



S. K. Meilinger, I. Neher, E. Dresch, K. Hasan, B. Evers-Dietze und D. Franke  
Bremerhaven, April 2016

## **PV-WORLDWIDE YIELD SIMUALTION MODEL (WoYSi)**

**Simulationsmodel für PV-Erträge unter Berücksichtigung atmosphärischer  
Randbedingungen und spektral abhängiger Photoströme**



# Wie realistisch sind Ertragscharakterisierung nach EN60904?

## Problem:

**Investitions- und Technologieentscheidung**  
basieren auf Ertragsangaben nach EN60904  
(STC Bedingungen):

- 1000 W/m<sup>2</sup>,
- 25°C,
- AM1,5,
- Spektrum der Standardatmosphäre

## Abweichungen zwischen Spezifikation nach EN 60904 und Feldmessung

## Ursachen:

### Schwachlichtverhalten

- Auf kurzen Zeitskalen (15min-Tage):  
G < 200 Wm<sup>-2</sup> bis 100%<sup>1</sup>
- Auf langen Zeitskalen (1-30 Jahr):  
Geringer Einfluss<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mack and Egler, 2013; <sup>2</sup>Huld et al. 2013

### Spektrale Effekte:

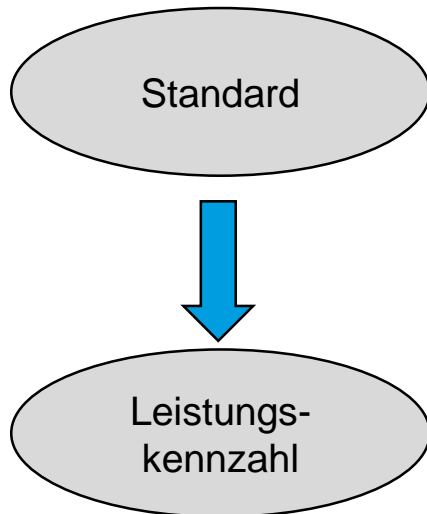
- Auf kurzer Zeitskala (Monat):  
bis zu 16% für a-Si<sup>3</sup>
- Auf langer Zeitskala (1-30 Jahre):  
≤ 2,2%, Materialabhängig  
(0,4% (c-Si), 1,5% (CdTe))<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Hulde et al., 2009; Alonso-Abella et al. 2014

# Charakterisierung von PV Modulen

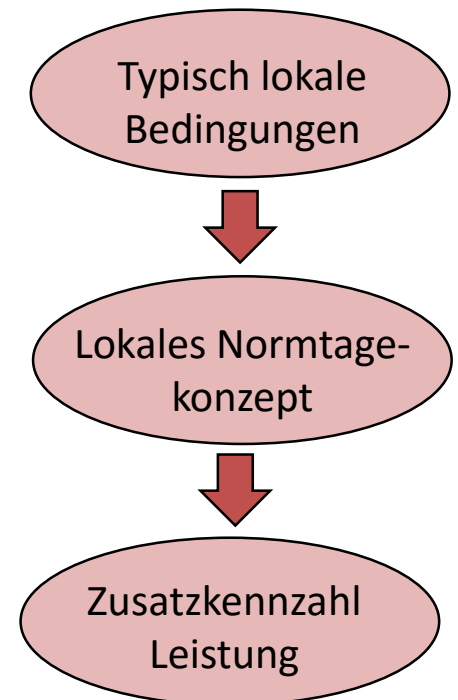
... for investment decisions  
... for technology decisions  
... for grid design & management

STC (EN 60904)  
1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM1,5  
Standard Spectrum



Anforderung Modulcharakterisierung:

- Zeitaufwand pro Modul: ≤ 10 min
- Konzept muss global funktionieren

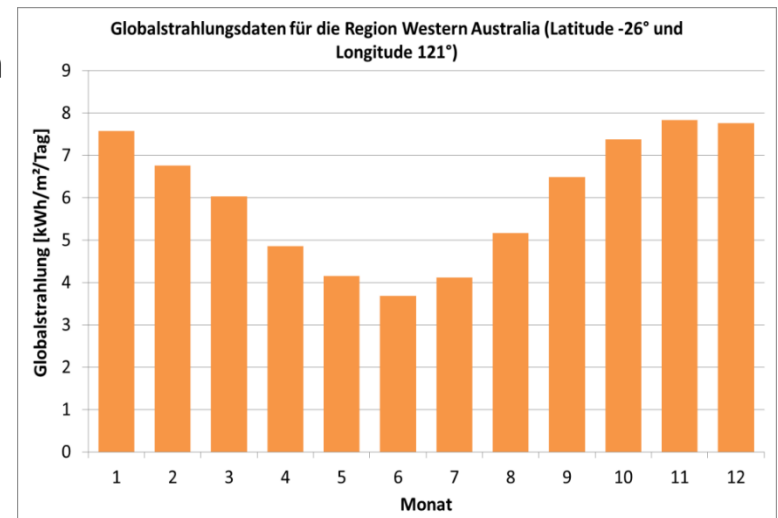


# Entwicklung eines lokalen Normtagekonzepts

## Schritt 1:

### Reale lokale Strahlungsdaten:

- **Datenquelle: Satellitenbasierte Strahlungsdaten**  
(aktuell: NASA LaRC POWER Project)
  - Monatliche Mittelwerte  
(Messdaten aus 22 Jahren – 1983 bis 2005)
  - Global-, Diffus- und Direktstrahlung
  - Lufttemperatur
  - Globaler Datensatz ( $1^\circ \times 1^\circ$  – 64800 Regionen)
- **Normierung der Normtag-Gesamtstrahlung**

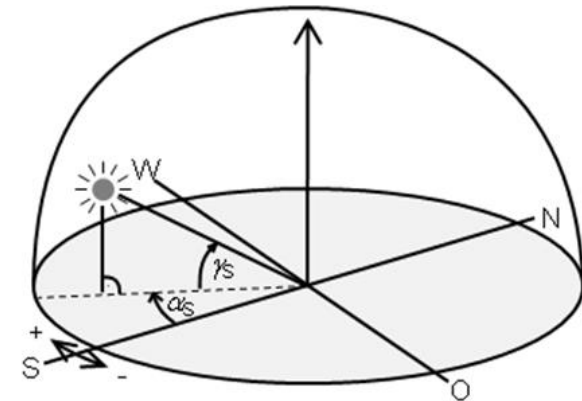


# Entwicklung eines lokalen Normtagekonzepts

## Schritt 2:

### Mittlerer lokaler Tagesgang der Airmass:

- $AM(\gamma_S)$  nach Young 1994
- Ermittlung der AM-Werte für die Region für 12 Monatsnormtage aus dem Sonnenstand



Source: [www.lehrbuch-photovoltaic.de](http://www.lehrbuch-photovoltaic.de)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U						
1	66	7																									
2	1	2																									
3																											
4																											
5										8,167749	6,040774	5,470254	5,775552	7,290926													
6										6,984816	4,300928	3,334375	2,918099	2,789507	2,886791	3,254295	4,105073	6,296564									
7										6,836091	3,955375	2,861033	2,317985	2,027049	1,882476	1,843123	1,898911	2,063989	2,386251	2,987525	4,219916	7,612627					
8										8,812363	4,869138	3,291081	2,488877	2,031293	1,757243	1,595417	1,511767	1,490915	1,529258	1,633498	1,823423	2,141218	2,676351	3,639056	5,635038		
9										9,431192	5,607401	3,767062	2,776841	2,197303	1,839945	1,615467	1,478479	1,40536	1,384764	1,413658	1,496323	1,645772	1,888386	2,274837	2,905795	3,997195	6,062693
10										7,311011	4,447593	3,115485	2,393065	1,966425	1,704835	1,546747	1,461494	1,434516	1,461485	1,546716	1,704743	1,966169	2,392361	3,113449	4,440889	7,283164	
11										9,137	4,73028	3,196023	2,455242	2,048298	1,817874	1,698698	1,662377	1,703147	1,827845	2,066611	2,488709	3,263548	4,90407	9,930346			
12										6,172269	3,860406	2,939657	2,495969	2,291001	2,245764	2,345335	2,625003	3,206818	4,484631	8,501764							
13										6,360011	4,659375	4,058128	3,985896	4,392274	5,621767	9,685203											
14																											

AM-Werte für die Region mit Breitengrad 66 und Längengrad 7

# Erzeugung spektraler Tagesgänge

## Nutzung von SMARTS

### Schritt 3:

#### Erzeugung von AM-Spektren mit SMARTS

*Simple Model of Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine* von NREL

- Look-up-Tabelle für
  - AM 1 bis AM 10 in 0,1 Schritten
  - Aerosol-Typen: Ländlich, städtisch, maritim (Shettle & Fenn) und wüstenartig
  - Atmosphärenprofile: US-Standard 1976, Mid-Latitude, Arctic, Tropical

➤ **Insgesamt 1600 AM-Spektren**

### Schritt 4

#### Zuordnung der korrespondierenden AM-Spektren:

- Lokale mittlere AM-Tagesgänge
- Lokale Profil- und Aerosolannahmen

#### Normierung

der Normtag-Gesamtstrahlung gemäß Satellitendaten aus Schritt 1

➤ **Spektral aufgelöster Tagesgänge (lokaler Normtag)**

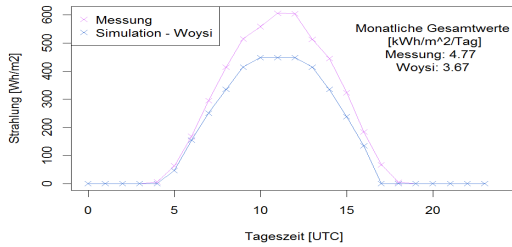


# WoYSi-Normtag & Messung Sankt Augustin

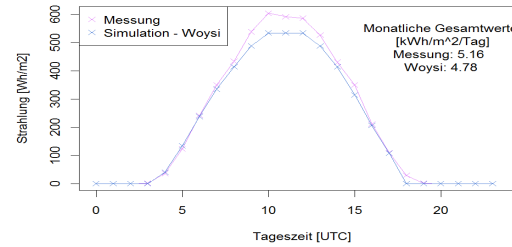


Außenmessstand der HBRS in Sankt Augustin

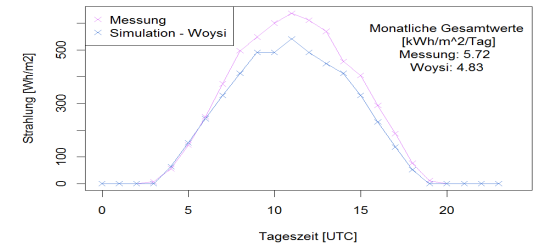
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im April



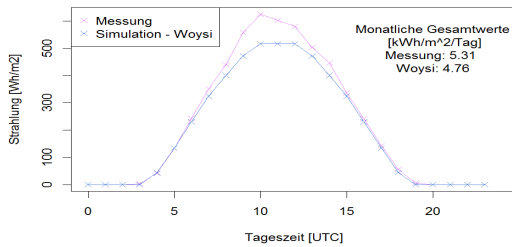
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im Mai



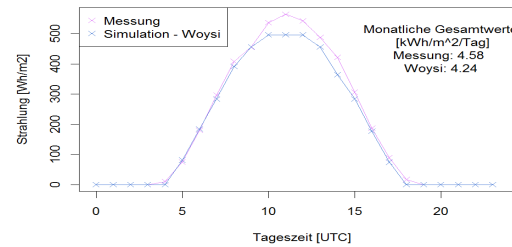
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im June



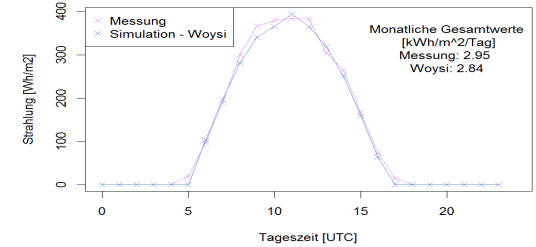
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im July



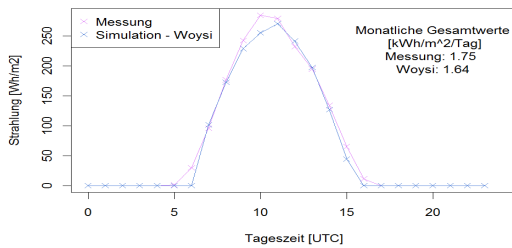
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im August



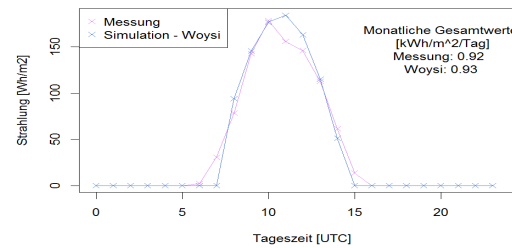
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im September



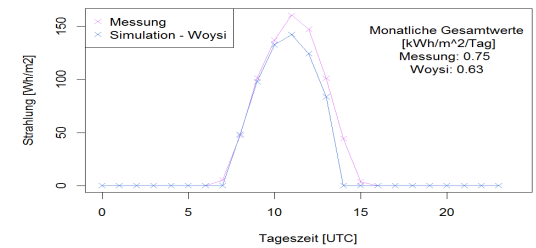
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im October



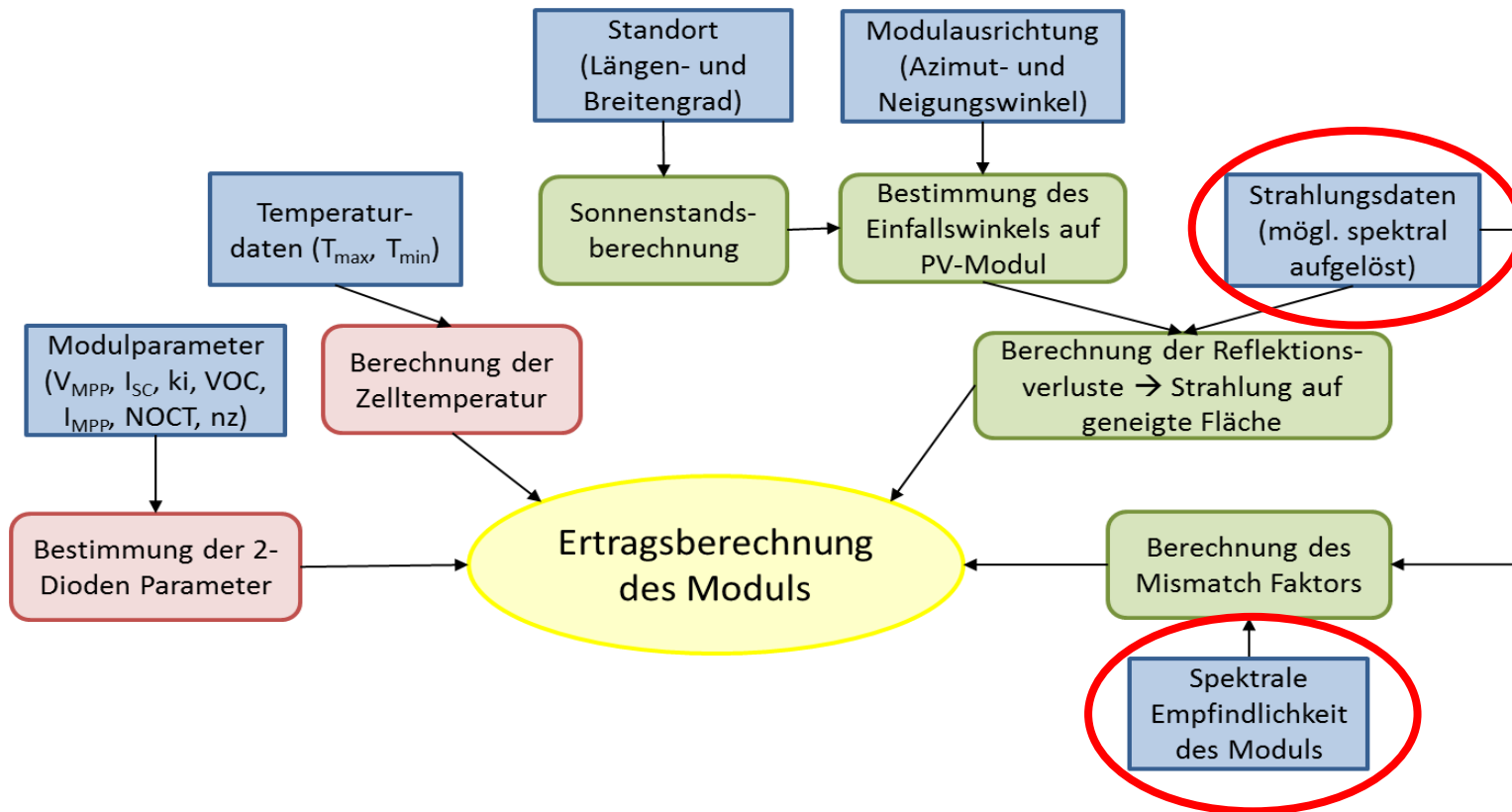
Vergleich Woysi mit Trackerdaten im November



Vergleich Woysi mit Trackerdaten im December



# Spektral abhängige Ertragsmodellierung mit einem spektralen Zwei-Dioden-Modell



Blau: Input, grün: Reduktion der solaren Strahlung durch atmosphärische und geometrische Effekte sowie Modulverluste; rot: Modellparameterbestimmung und Temperaturberechnung).



# Spektrale Abhängigkeit

## Zwei Möglichkeiten

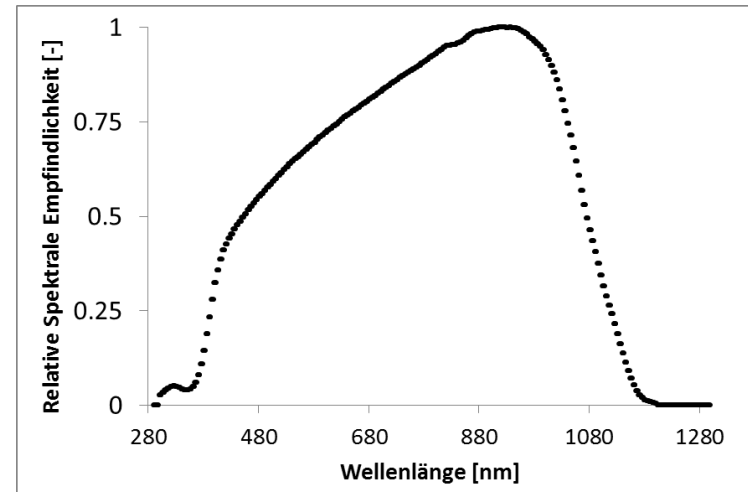
1. **Über einen spektral abhängigen Photostrom**  
 $I_{pH}$  (absoluten spektralen Empfindlichkeit)
2. **Über den Spectral Mismatch (SMM)**  
(relative spektralen Empfindlichkeit)

$$SMM = \frac{\int SR(\lambda)E_{AM1.5G}(\lambda)d\lambda * \int E(\lambda)d\lambda}{\int E_{AM1.5G}(\lambda)d\lambda * \int SR(\lambda)E(\lambda)d\lambda}$$

SR – Relative Spektrale Empfindlichkeit [-]

$E_{AM1.5G}$  – AM1.5-Spektrum [ $W/m^2$ ]

E – Gegebenes Spektrum [ $W/m^2$ ]



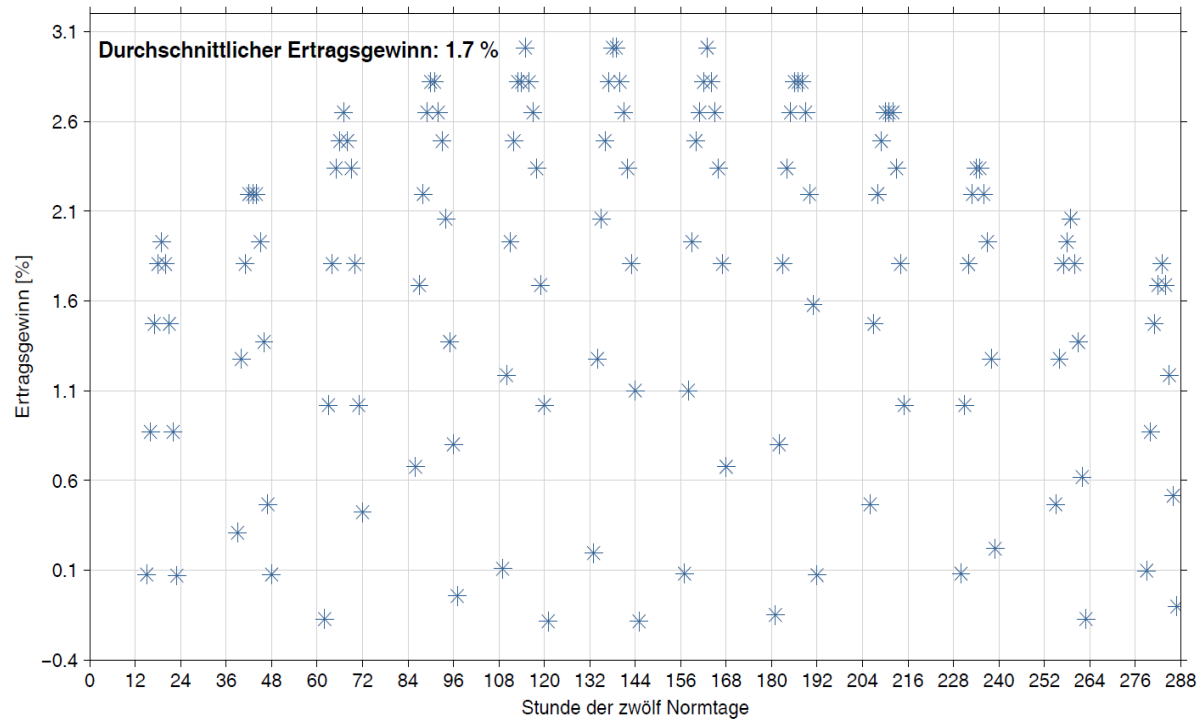
Relative Sepktrale Empfindlichkeit für Referenzmodul  
(SolarWorld SW235 poly Modul)

## → Vorteil des SMM:

Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit ist einfacher und kann im Labor für das gesamte Modul durchgeführt werden

# Spektrale Abhängigkeit

Ertragsgewinn durch die spektrale Empfindlichkeit für das Modul  
SolarWorld poly-Si 235 Wp in Tempe/US

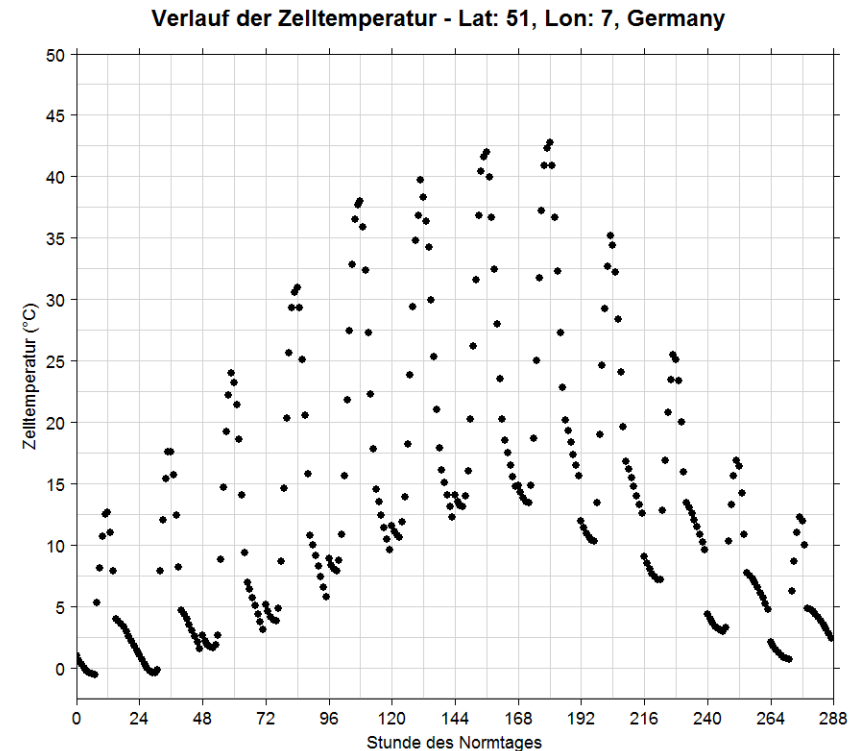


Verlauf SMM für Tempe/US während der 12 Normmonatstage  
für SolarWorld SW235 poly Modul

→ Durchschnittlicher SMM: 1.7% (erwarteten Bereich für poly-Si Module)

# Temperaturabhängigkeit

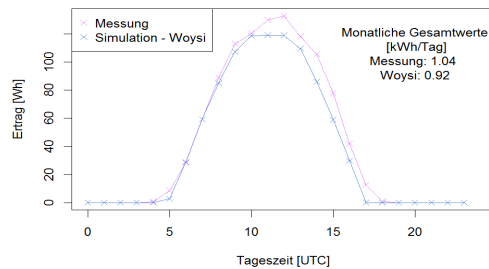
- Abschätzung eines Temperaturtagesgangs für die 12 Normmonatstage
  - Aus den maximalen, minimalen und durchschnittlichen Monatstemperatur
  - Berechnung mit der Abhängigkeit von De Wit et al 1978.
- Berechnung der Zelltemperatur
  - Einfache Bestimmung der Zelltemperatur für das Zwei-Dioden-Modell mit dem NOCT-Modell



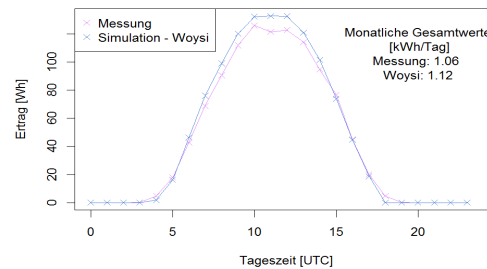
*Errechnete Zelltemperaturen eines PV-Moduls aus den abgeschätzten Temperaturtagesgang für die Region Köln*

# WoYSi Validierung – Ertrag (mittlerer Tagesgang) Sankt Augustin

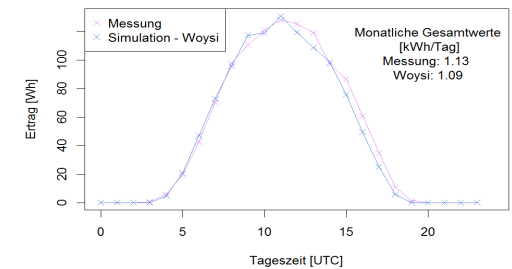
Vergleich Woysi mit Ertragsdaten (SW235) im April



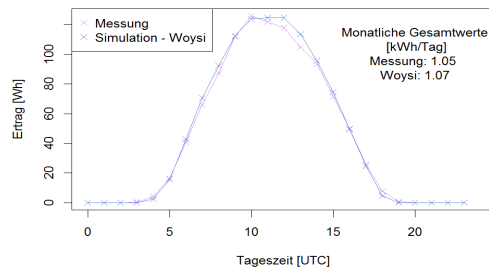
Vergleich Woysi mit Ertragsdaten (SW235) im Mai



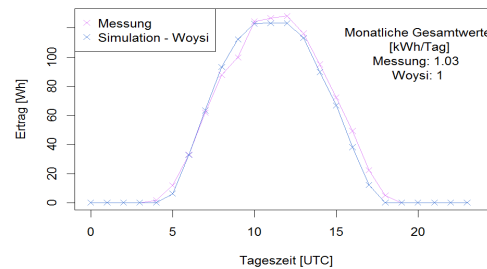
Vergleich Woysi mit Ertragsdaten (SW235) im June



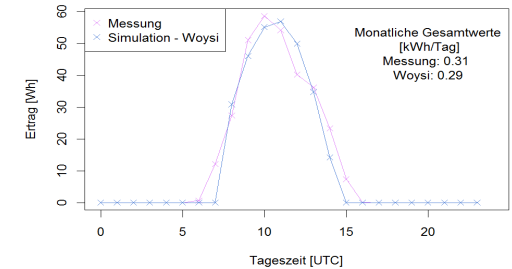
Vergleich Woysi mit Ertragsdaten (SW235) im July



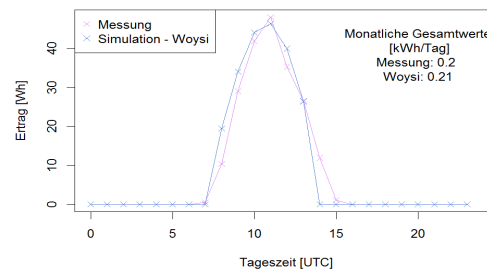
Vergleich Woysi mit Ertragsdaten (SW235) im August



Vergleich Woysi mit Ertragsdaten (SW235) im November

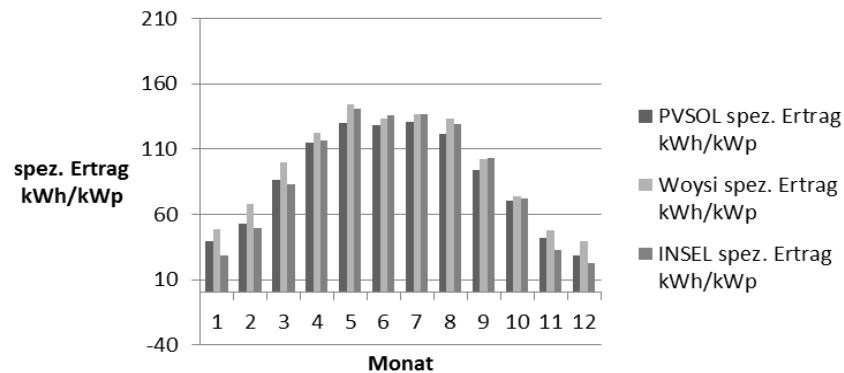


Vergleich Woysi mit Ertragsdaten (SW235) im December

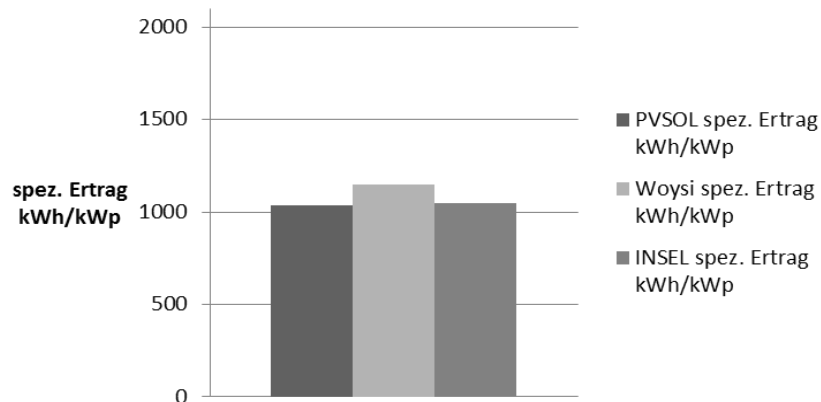


# WoYSi Validierung – Ertrag (Monats- und Jahresmittel) *Sankt Augustin*

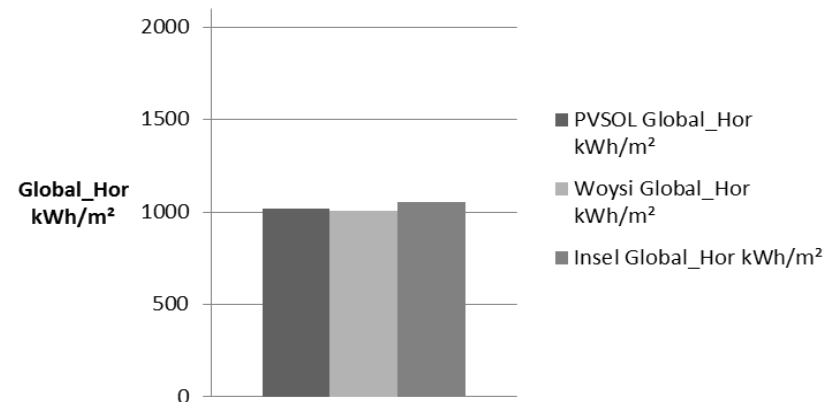
Spezifischer Ertrag St. Augustin



Spezifischer Ertrag St. Augustin



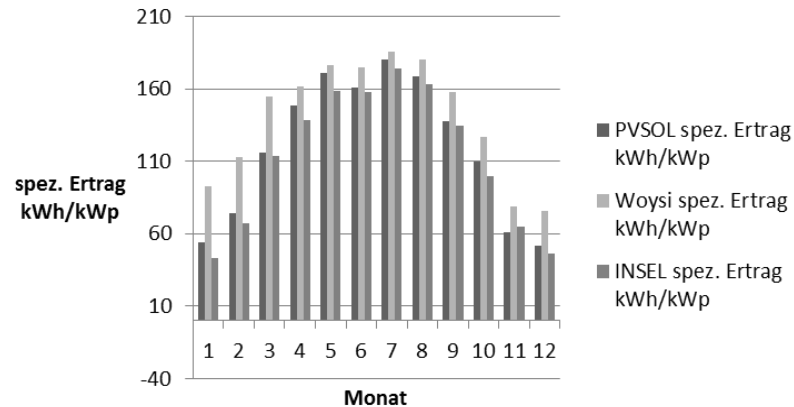
Globalstrahlung St. Augustin



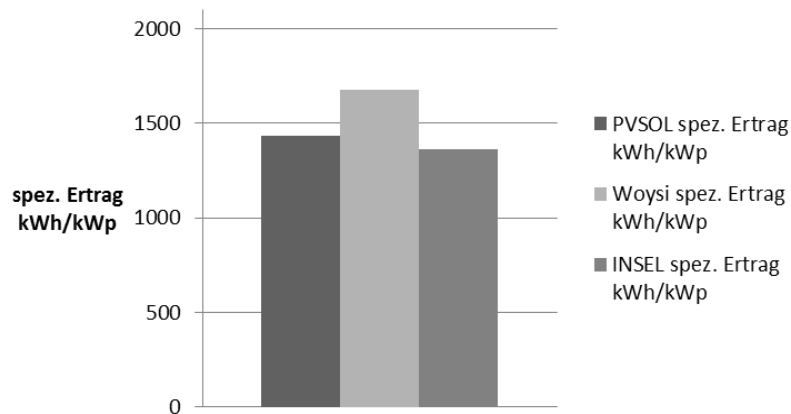
# WoYSi Validierung – Ertrag (Monats- und Jahresmittel)

## Ancona

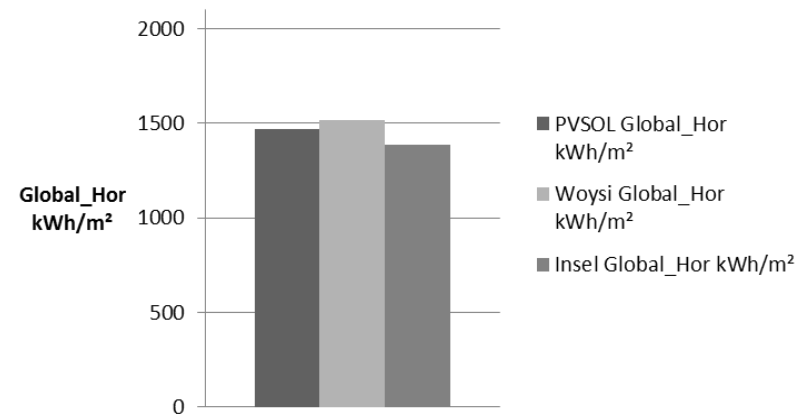
Spezifischer Ertrag Ancona



Spezifischer Ertrag Ancona

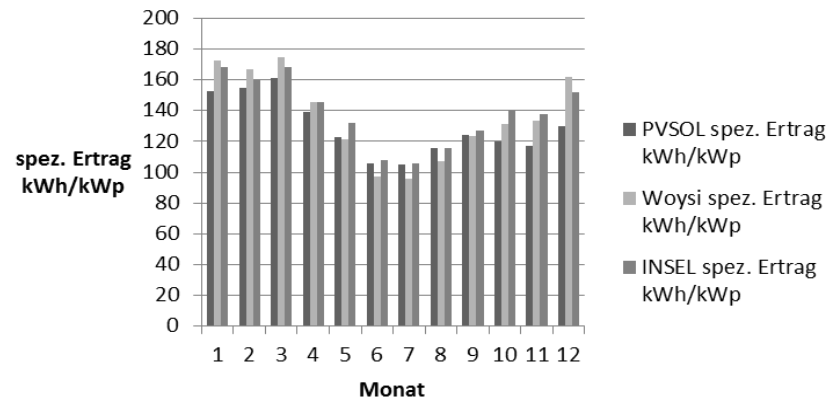


Globalstrahlung Ancona

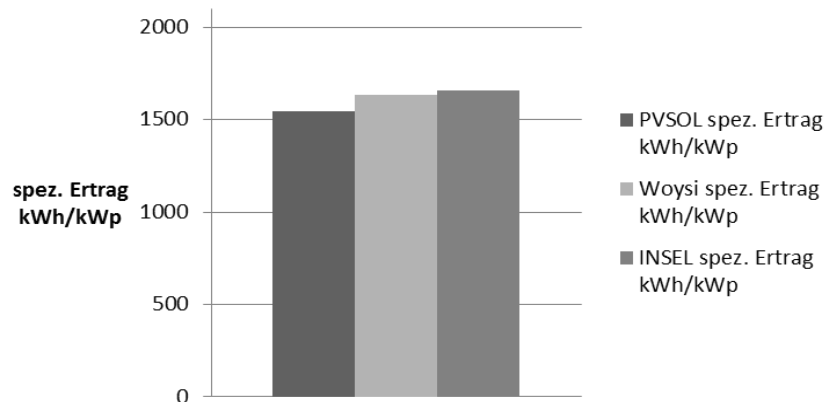


# WoYSi Validierung – Ertrag (Monats- und Jahresmittel) Chennai

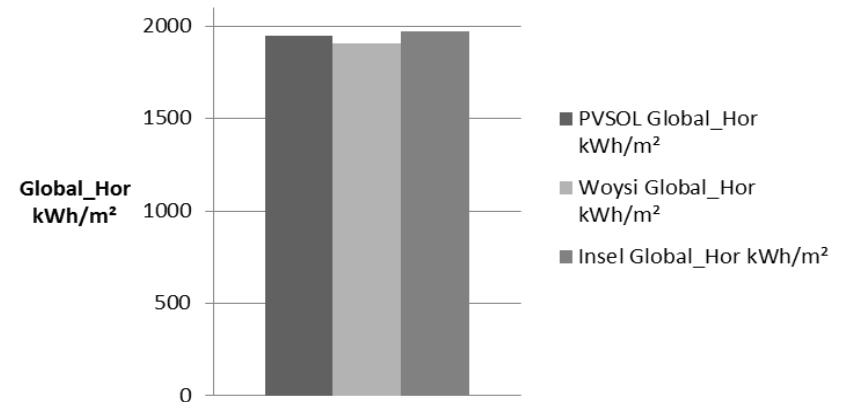
Spezifischer Ertrag Chennai



Spezifischer Ertrag Chennai

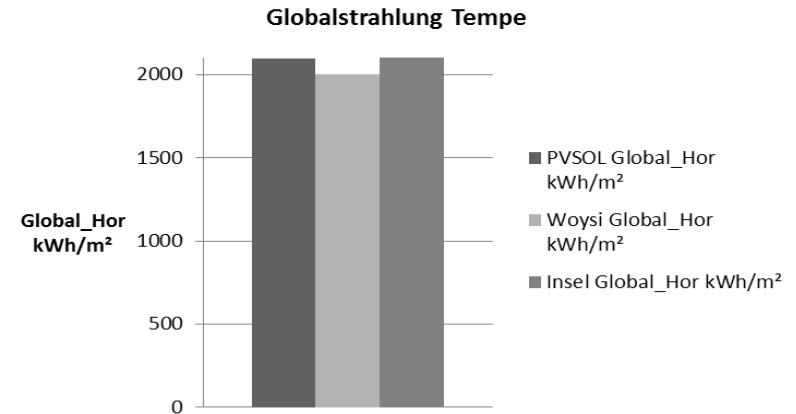
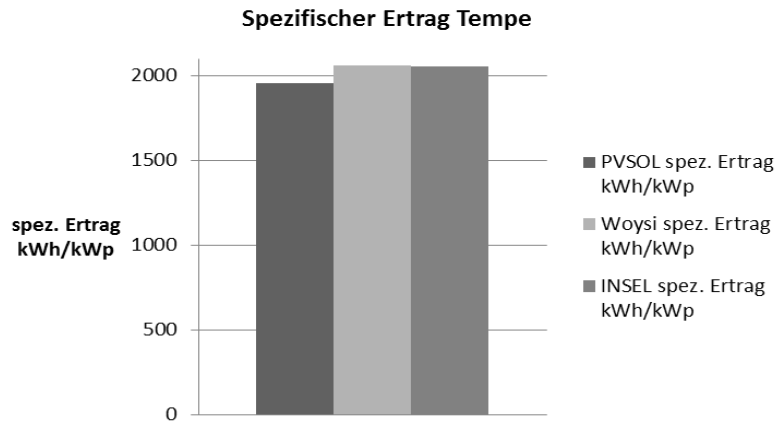
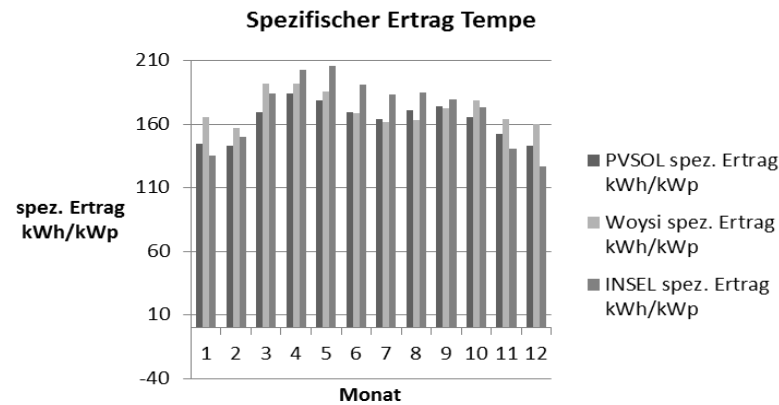


Globalstrahlung Chennai



# WoYSi Validierung – Ertrag (Monats- und Jahresmittel)

## Tempe







## Ausblick – was noch zu tun ist...

- **Berücksichtigung von anderen PV-Technologien**
  - Implementierung von anderen Modellierungsansätzen für die Simulation von Dünnschicht oder anderen PV-Technologien
- **Erweiterung der Berechnung der Zelltemperatur**
  - Berücksichtigung der Montage des PV-Moduls (Freifläche, Aufdach)
  - Berücksichtigung von Strahlungseffekten auf die Zelltemperatur
  - Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit auf die Zelltemperatur
- **Verbesserung der Auflösung**
  - Nutzung anderer spektraler Strahlungsdatensätze (gemessene oder simulierte) mit höherer Auflösung
  - Einfluss spektral relevanter atmosphärischer Parameter (Spurengase, Aerosole,...)
- **Berücksichtigung des Horizonts**
  - Grobe Berücksichtigung des Horizonts je nach Standort (z.B. bergige Landschaften)

### Acknowledgement:

Die Ergebnisse wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten ZIM Kooperationsprojektes “Entwicklung eines Verfahrens zur standort- und zeitbezogenen Ertragsprognose von Photovoltaikmodulen“ unter der Fördernummer KF3211302DF4 erarbeitet.