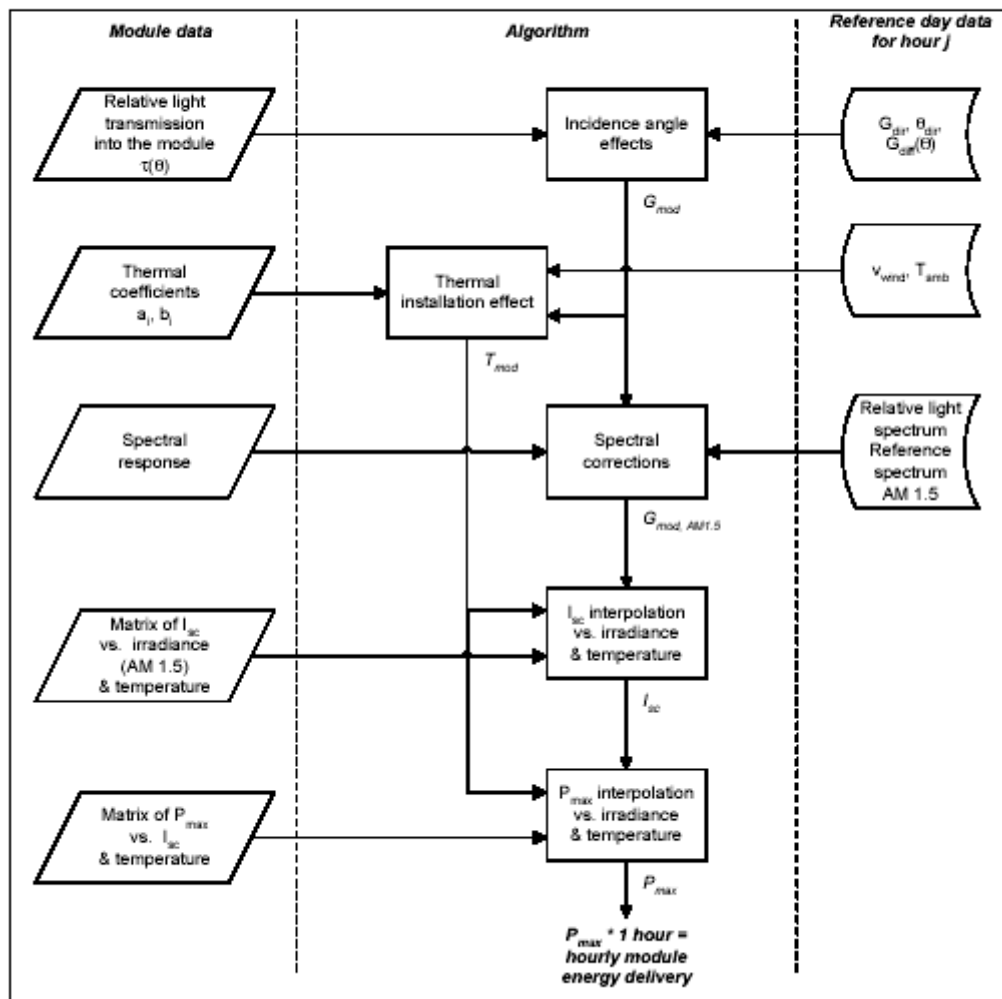
8.2.4 *MIHT (Medium irradiance, high temperature)* -- This day is typical of a hot, humid summer day with a light overcast. The peak irradiance is  $600 \text{ Wm}^2$ , the peak ambient temperature is  $30^{\circ}\text{C}$ , sunrise is at 5:00 A.M., and sunset is at 7:00 P.M. The hourly conditions for this reference day are given in Table 5.

8.2.5 *LILT (Low irradiance, low temperature)* -- This day is typical of a winter day in the northern countries. The peak irradiance is  $200 \text{ Wm}^2$ , the peak ambient temperature is  $0^{\circ}\text{C}$ , sunrise is at 7:00 A.M. and sunset is at 5:00 P.M. The hourly conditions for this reference day are given in Table 6.

8.2.6 *NICE (Normal irradiance, cool environment)* -- This day is typical of a summer day in a cool coastal region. The peak irradiance is  $1000 \text{ Wm}^2$ , the peak ambient temperature is  $18^{\circ}\text{C}$ , sunrise is at 5:00 A.M., and sunset is at 7:00 P.M. The hourly conditions for this reference day are given in Table 7.

#### 4. Uebersicht

Figure 3  
Overview of Energy Rating Procedure



#### Zusammenfassung

- Zusätzlich zum STC werden weitere Punkte für die Leistungsbestimmung definiert
- Für die Bestimmung der Energieproduktion werden von den Standardtagen Tabellen mit Einstrahlung und Lufttemperatur geliefert
- Für die genaue Umrechnung in Energiewerte werden Vorschläge gemacht, es gibt aber eine gewisse Freiheit in dieser Bestimmung. Es wird bloss vorgegeben, dass drei Module innerhalb von 5% liegen müssen. Sonst sind 2 weitere Module zu testen. Es sind die Mittelwerte zu verwenden. Liegt die Standardabweichung der Resultate über 25%, so dürfen sie nicht verwendet werden.
- Obwohl grundsätzlich nur Globalstrahlung und Lufttemperatur vorgegeben werden, gibt es auch Hinweise zur Behandlung der Spektralabhängigkeit und Winkelabhängigkeit. Es sind aber keine Korrekturverfahren für die Behandlung dieser Effekte vorgegeben.

## **7. Uebersicht der Verfahren, Robert Kröni, Enecolo AG Mönchaltorf**

## Vergleich der verschiedenen Methoden zur Ertragsbestimmung

### Modulseitiges Modell

| Modell                                                                               | Modulwerte                                                                                                                                                                                                    | Bemerkungen                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ertragsmessung unter realen Bedingungen, LEEE-TISO                                   | Leistungsmatrix P(G,T) gemessen Outdoor                                                                                                                                                                       | vernachlässigt wird Einstrahlungswinkel, Spektrum (teilweise), Wind                                                                                         |
| Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell, PSI                                     | Formel, welche die Leistungsmatrix in Funktion von G, T, AM und $\varphi$ Kennlinien werden Outdoor gemessen                                                                                                  |                                                                                                                                                             |
| Jahreswirkungsgrad, Erfahrungen mit einem Prognoseverfahren RRC, FH-ISE              | Das Verfahren ermittelt einen mittleren Jahreswirkungsgrad eines Moduls. Es werden alle relevanten Faktoren gemessen (Teillastwirkungsgrad, Temperaturabhängigkeit, Spektralabhängigkeit, Winkelabhängigkeit) | Es sind relativ umfangreiche Messungen Indoor und Outdoor ( Outdoor nur NOCT, das ist eine Standardgrösse) notwendig, Rechenverfahren ist nicht transparent |
| Verfahren mit Teillastwirkungsgraden, derzeit im JRC Ispra in Entwicklung, JRC Ispra | Formel, welche die Leistungsmatrix in Funktion von $P_{STC}$ , NOCT und Füllfaktor berechnet                                                                                                                  | vernachlässigt wird Einstrahlungswinkel, Spektrum                                                                                                           |

G: Globalstrahlung

T: Lufttemperatur, davon abgeleitet Zelltemperatur (mit NOCT oder Ross-Koeffizient)

AM: Air Mass

$\varphi$ : Neigungswinkel

### Anforderungen Meteodaten

| Modell                                                                               | Meteodaten                                                                                                                                                                     | Bemerkungen                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ertragsmessung unter realen Bedingungen, LEEE-TISO                                   | Globalstrahlung<br>Lufttemperatur                                                                                                                                              | G und T sind mit Meteonorm einfach zu rechnen.                                                      |
| Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell, PSI                                     | Globalstrahlung<br>Lufttemperatur<br>Einstrahlungswinkel                                                                                                                       | G und T sind mit Meteonorm einfach zu rechnen, der Einstrahlungswinkel muss selbst errechnet werden |
| Jahreswirkungsgrad, Erfahrungen mit einem Prognoseverfahren RRC, FH-ISE              | Direktstrahlung <sub>norm</sub><br>Globalstrahlung <sub>diff, hor</sub><br>(alternativ Globalstrahlung <sub>hor</sub> mit Umrechnung)<br>Lufttemperatur<br>Windgeschwindigkeit | Diese Daten können auch mit der Meteonorm berechnet werden                                          |
| Verfahren mit Teillastwirkungsgraden, derzeit im JRC Ispra in Entwicklung, JRC Ispra | Globalstrahlung<br>Lufttemperatur                                                                                                                                              | G und T sind mit Meteonorm einfach zu rechnen.                                                      |



## Rechenverfahren

| Modell                                                                               | Rechenverfahren                                                                                                                                                                            | Bemerkungen                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ertragsmessung unter realen Bedingungen, LEEE-TISO                                   | Ausmultiplikation von Meteodaten und Leistungsmatrix                                                                                                                                       | Kann mit Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen.                                                                                      |
| Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell, PSI                                     | Zu jedem Meteowert kann die dazugehörige Leistung gerechnet werden, nachher Summierung der Werte<br>Alternativ kann auch eine Leistungsmatrix gerechnet werden, dann weiter wie oben       | Kann mit Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen. Mit dem Weg über die Leistungsmatrix muss der Einstrahlwinkel vernachlässigt werden. |
| Jahreswirkungsgrad, Erfahrungen mit einem Prognoseverfahren RRC, FH-ISE              | Auf Basis von stündlichen Wetterdaten werden die Teileffekte Teillastwirkungsgrad, Temperatur, Winkelabhängigkeit und Spektraleffekt berechnet und über den Betrachtungszeitraum gemittelt | Rechenverfahren ist nicht offen zugänglich, Dienstleistung FH-ISE                                                                    |
| Verfahren mit Teillastwirkungsgraden, derzeit im JRC Ispra in Entwicklung, JRC Ispra | Ausmultiplikation von Meteodaten und Leistungsmatrix                                                                                                                                       | Kann mit Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen.                                                                                      |

## Kommentare:

- Das Modell „Jahreswirkungsgrad FH-ISE“ scheidet als Standardverfahren fast zum vorneherein aus, weil das ganze System „proprietär“ ist. d.h. es kann lediglich vom FH-ISE angewendet werden. Es ist also kein allgemein verwendbares Verfahren, auch wenn es gute Resultate liefert.
- Die anderen Verfahren basieren im wesentlichen auf der gleichen Grundidee: über das ganze Lastfeld in Funktion von Einstrahlung und Temperatur (ev. auch zusätzliche Faktoren) die Modulleistung zu ermitteln und diese mit realen oder gerechneten Meteodaten zu verarbeiten.
- Alle drei Verfahren haben eine unterschiedliche Datenbasis: Ertragsmessung Outdoor (TISO), Kennlinienmessung Outdoor (PSI) und Kennlinie STC/NOCT (JRC-Ispra).
- Alle Verfahren haben basierend auf der Untersuchung einzelner Module gute Werte geliefert.
- Alle Verfahren weisen den Mangel auf, dass sie alle auf einer nicht repräsentativen Datengrundlage basieren.
- Es wurden untereinander keine vergleichenden Betrachtungen erstellt.
- Die Auswertung für die Anwender wird, auch wenn sie mit selbstgebastelten Tabellenkalkulationsprogrammen möglich ist, noch von keinem der Modulhersteller angeboten. Die Handhabung ist also noch nicht einfach.
- Der Anwender kann vor allem aus der Arbeit des LEEE-TISO einzelne Indizien über ein paar Produkte herauslesen. Ein repräsentativer Querschnitt ist aber bei weitem noch nicht vorhanden.

#### Schlussfolgerung und weitere Arbeiten:

- Notwendig ist ein Vergleich der verschiedenen Methoden z.B. indem ein Modul mit allen Methoden abgebildet wird und die Resultate untereinander verglichen werden.
- Die Methoden sollen unter den verschiedene Instituten ausgetauscht werden, um die Wiederholbarkeit zu gewährleisten (z.B. das Verfahren „Jahresertragrechnung mit Wirkungsgradmodell“) soll vom JRC Ispra nachgebildet werden, das FH-ISE soll einen Messstand für „Ertragsmessung unter realen Bedingungen“ bauen und die Leistungsmatrix eines schon bekannten Moduls ermitteln etc.
- Es soll nochmals schlüssig nachgewiesen werden, dass die Leistungsmatrix pro Technologie/Modultyp gleichartig ist, d.h. proportional zu  $P_{MPP}/STC$  umgerechnet werden kann. Dies kann wohl nur durch das Ausmessen einer genügend grossen Anzahl Module des gleichen Typs erfolgen.
- Es soll ein einfaches Auswertetool basierend auf einer Tabellenkalkulation entwickelt werden.
- Schlussendlich sind die Daten für alle relevanten Module zur Verfügung zu stellen. Dies ist eine Daueraufgabe, da jedes Jahr neue Produkte auf den Markt kommen und bestehende Produkte im Herstellungsprozess modifiziert werden.

Die noch zu lösenden Aufgaben sind begrenzt und liegen umfangmässig im Rahmen des Möglichen. Es ist unter Umständen nicht notwendig, dass ein einzelnes Verfahren als Standardverfahren definiert wird, wenn nachgewiesen werden kann, dass alle Verfahren zu gleichwertigen Resultaten führen.

Die vorgestellten Ansätze, die auf der Leistungsmatrix basieren, sind auch mit dem IEC-Normenentwurf kompatibel. Die Leistungsmatrix kann mit Leichtigkeit mit den Meteodaten der Normentage verrechnet werden.

26. März 02, Robert Kröni

## **8. Zusammenfassung, Stefan Nowak, NET AG St.Ursen**

# Photovoltaik Modulertrag wie weiter ?

Stefan Nowak, Programmleiter Photovoltaik BFE

Workshop, 22. März 2002



## Modelle

- TISO: Leistungsmatrix (reale Betriebsbedingungen)
- PSI: Wirkungsgradmodell
- FhG-ISE: Jahreswirkungsgrad
- JRC Ispra: Teillastwirkungsgrad
- IEC Normen

## Situation

- Das Verständnis der Effekte  
Einstrahlung, Standort  
Temperatur  
Einbau  
Winkelabhängigkeit  
Spektrale Abhängigkeit
- Technologie spezifische Unterschiede
- Die Gewichtung der Einflüsse
- Wissenschaftlich empirisches Verständnis

## Charakterisierung

- Präzision
- Aufwand, Ressourcen und Zeit
- eigentlich vieles bekannt
- Übertragbarkeit, statistische Relevanz
- Abweichungen, Fehler
- Unsicherheiten
- andere Parameter im System (Anlage)
- **Relevanz ??**

## Das STC - Malaise

---

---

- nicht korrekt spezifizierte Werte
- Produktgarantien
- Fabrikationsstreuungen
- Statistik
  
- Wettbewerb
- Image der Branche

## Der Bedarf

---

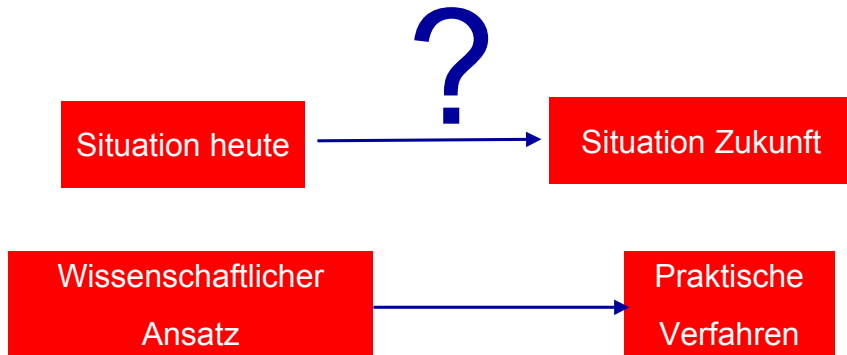
---

- Praxisnahe Informationen
- schnell und günstig verfügbar
- transparent
- normierte Daten
- zuverlässige Angaben

aber

- wer übt entsprechenden Druck aus?

## Wie weiter



## Auf den Punkt gebracht

NB: die Frage lautet nicht

- welches Modell/Verfahren ist präziser ?

sondern

- durch welches Verfahren kann die Situation am effizientesten verbessert werden ?

und

- wer kann dies bewirken ?

## Der Handlungsbedarf

### Wer

- Forschungsinstitute
- Hersteller
- Anwender
- Kunde
- Normenorganisationen
- Behörden

### Was

- besseres Verständnis / einfaches Modell
- bessere Deklaration
- Einkaufskriterien
- Garantien
- Normen
- Vorschriften

## Themen

- Weitere Angaben zu den Produkten?
- Einfluss von Statistik und Technologie?
- Bessere Konsistenz der Hersteller Testverfahren?
- weitere Standardbedingungen (genormt)?
- löst IEC das Problem?
- Bedingungen in grossen Förderprogrammen?
- 
-



## Methodisch

---

Kurzfristig (vom Anwender aus)

- Zusätzliche Messungen
- einfache Messungen (Stützpunkte)
- Modell

Mittelfristig (über den Hersteller)

- Label
- Referenzblatt
- Normen

## Vorgehen

---

- vergleichender Ansatz (round robin)
- Füllen vorhandener Lücken
- Statistik
- Technologie
- Fokus auf praktische Bedeutung
- Kriterienliste
- Publizität: mehr informieren

**.... Optionen für das weitere Vorgehen ausarbeiten**