

# Vergleich von Verfahren zur Abschätzung der Jahreserträge unterschiedlicher PV-Technologien im Rahmen des Projektes Performance – Ergebnisse eines ersten 'Round Robin' Tests

G. Friesen, H.G.Beyer<sup>(1)</sup>, R. Gottschalg<sup>(2)</sup>, S. Williams<sup>(2)</sup>, A. Guerin de Montgareuil<sup>(3)</sup>,  
N. van der Borg<sup>(4)</sup>, A.C. de Keizer<sup>(5)</sup>, W.G.J.H.M. van Sark<sup>(5)</sup>

SUPSI-ISAAC-TISO, Via Trevano, CH-6952 Canobbio-Lugano

Tel./ Fax: +41(0)58-666-6357/-6349

E-Mail: [gabi.friesen@supsi.ch](mailto:gabi.friesen@supsi.ch); Internet: [www.isaac.supsi.ch](http://www.isaac.supsi.ch)

<sup>(1)</sup> Hochschule Magdeburg-Stendal - DE, <sup>(2)</sup> Loughborough University – UK, <sup>(3)</sup> INES  
Cadarache – FR, <sup>(4)</sup> ECN – NL, <sup>(5)</sup> Utrecht University – NL

## 1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Teilprojekts 4 des EU-Projektes PERFORMANCE sollen unter anderem die zur Zeit diskutierten Modellansätze zur Abschätzung des standortabhängigen DC-Jahresertrags von PV-Modulen verglichen und bewertet werden. Dabei werden zum einen die verwendeten Modellierungsverfahren, zum anderen die jeweiligen Verfahren zur Ableitungen der notwendigen Modellparameter aus vorliegenden Messdatensätzen betrachtet. Ziel ist es, die Modellgenauigkeit bis in den Bereich Genauigkeit hochwertiger Messungen zu führen.

## 2 ROUND ROBIN ANSATZ

Um den augenblicklichen Stand und Präzision der in Europa verwendeten Modellierungsansätze zu erfassen, wurde zu Beginn des Projektes ein 'Round Robin'-Test durchgeführt. Grundlage des Tests bilden Sätze von Betriebsdaten verschiedener Modultypen (cSi, aSi, CIS, CdTe) sowie der jeweiligen Betriebsbedingungen (Einstrahlung, Temperatur, etc. ), die an mehreren Instituten und Testinstallationen in Europa (ZSW-DE, INES-FR, ISAAC-CH, CREST-UK, ECN-NL, Solarlab-PL, Helsinki-FL) ermittelt wurden (1-10 Minutenauflösung). Dabei konnten für einige individuelle Module kürzere Datensätze (maximal ein Monat) an mehreren Instituten ermittelt werden. Für Jahresdatensätze wurden hingegen an den unterschiedlichen Instituten baugleiche Module betrachtet. Ein Teil der Datensätze wurde den Teilnehmern zur Ableitung der jeweils benötigten Modellparameter zur Verfügung gestellt. Für den eigentlichen Modelltest wurden aus dabei noch nicht genutzten Datensätzen lediglich die Modultemperatur und die mit einem Pyranometer gemessene Einstrahlung auf Modulebene übermittelt. Daraus waren - je nach Länge der

vorhandenen Datensätze – die täglichen, monatlichen oder jährlichen Erträge der Module abzuschätzen. Mit den vorliegenden Daten lässt sich so zum einen überprüfen, inwieweit sich die unter den meteorologischen Bedingungen eines Standorts ermittelten Modelle grundsätzlich zur Nutzung an anderen Standorten eignen (idealer Fall des identischen Moduls). Zum anderen wird untersucht, inwieweit die Modellierungsgüte durch die Exemplarstreuung der Module beeinflusst wird (realistische Fall baugleicher Module). Der Ansatz dieses erstens Round Robins, mit nur der Modultemperatur und der Einstrahlung auf Modulebene als Input anstatt der üblicherweise benutzten Umgebungstemperatur und der Horizontaleinstrahlungswerte, hat als Ziel sich auf die zuvor beschriebenen Aspekte zu konzentrieren und alle weiteren Fehlerquellen auf ein Minimum zu reduzieren. Auf diese Weise erhält man die Präzision der einzelnen Ertragsprognosemethoden bei Vernachlässigung der Spektral- und Reflektionsverluste. Die nächste Simulationskampagne wird diese Effekte mitberücksichtigen und die verschiedene Ansätze untereinander vergleichen.

### 3 MODELLIERUNGSVERFAHREN

Die untersuchten Modelle basieren entweder auf der Abbildung des aktuellen Modulwirkungsgrades oder direkt der Modulleistung. Beide Angaben lassen sich leicht ineinander überführen. Sie unterscheiden sich in Details der Parametrisierung und der benötigten Eingangsdaten. Aufgrund der hier zur Verfügung stehenden Betriebsparameter mussten die Modelle zum Teil angepasst werden. Die hier untersuchten Modelle sind in Tabelle 1 aufgeführt. Sie werden im folgenden kurz vorgestellt.

Benutztes Modell	angewandt von	Kurzbeschreibung
SSE	CREST	$\eta_{SSC} = r_T \cdot r_G \cdot r_x \cdot \eta_{stc}$
Vereinfachter Ertragssimulator	ECN	$\eta(G, 25^\circ\text{C}), \gamma$
PV-SAT	H2M	$\eta(G, 25^\circ\text{C}), \gamma$
Somes	Univ. Utrecht	$\eta(G, 25^\circ\text{C}), \gamma$
MotherPV	INES	$\eta(G, 25^\circ\text{C}), \gamma$
Matrixmethode	ISAAC	P(G,T)

**Tab. 1:** *Liste der hier untersuchten Modelle, Name der zuständigen Institute, und Kurzcharakterisierung der Modelle.*

#### Matrixmethode

Diese beim ISAAC entwickelte Methode [1] basiert auf einer Matrix, die die Modulleistung in Abhängigkeit von Einstrahlung und Temperatur (Umgebungs- oder Modulrückseiten-temperatur) als Leistungsfläche angibt. Diese Matrix kann in Labor- oder durch

Freifeldmessungen ermittelt werden. Der Ertrag an einem anderen Standort kann über die Multiplikation der Leistungsmatrix mit der jeweiligen Verteilungsmatrix der Betriebsbedingungen abgeschätzt werden. Kern der Methode ist ein Ansatz des Sandia National Laboratories. Die Leistungsmatrix wird über 2 Gleichungen für MPP Strom und Spannung bestimmt.  $I_m = I_{m,STC} \cdot G/1000 \cdot [1 + \alpha_{I_m} \cdot (\Delta T + T - 25)]$  and  $V_m = V_{m,STC} + C_0 \cdot \ln(G/1000) + C_1 \cdot (\ln(G/1000))^2 + \beta_{V_m} \cdot (\Delta T + T - 25)$ , mit G: Einstrahlung auf Modulebene, T: Temperatur,  $I_{m,STC}$ : MPP-Strom @ STC,  $\alpha_{I_m}$ : Temperaturkoeffizient von  $I_m$  @ 1000W/m<sup>2</sup>,  $\Delta T$ : Temperaturdifferenz  $T_{cell} - T$  @ 1000W/m<sup>2</sup>,  $V_{m,STC}$ : MPP-Spannung @ STC,  $C_0$  und  $C_1$ : Modulspezifische Parameter und  $\beta_{V_m}$ : Temperaturkoeffizient von  $V_m$  @ 1000W/m<sup>2</sup>.

### **MOTHERPV**

Das vom CEA entwickelte MotherPV Verfahren (Meteorological, Optical and Thermal Histories for Energy Rating in Photovoltaics). erlaubt in gleicher Weise die Ertragsabschätzung, wenn die Verteilungsfunktion der Betriebsbedingungen bekannt sind. Dabei wird die Modulrückseitentemperatur verwendet. Der Modulwirkungsgrad wird durch folgende Gleichung abgebildet, deren Parameter während einer kurzzeitigen Referenzmessung bestimmt werden können:  $\eta(G) = \eta(G_{ref}) \cdot (1 + \alpha(G) \cdot (T_{bom}(G) - T_{bom,ref}(G)))$ ; mit  $G_{ref}$ : mittlere Einstrahlung während der Referenzmessung,  $\alpha(G)$ : einstrahlungsabhängiger Temperaturkoeffizient,  $T_{bom}(G)$ : mittlere Temperatur für den Ort und Zeitraum der Abschätzung und  $T_{bom,ref}(G)$ : mittlere Temperatur für den Ort und Zeitraum der Referenzmessung.

### **Vereinfachter Ertragsimulator**

Dieses Modell basiert auf dem von ECN entwickelten On-line Simulator [2], einem empirischen Verfahren zur Bestimmung der Wirkungsgradcharakteristiken  $\eta_{mpp}(G, T)$ . Der On-line Simulator ist in der Lage die Modultemperatur und die Einstrahlung in Modulebene aus der horizontalen Einstrahlung und der Umgebungstemperatur zu bestimmen. Da für den Round-Robin-Test Einstrahlung in Modulebene und Modultemperatur vorliegen wurde diese Option hier nicht genutzt, Es wurde hier nur die Wirkungsgradkurve  $\eta_{mpp}(G)$  bei 25°C Modultemperatur mit einer anschließenden Temperaturkorrektur bestimmt.

### **SSE**

Das Verfahren SSE (Site Specific Energy) von CREST beruht auf der RRC Methode und wird in [3] genauer beschrieben. Der Modulwirkungsgrad wird über  $\eta_{SSE} = r_T \cdot r_G \cdot r_X \cdot \eta_{STC}$  bestimmt, wobei  $\eta_{STC}$  den STC Wirkungsgrad @STC angibt. Das Abweichen der

Betriebsbedingungen von STC wird über individuelle Faktoren für Einstrahlung  $r_G$ , Temperatur  $r_T$ . Das Modell kann über  $r_x$  auch weitere Effekte z.B. Einfluss des Spektrums berücksichtigen.

### **PVSAT**

Das PVSAT-Verfahren beruht auf der Abbildung des MPP-Wirkungsgrades über ein 4-parameteriges Modell:  $\eta_{MPP} = a_1 + a_2 G + a_3 \ln(G * m^2 / W) \cdot (1 + \alpha(T_{Module} - 25^\circ C))$ . Die vier Parameter  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  and  $\alpha$  können aus Datenblattangaben oder Betriebsdatensätzen abgeleitet werden [4]. Hier werden die Daten aus den zur Verfügung gestellten Betriebsdaten abgeleitet.

### **SOMES**

Das SOMES Simulationsmodell wurde zur technischen und ökonomischen Analyse von elektrizitaetserzeugenden Systemen entwickelt, die auch Technologien wie Windkraft und/oder Solarenergie, (elektrische) Energiespeicher und Dieselgeneratoren, oder eine Netzanbindung beinhalten. Dieses, von der Universität Utrecht entwickelte Verfahren [5] beruht auf einer Unterteilung der Wirkungsgrade  $\Theta(I_k)$  in Klassen von  $100 \text{ W/m}^2$ . Eine nicht temperaturkorrigierte Leistung wird ausgehend von der STC Nennleistung  $P_{nenn}$  über:  $P_t = P_{nenn} \cdot \Theta(I_t) / \Theta(1000) \cdot I_t / 1000$  ermittelt, wobei der Wirkungsgrad  $\Theta(I_i)$  für die aktuelle Einstrahlung  $I_i$  durch Interpolation aus der Wirkungsgradtabelle bestimmt wird. Die so ermittelte Leistung wird durch Multiplikation mit  $(1 + Tcoeff \cdot (T - 25))$  für die aktuelle Modultemperatur korrigiert. Für Tcoeff wird der Wert  $0.4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  verwendet. Die Tabelle der Einstrahlungsabhängigen Wirkungsgrade kann, nach Anwendung der Temperaturkorrektur aus den vorliegenden Messwerten bestimmt werden. Dabei wird bei der Bestimmung der Klassenwerte eine Toleranz von  $\pm 5 \text{ W/m}^2$  verwendet.

## **4 ROUND ROBIN ERGEBNISSE**

### **4.1 Identische Module gemessen in 4 verschiedenen Orten**

Bei diesem Vergleich wurden Module verschiedener Technologien (sc-Si, mc-Si, CIS, a-Si) zunächst an einem Standort (Cadarache) für ein Jahr vermessen. Die Daten der Leistung und der Betriebsbedingungen wurden zur Bestimmung der Parameter der Modelle genutzt. Anschließend wurden die Module für maximal 4 Wochen an 3 anderen Standorten betrieben (Wroclaw, Petten, Loughborough). Der Energieertrag war für diese Betriebsbedingungen anzugeben. Für die Modultypen und Standorte wird im folgenden die Modellierungsgüte des Ertrags dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass für Cadarache die Daten zur Bestimmung der Parameter und die Zieldaten identisch waren.

### Mono-kristallines Siliziummodul (sc-Si)

Abb.1 zeigt die Ergebnisse für das sc-Si Modul. Wie zu erwarten sind für Cararache die Fehler gering (Abweichungen <1%, im Mittel 0.1%) Für Wroclaw und Petten ist der modellierte Ertrag im Mittel 1.6% geringer als der gemessene. Für Loughborough, das gegenüber Cardarache die abweichendsten meteorologischen Bedingungen aufweist, treten etwas höhere Fehler auf. Alle Verfahren zeigen Unterschätzungen des Ertrags (-4.3% im Mittel, Maximum -6.5%) Der Mittelwert für alle drei Testorte beträgt -2.5%.

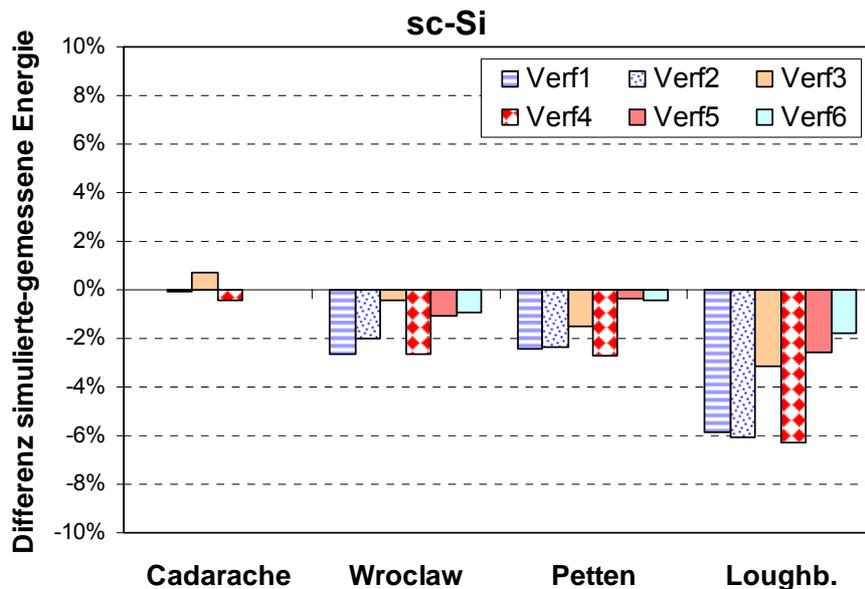


Abb. 1: Fehler der Ertragsmodellierung für ein sc-Si Modul an verschiedenen Testorten.

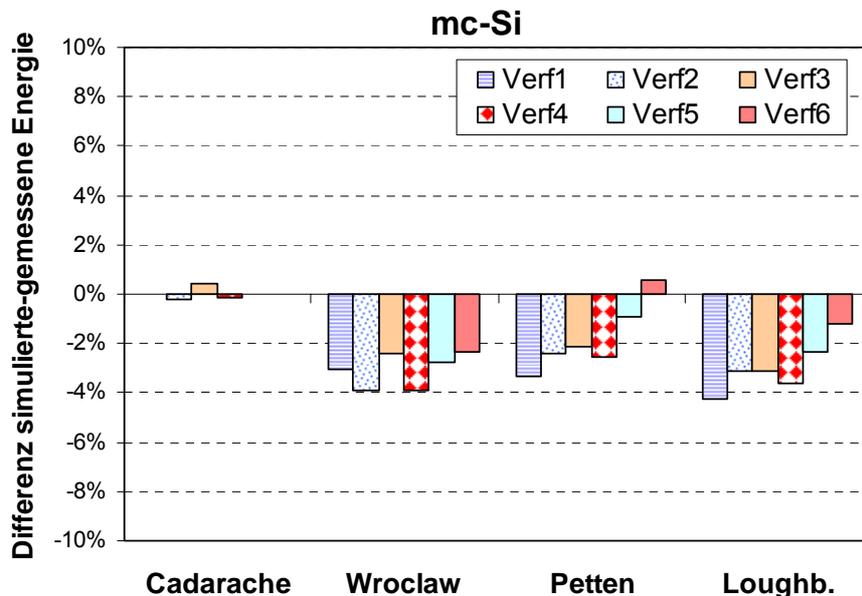


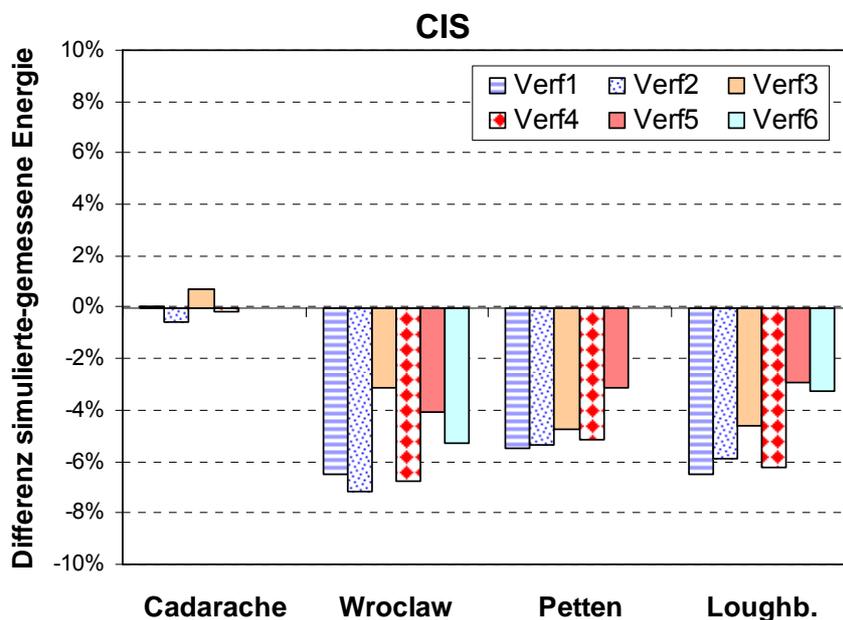
Abb. 2: Fehler der Ertragsmodellierung für ein sc-Si Modul an verschiedenen Testorten

## Multi-kristallines Siliziummodul

Abb.2 zeigt die Ergebnisse für das mc-Si Modul. Diese gleichen denen für das sc-Si Modul. Der mittlere Fehler für Cadarache ist kleiner 0.1%. Für die anderen Standorte ergibt sich eine Unterschätzung des Ertrags von bis zu -4%. Die mittleren Fehler für Wroclaw und Loughborough liegen bei etwa -3%, für Petten bei -1.8%. Der Mittelwert für alle Testorte liegt bei -2.6%.

## CIS Modul

Abb.3 zeigt die Ergebnisse für das CIS Modul. Für Cardarache ist der Fehler wieder nahezu Null. Ebenso zeigt sich wieder eine generelle Unterschätzung für die anderen Standorte. Die Fehler liegen zwischen 3-7% bei einem Mittel von 5.1%.

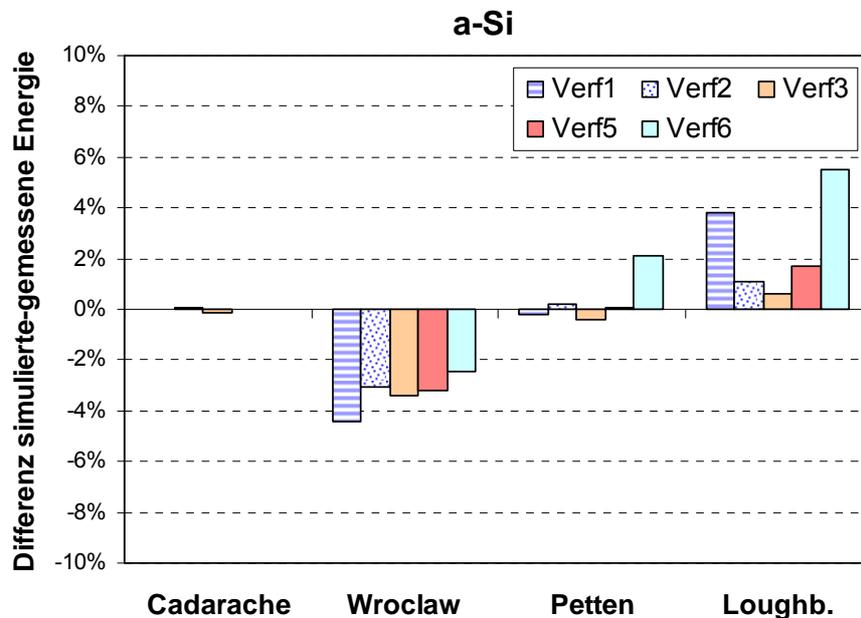


**Abb. 3:** Fehler der Ertragsmodellierung für ein CIS Modul an verschiedenen Testorten.

## a-Si Modul

Die Modellierung des Ertrags von amorphen Siliziummodulen wird u.A. durch das deutliche Auftreten zyklischer Degradationserscheinungen (Staebler-Wronsky Effekt) erschwert. Im Rahmen des hier vorgestellten Vergleichs wurde dieser Effekt bisher von keinem Modell berücksichtigt. Trotz dieses Mangels blieben die Modellierungsfehler im Bereich von  $\pm 6\%$  Siehe Abb.4. Der Ertrag in Wroclaw wird allgemein unterschätzt, für Petten und Loughborough treten Überschätzungen auf. Es ist hier anzumerken, dass die Basisdaten in Cadarache im Frühjahr erfasst wurden, der Betrieb in Wroclaw im Sommer, in Petten in Spätsommer und in Loughborough im Herbst. Es kann angenommen werden, dass die

Fehler durch die unterschiedlichen momentanen und mittleren Temperaturbedingungen sowie unterschiedlichen spektralen Charakteristiken der jeweiligen Einstrahlung zu begründen sind. Das Verhalten der Modelle ist hier etwas ungleichmäßiger als für die anderen Modultypen. Verf1 and Verf6 zeigen für Loughborough und Verf6 für Petten einen erhöhten Fehler.



**Abb. 4:** Modellfehler für das a-Si Modul an den verschiedenen Testorten.

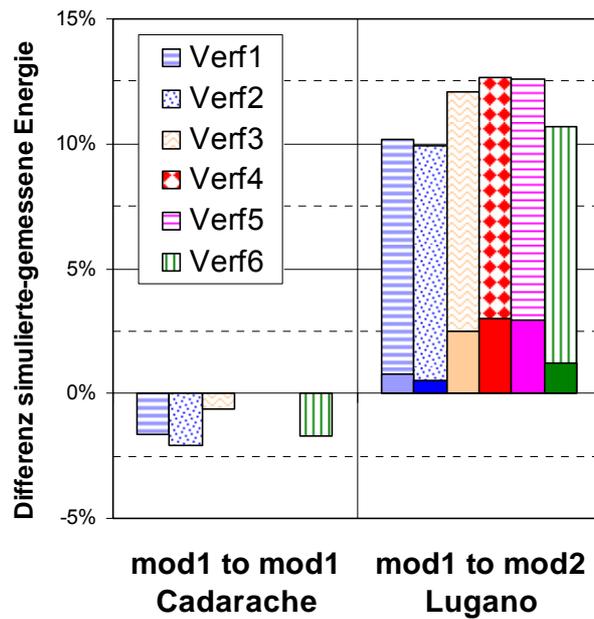
## 4.2 Baugleiche Module gemessen in jeweils 2 Orten

Im Unterschied zu dem bisher beschriebenen Vergleich wird nun die Modellierungsgüte für lediglich typgleiche Module untersucht. Dabei wird der Vergleich zunächst unter der Annahme durchgeführt, dass Referenz- und Testmodul identische Charakteristiken, insbesondere identische STC-Leistungen haben. In einem zweiten Schritt wird die Abweichung der STC-Leistungen von Referenz und Testmodul berücksichtigt.

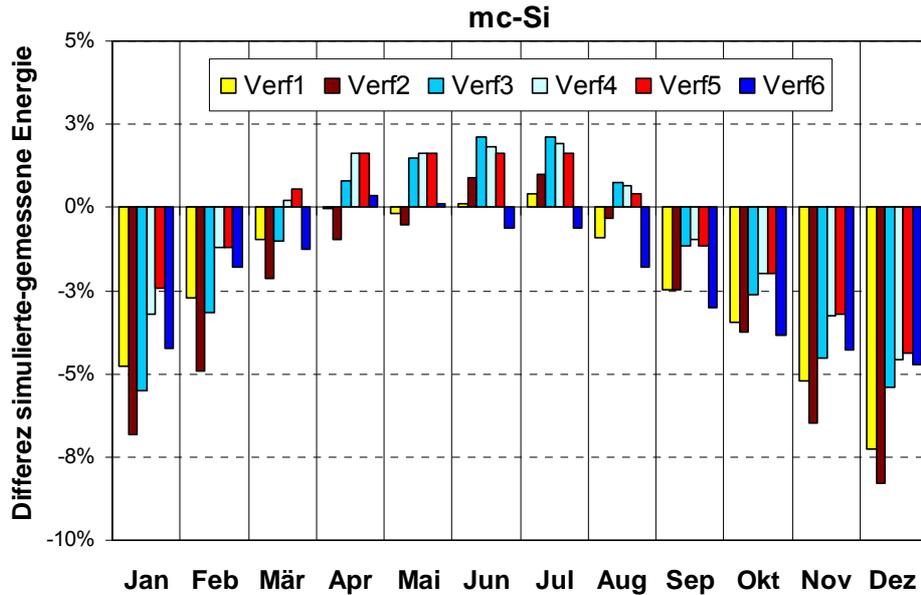
### mc-Si Module (Cadarache/Lugano)

Abb. 5 zeigt die Fehler des modellierten Jahresertrags zweier baugleicher mc-Si Module. Die Modellierung für Modul1 erfolgte für den Datensatz (Cadarache) der auch der Modellentwicklung diente. Es treten hier Fehler von max. -2% auf. Die Darstellung der Fehler der Modellierung der monatlichen Erträge zeigt das sich die Abbildung des Betriebsverhaltens in den Wintermonaten als am problematischsten erweist. Die hier generelle Unterschätzung des Ertrags durch alle Modelle zeigt, das hier noch ein Verbesserungspotential vorhanden ist. Ein mit einem Modell versuchsmässig durchgeführter

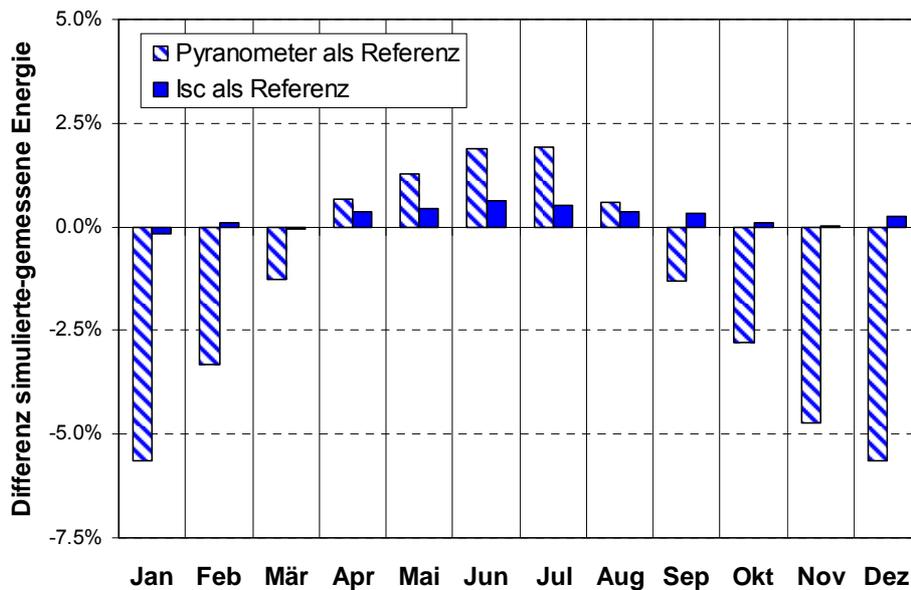
Test, bei dem statt der über ein Pyranometer erfassten Einstrahlung der Kurzschlussstrom des Moduls als Eingangswert der Modellierung verwendet wurde, weist deutlich geringere Modellfehler auf (Abb.6). Dies deutet darauf hin, dass die explizite Modellierung von Reflektionsverlusten und Spektraleffekten weiter zu verfolgen ist. Für Modul 2, betrieben in Lugano sind jeweils 2 Modellfehler angegeben. Ohne Korrektur der STC-Leistung treten Fehler des Jahresertrages >10% auf. Nach Korrektur der STC-Leistung (für Lugano 8.6% kleiner als für Cardarache) reduziert sich der Modellfehler auf < 2.5% (1.6% im Mittel).



**Abb. 5:** Fehler der Modellierung des Jahresertrags für mc-Si Module. Modul 1 diente der Parameterermittlung. Für Modul2 sind die Fehler bei direkter Verwendung der Parameter durch Modul1 (gemusterte Balken) sowie bei Korrektur der STC-Leistung auf den Messwert des Moduls 2 gegeben.



**Abb. 6:** Fehler der modellierten Monatserträge für Modul1.

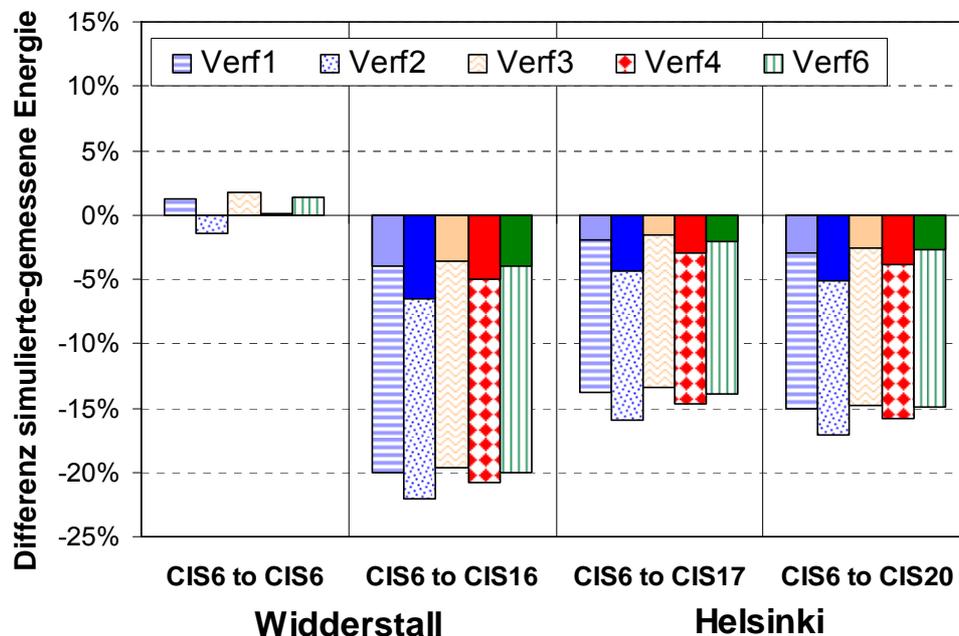


**Abb. 7:** Monatliche Modellfehler des Verf3 bei Verwendung des Pyranometermesswertes (schraffiert) und des Kurzschlussstromes als Modelleingang.

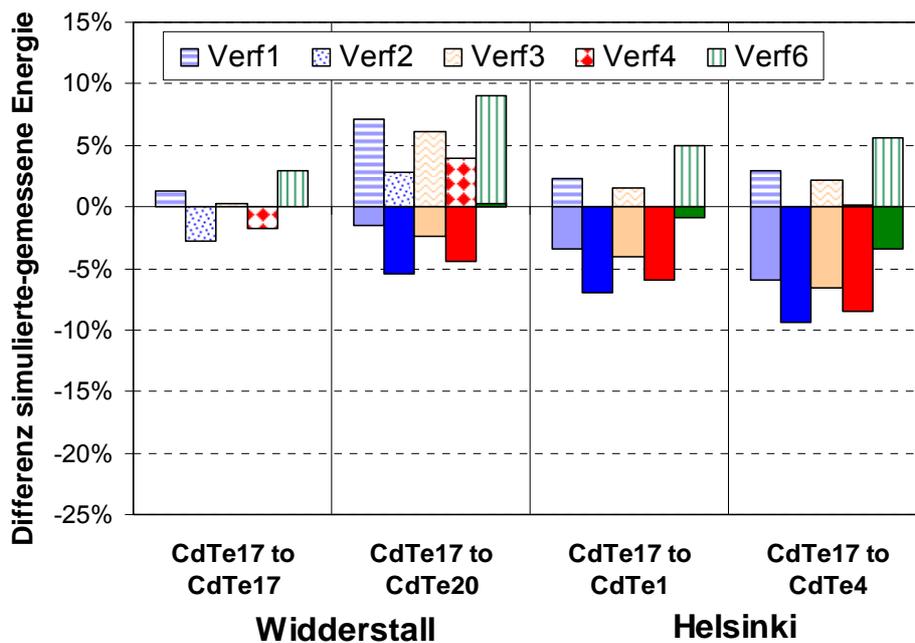
### Dünnschichtmodule (Widderstall/Helsinki)

In gleicher Weise wurden die Erträge zweier Typen von Dünnschichtmodulen (CdTe und CIS) modelliert. Die Referenzmessung geschah hier am Testort Widderstall. Baugleiche Module wurden in Widderstall und in Helsinki betrieben. Aufgrund der Schneeverhältnisse wurde die Analyse lediglich für die Monate April bis September durchgeführt. Die Ergebnisse

sind in Abb. 8 für die CIS-Module und in Abb.9 für die CdTe Module gegeben. Die Modellierung des Referenzmoduls zeigt erneut nur geringe Fehler (Mittelwert von 0.3% für CIS und -0.6% für CdTe). Für die Übertragung auf die typgleichen Module zeigt sich für CIS ein qualitativ ähnliches Muster wie für die mc-Si Module zuvor. Nach Korrektur der Nennleistung liegt der Modellfehler hier bei ~-5%. Für die CdTe Module ergibt sich ein weniger eindeutiges Muster. Die Korrektur der Nennleistung führt hier zu zum Teil schlechteren Modellierungsergebnissen. Dies deutet auf eine erhöhte Exemplarstreuung des hier verwendeten Modultyps hin, dessen Produktion sich noch in einer Optimierungsphase befand. Dies wurde auch durch eine Bestimmung der Strom-Spannungs-Charakteristiken dieser Module bestätigt.



**Abb. 8:** Fehler der Ertragsmodellierung (April–September) baugleicher CIS-Module in Widderstall und Helsinki. Modul6 diente der Parameterbestimmung. Die Fehlerangaben für Modul 16,17 und 20 sind mit und ohne STC-Korrektur angegeben (wie für Modul 2 in Abb. 5).



**Abb. 9:** Fehler der Ertragsmodellierung (April–September) baugleicher CdTe-Module in Widderstall und Helsinki. Modul 17 diente der Parameterbestimmung. Die Fehlerangaben für Modul 20, 1 und 4 sind mit und ohne STC-Korrektur angegeben (wie für Modul 2 in Abb. 5).

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse des Rond-Robin-Tests lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für den Fall, dass der Ertrag für einen zur Modellanpassung verwendeten Datensatzes direkt zu modellieren ist, treten Fehler von  $\sim 0.1\%$  auf. Dieser Wert bezieht sich auf Datensätze einer Länge von 1-4 Wochen, wobei keine Winterdaten betrachtet wurden. Jährliche Erträge werden mit  $\sim 1\%$  Genauigkeit abgebildet. Eine monatlich aufgelöste Betrachtung zeigt, dass sich für die Wintermonate die größten relativen Fehler ergeben.
- Die Ertragsmodellierung typgleicher Module zeigt aufgrund der Exemplarstreuung höhere Fehler. Hier wirkt sich insbesondere die Variation des STC-Leistung der Module aus. Eine genauere Modellierung setzt hier Kenntnisse über die Größe dieser Streuung voraus. Ohne Kenntnis der aktuellen Daten müsste hier mit statistischen Annahmen über die Verteilung der Exemplarwerte gearbeitet werden.
- Auch nach Korrektur der Leistungsdaten zeigt sich für die Technologien c-Si, CIS und CdTe für alle analysierten Rechenverfahren eine Tendenz zur Unterschätzung der Erträge. Für c-Si Module liegt der Fehler bei  $-3\%$ , für CIS und CdTe Module bei  $-5\%$ .
- Für a-Si Module ist die Modellierung aufgrund saisonaler Änderungen erschwert. Hier macht sich insbesondere das Fehlen spektral aufgelöster Einstrahlungsdaten bemerkbar.

Die Fehler in der Ertragsmodellierung bleiben trotzdem mit Werten von  $\pm 6\%$  im Bereich der für die anderen Modultypen erreichten Verfahrensgüte.

- Die Studie zeigt, dass im Bereich der Modellierung von Spektraleffekten sowie der Reflektionsverluste ein nicht zu vernachlässigbares Optimierungspotential besteht. Die nächste Vergleichskampagne wird sich deshalb auf diese Effekte konzentrieren.
- Um die genannten Fehlergrößen, die sich im Bereich  $< 5\%$  bewegen belastbarer zu erhalten stellt sich außerdem die Anforderung, die Ungenauigkeiten der Datenaufnahme bei den Referenz- und Testmessungen genauer als bisher zu quantifizieren. Dieses Thema ist Momentan in Bearbeitung und erste Ergebnisse wurden schon publiziert [6].

## LITERATUR

- [1] R.P. Kenny, G. Friesen, et al, "Energy rating of PV Modules: Comparison of Methods and Approach", WCPEC, Osaka (2003).
- [2] <http://www.ecn.nl/solar/yield/index2.html>
- [3] A. Raicu, et al, "Annual and Seasonal Energy Rating of mono-Si, a-Si and GaAs Test Cells for the USA by the RRC Method", IEEE PVSC, (1991).
- [4] H.G. Beyer, et al, "Identification of a General Model for the MPP Performance of PV-Modules for the Application in a Procedure for the Performance Check of Grid Connected Systems", 19th EUPVSEC, Paris (2004).
- [5] Dijk, V.A.P. van, E.A. Alsema - SOMES version 3.0; Technical Reference Manual – Report 92009, Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, Utrecht (1992).
- [6] S.R. Williams, R. Gottschalg, et al, "Accuracy of European Energy Modelling Approaches", 21st EUPVSEC, Dresden (2006).