

## **Reales und simuliertes Betriebsverhalten von drei netzgekoppelten PV-Anlagen am gleichen Standort**

F.Hilmer, K.Vajen, A.Balzar, T.Bozic, P.Stumpf, H.Ackermann, W.Fuhs, O.Melsheimer  
Universität Marburg, FB Physik, D-35032 Marburg

### ***Zusammenfassung:***

**Drei netzgekoppelte PV-Anlagen mit Modulen verschiedener Hersteller wurden mit hoher Zeitaufösung vermessen. Die Betriebsergebnisse des Jahres 1993 werden vorgestellt. Aus Messungen der Generatorkennlinien und der Kurzschlußströme bei natürlichen Umgebungsbedingungen wurden die Parameter für ein Ein-Dioden-PV-Modell festgelegt, mit dem das Betriebsverhalten der Generatoren beschrieben wird. Aus den Messungen bei Normalbetrieb haben wir den Wärmeübergangskoeffizienten für die thermische Beschreibung des Generators bestimmt. Die im Punkt maximaler Leistung (MPP) gemessenen Minuten-Mittelwerte werden mit den errechneten Werten verglichen. Bei nicht zu kleinen Einstrahlungen liegt die Standardabweichung zwischen berechneter und gemessener Leistung je nach Generator bei 5-10%. Die errechnete Energie übertrifft die 1993 gelieferte Energie um 3-12%. Bei Bestimmung der Modellparameter aus Herstellerangaben statt aus Messungen liefert die Rechnung sogar um 20-30% größere Jahresenergien als gemessen.**

### **1. Einleitung**

Viele Photovoltaik-Anwendungen, wie zum Beispiel photovoltaisch betriebene Pumpen, lassen sich mathematisch nur mit nichtlinearen Modellen beschreiben. Simulationsrechnungen müssen dann mit kleinen Zeitschritten durchgeführt werden. Dazu wird ein Modell benötigt, das genaue Kennlinien eines PV-Generators bei zeitlich hoher Auflösung liefert.

In der Literatur sind eine Vielzahl von Modellen beschrieben, die den Generator als eine Parallelschaltung aus einer globalstrahlungsabhängigen Stromquelle und ein oder zwei Dioden beschreiben. Einen Überblick gibt z.B. /TOW89/. Auch in jüngeren Veröffentlichungen (/LAW94/,/NEG93/,/SUM91/) wird mit ähnlichen Modellen gearbeitet. Diese Modelle werden zumeist benutzt, um die gelieferte elektrische Energie eines PV-Generators in Stunden- oder Tagesintervallen vorherzusagen. Wir haben untersucht, wie gut sich mit einem solchen Modell Meßdaten in Minuten-Auflösung reproduzieren lassen. Dazu haben wir ein Modell aus /TOW89/ ausgewählt, das ein Ersatzschaltbild mit einer Diode verwendet.

### **2. Anlagenbeschreibung**

Die PV-Anlage, auf die sich unsere Simulationsrechnungen beziehen, besteht aus drei Generatoren im Netzparallelbetrieb mit Modulen verschiedener Hersteller. Die Nennleistung beträgt insgesamt 5 kW<sub>p</sub>. Alle Generatoren sind auf demselben Dach installiert (Orientierung: 30° nach Osten, Neigung: 16°), so daß identische Umgebungsverhältnisse vorliegen. Die Anlagendaten gehen aus Tabelle 1 hervor.

Ein PC-gestütztes Meßwerterfassungssystem registriert seit Dezember 1992 kontinuierlich solare Einstrahlung, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Systembetriebsdaten. Für jede Anlage getrennt werden Spannung, Stromstärke, Leistung am Eingang des Wechselrichters, eingespeiste Leistung und Modultemperatur gemessen. Es werden in den Sommermonaten 1-min-Mittelwerte, sonst 2- oder 5-min-Mittelwerte gespeichert.

Die 1993 ins Netz eingespeiste Energie und die Jahres-Wirkungsgrade von Generator und Wechselrichter der drei Anlagen sind in Tab.1 zusammengestellt.

<b>Anlagenkenngrößen</b>				
Modultyp		BP 252	Kyocera LA 361K51	Siemens M55S
Zellenmaterial		monokrist. Si	polykrist. Si	monokrist. Si
Nennleistung	Wp	1284 (1664)	1430 (1632)	1498 (1696)
Verschaltung		32 Module, davon je 4 in Serie		
Ges. Modulfläche	m <sup>2</sup>	(14,150)	(14,426)	(13,758)
Nennwirkungsgrad	%	9,1 (11,8)	9,9 (11,6)	10,9 (12,4)
Wechselrichter		NEG1500 mit MPP-Tracking, Fa. UFE		
<b>Meßergebnisse 1993</b>				
mittl. Generatorwirkungsgrad	%	8,34	8,82	9,44
mittl. Wechselrichterwirkungsgrad	%	86,0	87,4	87,9
eingespeiste Energie	Wh/Wp	653	729	732
<b>Modellparameter</b>				
$I_{ph,ref}$	A	20,9± 0,8 (28,3)	23,2± 1,1 (26,0)	23,0± 0,9 (26,8)
$\mu_{sc}$	A/K	0,0523± 0,0088 (0,035)	0,0591± 0,084 (0,0208)	0,0179± 0,002 (0,0312)
$I_{o,ref}$	µA	2,55± 0,44 (82,18)	0,151± 0,369 (4,799)	0,609± 0,126 (13,88)
A		1,46± 0,28 (1,798)	1,22± 0,15 (1,478)	1,34± 0,07 (1,621)
$R_s$	Ω	0,284± 0,558 (0,143)	0,307± 0,078 (0,112)	0,173± 0,030 (0,112)
$U_{l,m}$	W/m <sup>2</sup> K	27,7	26,9	28,0
$U_{l}(vw)$ (vw in m/s)	W/m <sup>2</sup> K	19,7+ 5,2 vw	19,6+ 4,8 vw	20,5+ 5,0 vw
<b>Gesamtenergie 1993 am Wechselrichtereingang: (Edc.sim-Edc.mes)/Edc.mes</b>				
Variante A (Param. aus Messung)	%	3,2	12,0	8,3
Variante B (Herstellerparameter)	%	29,5	21,7	20,2

Tab. 1: Anlagendaten, Modellparameter und Ergebnisse für die drei PV-Generatoren. Aus Herstellerangaben ermittelte Angaben stehen in Klammern.

### 3. Das mathematische Modell

Das Modell für den Generator beschreibt Spannung  $U$  und Strom  $I$  am Wechselrichtereingang bei gegebener Einstrahlung  $G$  und Zelltemperatur  $T_c$ . Grundlage ist das in Abb.1 gezeigte Ersatzschaltbild. Es setzt voraus, daß alle PV-Zellen eines Generators identisch sind.

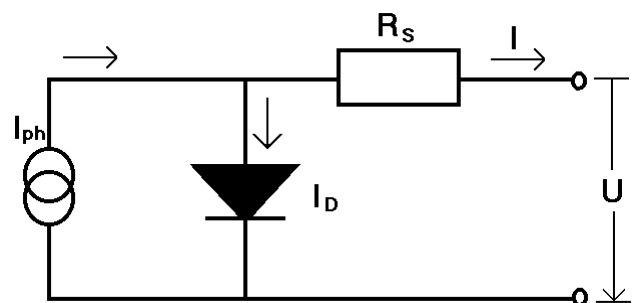


Abb. 1: Ersatzschaltbild 1-Dioden-Modell

Folgende Gleichung gibt das Ersatzschaltbild wieder:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{\text{ph}}(\mathbf{G}, T_c) - \mathbf{I}_0(T_c) \left[ \exp\left(\frac{e(\mathbf{U} + \mathbf{I}R_s)}{N A k T_c}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Die Photostromstärke  $I_{ph}$  wird proportional zur Globalstrahlung  $G$  angenommen, wobei der Proportionalitätsfaktor linear von der Zelltemperatur  $T_c$  abhängt:

$$I_{ph}(G, T_c) = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph, ref} + \mu_{Isc}(T_c - T_{c, ref})] \quad (2)$$

Die Temperaturabhängigkeit des Dioden-Sättigungssperrstroms  $I_0$  ist gegeben durch:

$$I_0(T_c) = I_{0, ref} \left( \frac{T_c}{T_{c, ref}} \right)^3 \exp \left[ - \frac{E_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{c, ref}} \right) \right] \quad (3)$$

Die generatorspezifischen Parameter in diesem Modell sind  $I_0$  und  $I_{ph}$  bei Referenzbedingungen, der Idealitätsfaktor  $A$ , der Serienwiderstand  $R_s$  sowie der Temperaturkoeffizient der Referenz-Photostromstärke  $\mu_{Isc}$ . Die Parameter können aus Messungen oder aus Herstellerangaben bestimmt werden. Beide Methoden haben wir angewandt (s. Kap. 4). Wenn die Parameter bekannt sind, liefert das Modell für gegebenes  $G$  und  $T_c$  die Generatorkennlinie.

In der Regel ist bei Simulationsrechnungen die Zelltemperatur  $T_c$  nicht bekannt und muß aus den Umgebungsbedingungen berechnet werden. Wir betrachten die Wärmeströme stationär. Dies ist sinnvoll, da die Güte des Modells durch Fehler bei der Bestimmung von  $T_c$  kaum beeinflusst wird, wie weiter unten noch deutlich wird. (Beispiel: bei  $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $T_c=40^\circ\text{C}$  liefert das Modell eine Änderung der MPP-Leistung mit der Zelltemperatur von  $0,5 \text{ %/K}$ ). Damit lautet die Leistungsbilanz des Generators:

$$G \cdot A_{cell} = P_{dc} + P_l \quad (4)$$

Analog zu /TOW89/ setzen wir  $(\tau\alpha)=0,9$ .

Geht man davon aus, daß der Generator in der Nähe des MPP betrieben wird, so kann man im thermischen Modell den Generatorwirkungsgrad  $\eta_{Nenn}$  näherungsweise als konstant annehmen. Die Verlustleistung  $P_l$  ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Zelle und Umgebung. Dann wird (4) zu:

$$G \cdot A_{cell} = \eta_{Nenn} \cdot G \cdot A_{cell} + U_l \cdot A_{cell} \cdot (T_c - T_a) \quad (5)$$

Die Rechnungen haben wir sowohl mit einem konstanten, mittleren Wärmeübergangskoeffizienten  $U_{l,m}$  als auch mit einem linear von der Windgeschwindigkeit  $v_w$  abhängigen Wärmeübergangskoeffizienten  $U_l(v_w)$  durchgeführt.

## 4. Bestimmung der Modellparameter

### a) Generator

In /TOW89/ ist eine Methode angegeben, um aus wenigen vom Modulhersteller gegebenen Daten ( $I_{sc,ref}$ ,  $U_{oc,ref}$ ,  $I_{mp,ref}$ ,  $U_{mp,ref}$ ,  $\mu_{Isc}$ ,  $\mu_{Uoc}$ ) die Modellparameter zu bestimmen. Wir haben jedoch die Parameter aus Messungen bei natürlichen Umgebungsbedingungen bestimmt. Zunächst wurden Kurzschlußstrom-Messungen über einen großen Bereich von Einstrahlung und Zelltemperatur durchgeführt. Dabei wird ausgenutzt, daß der Kurzschlußstrom annähernd gleich der Photostromstärke  $I_{ph}$  ist und daher aus diesen Messungen  $\mu_{Isc}$  bestimmt werden kann (Vergl. (2)). Abb.2 zeigt am Beispiel des Kyocera-Generators die Abhängigkeit der auf Referenzeinstrahlung bezogenen Photostromstärke von der Temperatur.

Die restlichen Modellparameter haben wir aus Kennlinienmessungen bestimmt. Die verwendeten Wechselrichter bieten die Möglichkeit, den wesentlichen Teil der Generatorkennlinie direkt zu messen. Solche Kennlinienmessungen wurden an mehreren Tagen bei verschiedenen Einstrahlungen und Zelltemperaturen durchgeführt. Für jede Messung wurden die Parameter  $I_{ph}$ ,  $A$ ,  $I_0$  und  $R_s$  bestimmt, indem die Kennlinie nach (1) an die Meßpunkte angepaßt wurde. Die Parameter  $I_{ph}$  und  $I_0$  wurden dann nach (2) und (3) auf Referenzbedingungen umgerechnet. Die gemittelten Parameter sind ebenfalls in Tab.1 wiedergegeben, zum Vergleich sind auch die aus Herstellerangaben ermittelten Daten in Klammern aufgeführt.

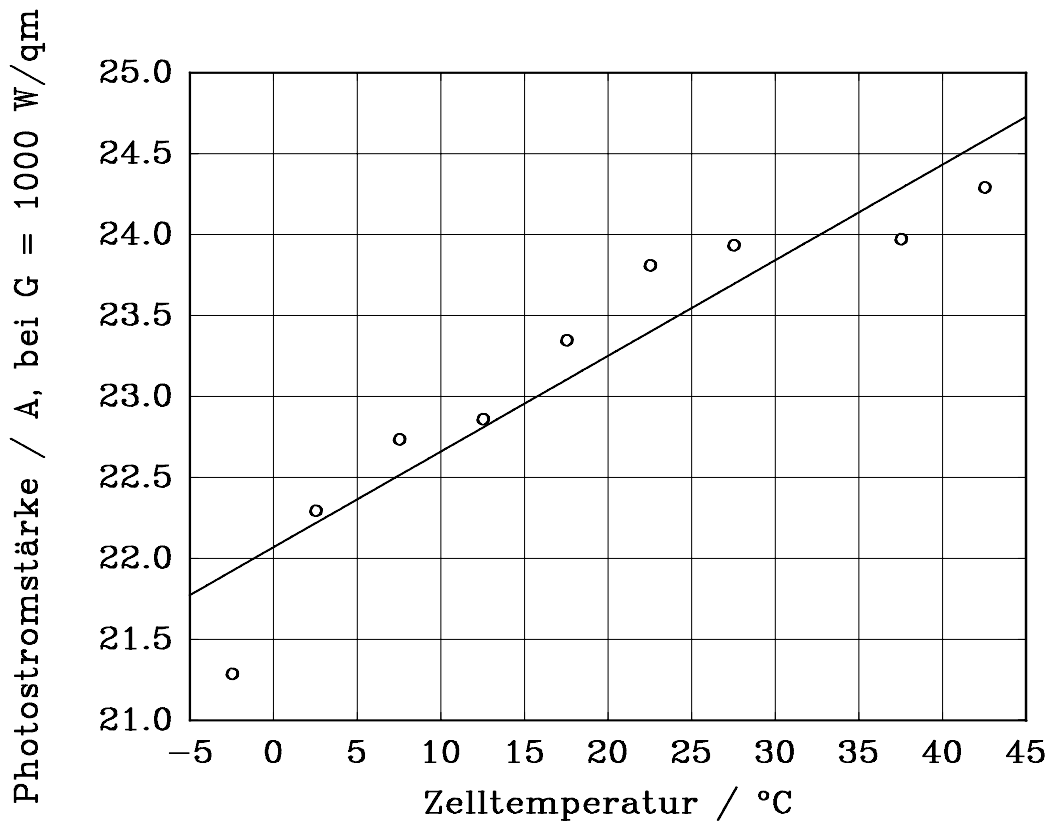


Abb. 2: Ergebnis der Photostrommessungen am Kyocera-Generator. Die Punkte sind aus allen Meßwerten bei den entsprechenden Zelltemperaturen gebildet. Aus der eingezeichneten Regressionsgeraden folgt der Temperaturkoeffizient des Photostroms.

Abb.3 zeigt Beispiele von gemessenen und berechneten Kennlinien des Siemens-Generators. Zum Vergleich sind die berechneten Kennlinien mit den aus Messungen bestimmten Parametern und mit den aus Herstellerangaben ermittelten Parametern gezeigt.

Die aus Herstellerangaben ermittelten Kennlinien überschätzen die gelieferte Generatorleistung erheblich. Zum Beispiel ist die Nennleistung des Siemens-Generators nach unseren Messungen 12% kleiner als die Herstellerangabe. Dafür gibt es mehrere denkbare Ursachen:

- die Herstellerangaben beziehen sich auf Labormessungen bei idealen Bedingungen hinsichtlich des Strahlungsspektrums, des Einfallswinkels, der Strahlungsintensität und der Zelltemperatur. Die Übertragung auf reale Betriebsverhältnisse ist zwangsläufig mit Fehlern behaftet, wenn diese weit von den Laborbedingungen entfernt sind.

- Leitungs- und Verschaltungsverluste reduzieren die gelieferte Leistung. Eine Abschätzung im MPP bei  $G=800 \text{ W/m}^2$  liefert für die hier betrachtete Anlage Verluste von unter 2% der Generatorleistung.
- Die Fertigungsstreuung der Moduleigenschaften sowie die nicht genau parallele Ausrichtung der Module reduzieren die Leistung ebenfalls.

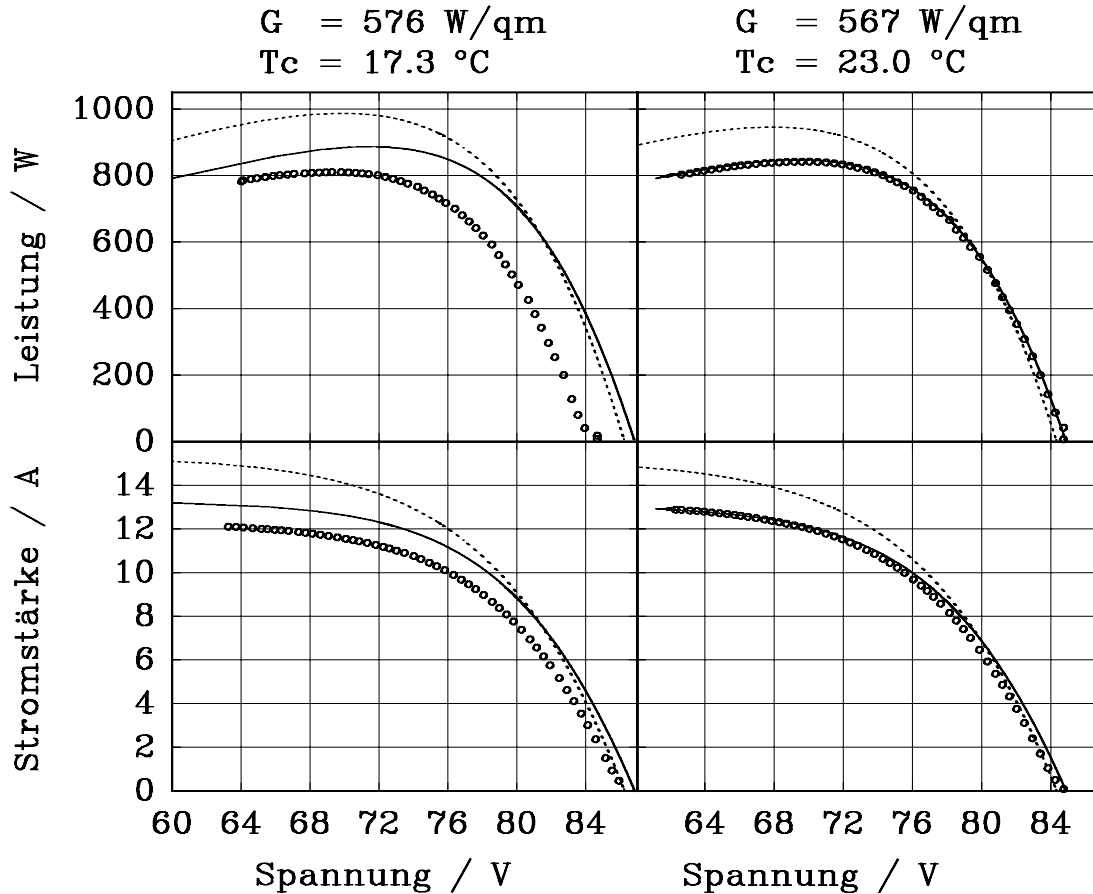


Abb. 3: Zwei Beispiele für gemessene und gerechnete Kennlinien (Siemens-Generator). Die Punkte zeigen die Meßwerte. Die durchgezogenen Linien sind mit den aus allen Kennlinienmessungen gemittelten Parametern berechnet, die gestrichelten Kennlinien mit den aus Herstellerangaben berechneten Parametern. Die Abweichungen zwischen Meßwerten und Modellkennlinien liegen bei den anderen Messungen zwischen den Abweichungen der Beispiele in der Abbildung.

b) Wärmeübergangskoeffizient:

Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden aus gemessenen 10-min-Mittelwerten bestimmt. Die für jeden Meßpunkt nach (4) berechnete Verlustleistung wurde nach der gemessenen Windgeschwindigkeit klassifiziert. In jeder Windgeschwindigkeitsklasse wurde dann durch lineare Regression ein Wärmeübergangskoeffizient  $U_{l,vw}$  berechnet. Die Werte liegen zwischen  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei Windstille und  $45 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei  $5 \text{ m/s}$  Windgeschwindigkeit. Die mit der Anzahl der Werte pro Klasse gewichtete Mittelung ergibt den mittleren Wärmeübergangskoeffizienten  $U_{l,m}$ . Zusätzlich wurde auch ein linear von der Windgeschwindigkeit abhängiger Wärmeübergangskoeffizient  $U_{l(vw)}$  bestimmt. Die ermittelten Werte sind in Tab.1 zusammengestellt.

## 5. Simulationsrechnungen

Die im MPP gemessenen Minutenmittelwerte von Strom, Spannung und Leistung am Wechselrichter-Eingang haben wir mit den entsprechenden errechneten Werten verglichen. Für die Rechnung wurden vier verschiedene Modellvarianten verwendet:

- A Parameter aus Messung,  $T_c$  aus Messung
- B Parameter aus Herstellerangaben,  $T_c$  aus Messung
- C Parameter aus Messung,  $T_c$  mit konstantem  $U_{l,m}$  berechnet
- D Parameter aus Messung,  $T_c$  mit windabhängigem  $U_{l(vw)}$  berechnet

Abb 4. zeigt die Meßwerte und die mit Version C gerechneten Werte eines Tages für den Siemens-Generator. Leistung und Strom werden vom Modell gut reproduziert. Zwischen gemessener und gerechneter Spannung treten größere Abweichungen auf, die jedoch zum Teil durch den MPP-Regler des Wechselrichters verursacht werden. Die Übereinstimmung zwischen gemessener und gerechneter Zelltemperatur ist nicht gut. Auch die Rechnung mit windabhängigem  $U_{l(vw)}$  (Version D) liefert gegenüber der Rechnung mit konstantem  $U_{l,m}$  (Version C) keine wesentlich genauere Bestimmung von  $T_c$ . Hier können Verbesserungen vermutlich nur durch ein dynamisches thermisches Modell unter Berücksichtigung der Wärmekapazität der Module erreicht werden. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Zelltemperatur nur geringen Einfluß auf die Ergebnisse des Generatormodells hat. Die Rechnungen mit den Versionen A ( $T_c$  gemessen), C ( $T_c$  mit  $U_{l,m}$  gerechnet) und D ( $T_c$  mit  $U_{l(vw)}$  gerechnet) liefern immer annähernd die gleichen Ergebnisse für Spannung, Strom und Leistung im MPP. Die Abweichungen zwischen Rechnung und Messung müssen also andere Einflüsse als die Zelltemperatur als Ursache haben. Denkbar sind z.B. Einflüsse des Einfallswinkels der Strahlung oder des Strahlungsspektrums. Möglich sind auch Abweichungen vom MPP bei schnellen Strahlungsänderungen.

Eventuell kann die Verwendung eines vom Einfallswinkel abhängigen Korrekturfaktors in (2) sowie eines 2-Dioden-Ersatzschaltbildes Verbesserungen bringen.

Die Standardabweichung zwischen gemessenen und gerechneten Minutenmittelwerten liegt im Leistungsbereich zwischen 20 und 90% der Generatornennleistung zwischen 5% (Siemens) und 10% (Kyocera). Vor allem bei kleinen Leistungen werden die Fehler deutlich größer. Wie oben bereits erwähnt, unterscheiden sich die Standardabweichungen der Varianten A, C und D kaum voneinander. Generell treten die größten Abweichungen bei den polykristallinen Modulen (Kyocera) auf.

Neben den Standardabweichungen der Minutenmittelwerte sind die relativen Abweichungen zwischen berechneter und gemessener Generator-Jahresenergie  $E_{dc}$  von Bedeutung. Tab.1 zeigt die Werte für Variante A (Parameter aus Messungen bestimmt) und Variante B (Parameter aus Herstellerangaben ermittelt). Die Rechnung mit Herstellerangaben ergibt deutlich zu große Jahresenergien. Die von uns angewandte Methode der Parameterbestimmung liefert wesentlich bessere Ergebnisse.

Die beobachteten großen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung mit Herstellerangaben lassen sich nicht allein mit Verlusten durch Fehlanpassung, Verschaltung und erhöhte Reflexion bei schrägem Strahlungseinfall erklären. Laut /SMI92/ führen diese Verluste nur zu Energieeinbußen in der Größenordnung von 10-15%. Zu der großen Abweichung trägt sicher auch bei, daß die Herstellerdaten bei optimalen Bedingungen gemessen wurden, die im realen Betrieb fast nie auftreten.

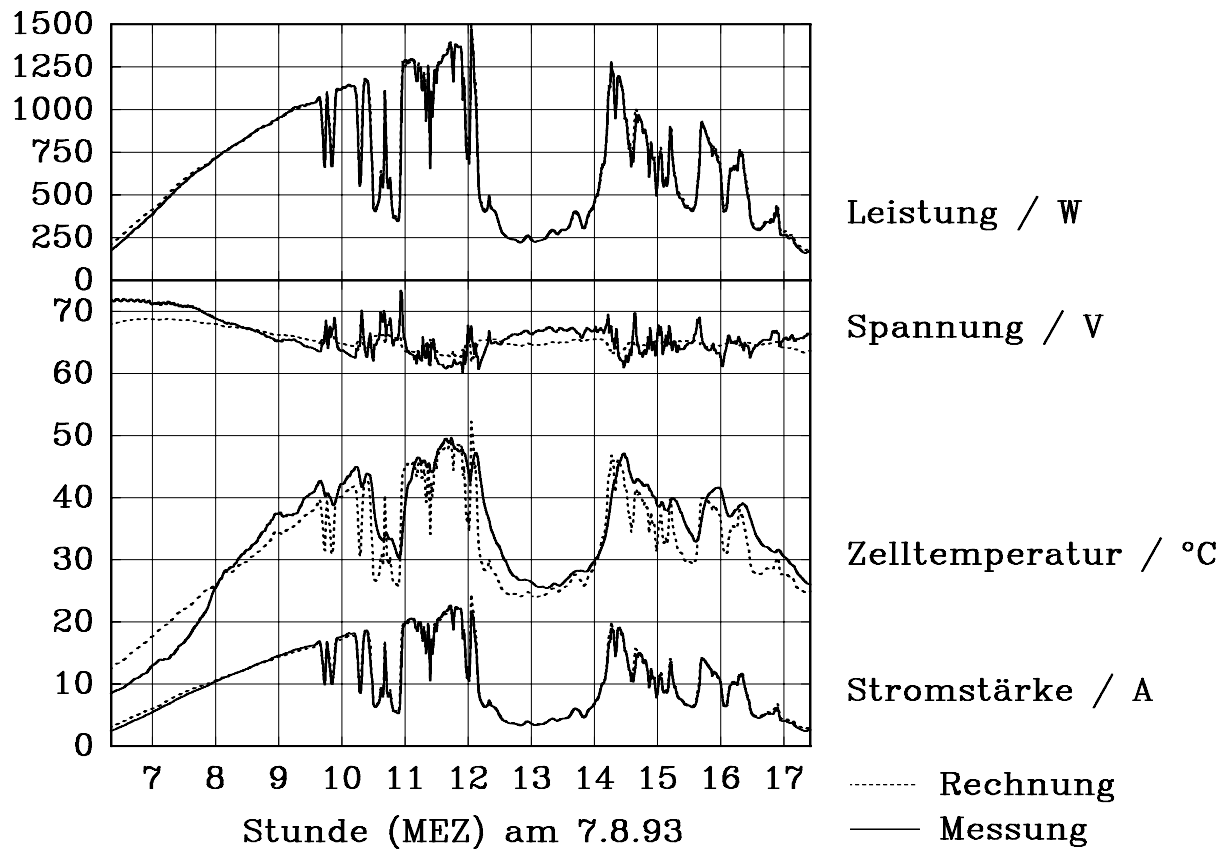


Abb. 4: Gemessene und mit Variante C (Parameter aus Messung,  $T_c$  mit  $U_{l,m}$  berechnet) gerechnete Minutenmittelwerte. Die Kurven für gemessene und berechnete Leistungen und Stromstärken liegen im Rahmen der Bildauflösung übereinander.

## 6. Fazit

Die Nachbildung eines PV-Generators durch ein Ein-Dioden-Ersatzschaltbild liefert im mittleren Leistungsbereich befriedigende Ergebnisse auch bei hoher Zeitauflösung, wenn die Modellparameter aus Messungen bei realen Betriebsbedingungen bestimmt werden. Bei Parameterbestimmung aus Herstellerangaben liefert das Modell dagegen deutlich zu große Leistungen. Für die thermische Beschreibung des Generators ist die Annahme eines konstanten Wärmeübergangskoeffizienten ausreichend.





## 7. Nomenklatur

A	Idealitätsfaktor der Diode im Ersatzschaltbild
e	Elementarladung
$E_{dc}$	Vom Generator gelieferte Energie am Wechselrichtereingang
$E_g$	Bandlücke von Silizium, 1,13 eV
$\eta_{\text{Nenn}}$	Generator-Wirkungsgrad bei Referenzbedingungen
G	Globalstrahlung in Modulebene
I	Generatorstromstärke (Wechselrichtereingang)
$I_{ph}$	Photostromstärke im Ersatzschaltbild
$I_d$	Diodenstromstärke im Ersatzschaltbild
$I_{mp}$	Generatorstromstärke im MPP
$I_{sc}$	Generator-Kurzschlußstromstärke
$I_o$	Sättigungs-Sperrstromstärke der Diode im Ersatzschaltbild
k	Boltzmann-Konstante
$\mu_{Isc}$	Temperaturkoeffizient der Photostromstärke bei Referenzbedingungen
$\mu_{Uoc}$	Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung bei Referenzbedingungen
N	Zahl in Serie geschalteter Zellen (hier 144)
$P_{dc}$	Modulflächenbezogene Generatorleistung (Wechselrichtereingang)
$P_l$	Modulflächenbezogene thermische Verlustleistung des Generators
$R_s$	Serienwiderstand im Ersatzschaltbild
$(\tau\alpha)$	Absorptions-Transmissions-Produkt
$T_a$	Lufttemperatur
$T_c$	Zelltemperatur
U	Generatorspannung (Wechselrichtereingang)
$U_l$	Wärmeübergangskoeffizient des Generators
$U_{l,m}$	$U_l$ zeitlich gemittelt
$U_{l,vw}$	$U_l$ bei der Windgeschwindigkeit $v_w$
$U_{mp}$	Generatorspannung im MPP
$U_{oc}$	Generator-Leerlaufspannung
$v_w$	Windgeschwindigkeit direkt über den Modulen
Index ref	bei Referenzbedingungen (d.h. $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ , $T_{c,ref} = 25^\circ\text{C}$ )

## 8. Literatur

- /LAW94/ Lawrance, W.B. and Wichert, B.: A versatile PV module simulation model based on PSI/e. Solar Energy Vol. 52, No. 2, pp.191-195, 1994
- /NEG93/ Negro, E.: PC simulation and sizing of PV systems. Proceedings of ISES solar world congress, Vol. 3, Budapest 1993.
- /SUM91/ Schumacher-Gröhn, J.: Digitale Simulation regenerativer elektrischer Energieversorgungssysteme. Dissertation, Universität Oldenburg 1991.
- /SMI92/ Schmid, J.: Photovoltaik-Systeme. 8. Internationales Sonnenforum, Berlin 1992.
- /TOW89/ Townsend, T.U.: A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems. Master-thesis, University of Wisconsin, Madison 1989

Die Forschungsarbeiten werden unterstützt vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (Aktenzeichen VI C 3a-78a78-15/90-29).

Stand: 6/94