

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 92 (2001)

**Heft:** 10

**Artikel:** Anwendung eines neuen Kennlinienmodells auf Freilandmessungen an einem kommerziellen Photovoltaikmodul

**Autor:** Durisch, Wilhelm

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-855706>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Anwendung eines neuen Kennlinienmodells auf Freilandmessungen an einem kommerziellen Photovoltaikmodul

An einem monokristallinen SM110-Modul von Siemens Solar wurden elf Strom-Spannungskennlinien unter realen Betriebsbedingungen gemessen. Bei der Erfassung der Datensätze variierte die Bestrahlungsleistung zwischen 456 und 1013 W/m<sup>2</sup> und die Zelltemperatur zwischen 47 und 64 °C. Durch Anwendung eines neuen Modells auf die Kennlinien gelang es, die charakteristischen Parameter des Moduls (Photostrom, Sättigungsstrom, Serienwiderstand, Parallelwiderstand und Diodenfaktor) zu bestimmen. Damit kann die Leistung des Moduls und der Zellenwirkungsgrad in Abhängigkeit der Bestrahlungsleistung und der Zelltemperatur berechnet werden. Bei 1000 W/m<sup>2</sup> und 25 °C ergibt sich die Modulleistung zu 106,2 W und der Zellenwirkungsgrad zu 14,8%.

■ Wilhelm Durisch und  
Jean-Claude Mayor

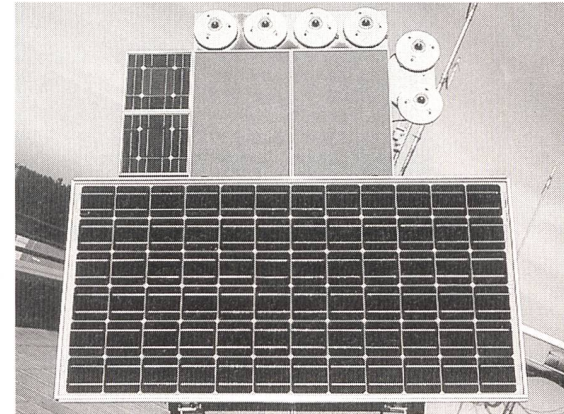
## Einführung

Eine umsichtige Anwendungsweise von Photovoltaikmodulen gehört zu den Faktoren, die auf die Wettbewerbsfähigkeit von photovoltaischen Stromerzeugungssystemen einen signifikanten Einfluss haben. Unter diesem Gesichtspunkt ist verlässliche Information über das Modulverhalten unter realen Betriebsbedingungen wie beispielsweise bei variierender Bestrahlungsleistung und bei sich verändernden Klimabedingungen unerlässlich. Sie ist nicht nur für die richtige Produktauswahl wichtig, sondern auch für die exakte Berechnung der jährlichen Stromproduktion und daher für die Berechnung der Stromgestehungskosten [1]. Die fragliche Information wird aber von den Lieferanten meist nicht zur Verfügung gestellt. Ausserdem werden die im Rahmen von Standardtests gewonne-

nen und zur Verfügung gestellten Daten unter Bedingungen gemessen, die in der Praxis nie vorkommen. Deshalb kommt der Realcharakterisierung von Photovoltaikmodulen grosse Bedeutung zu.

In der Freiland-Testanlage des PSI [2] wurden Strom-Spannungskennlinien des SM110-Moduls von Siemens Solar bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen aufgenommen. Jeder Datensatz besteht aus annähernd 300 Strom-Spannungspaaren, die über einen Zeitraum von etwa 15 Sekunden gemessen und gespeichert werden. Der Zeitpunkt der einzelnen Experimente wurde so gewählt, dass die Bestrahlungsleistung und die Zelltemperatur während der Kennlinienaufnahme annähernd konstant waren. Gleichzeitig mit den Strom-Spannungsdaten wurden die Zelltemperatur, die Bestrahlungsleistung sowie andere Parameter erfasst.

Ziel dieser Arbeit ist ein neues Modell zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens von Modulen unter einer Vielzahl von Betriebsbedingungen. Zusammen mit standortspezifischen und zeitlich auf-



SM110-Modul auf dem Dach des PSI.

gelösten meteorologischen Daten [3, 4] bildet es die Basis zur Vorhersage des spezifischen täglichen, monatlichen und jährlichen Stromertrags an ausgewählten Standorten.

## Ein-Dioden-Modell

Zur Modellierung einzelner Strom-Spannungskennlinien bei gegebener konstanter Bestrahlungsleistung  $G$  und konstanter Zelltemperatur  $T$  wurde das klassische *Ein-Dioden-Modell* für eine Solarzelle angewandt [5]. Die äquivalente Ersatzschaltung ist in Bild 1 dargestellt.

Die Anwendung des Kirchhoffschen und Ohmschen Gesetzes auf die in Bild 1 gezeigte Ersatzschaltung sowie Berücksichtigung der «Diodengleichung» führt zum erwähnten Modell (Formel 1).

Dieses Modell wird im Folgenden an Strom-Spannungskennlinien, gemessen an einem Siemens SM110-Modul (Seriennummer 002165 B 2119803259), angepasst. Das Modul besteht aus zwei parallel geschalteten Strängen mit je 36 monokristallinen Siliziumzellen. Die Herstellerangaben für dieses Modul lauten bei Standardtestbedingungen: Maximale

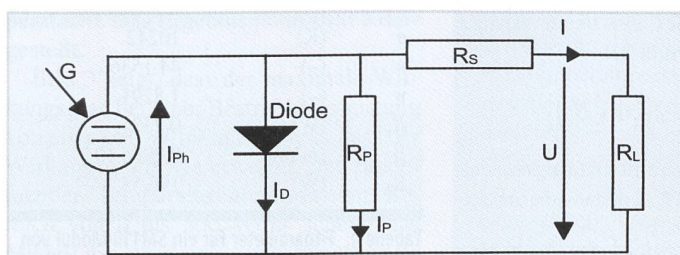


Bild 1 Äquivalente Ersatzschaltung für eine Solarzelle.

## Formel 1

$$I = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{U + R_s \cdot I}{R_p}$$

$I_{ph}$ ,  $I_D$ ,  $I_p$ ,  $I_s$ : Photo-, Dioden-, Parallel- und Sättigungsstrom (A)  
 $I$ ,  $U$ : Arbeitsstrom, Betriebsspannung (A, V)  
 $R_s$ ,  $R_p$ ,  $R_L$ : Serie-, Parallel- und Lastwiderstand ( $\Omega$ )  
 $G$ : Bestrahlungsleistung (W/m<sup>2</sup>)

$T$ : Zelltemperatur (K)  
 $n$ : Diodenfaktor  
 $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Ws/V,  
 $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$  J/K

Datensatz	T (K)	G (W/m <sup>2</sup> )	I <sub>ph</sub> (A)	I <sub>s</sub> (mA)	n (-)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (Ω)
935	337.3	1013.0	6.779	7.335	47.3	0.231	250
939	337.1	979.3	6.588	6.962	47.2	0.222	346
946	336.7	931.7	6.330	5.054	46.3	0.225	285
948	334.5	907.0	6.183	3.837	46.2	0.223	227
954	333.8	866.9	5.936	3.143	45.8	0.223	269
958	331.7	821.4	5.709	2.274	45.4	0.225	281
963	327.6	651.6	4.590	0.678	43.3	0.229	253
969	323.6	584.5	4.111	0.313	42.5	0.233	233
975	322.9	532.0	3.746	0.266	42.4	0.209	115
980	320.9	489.4	3.432	0.167	41.9	0.234	254
984	319.2	456.3	3.194	0.106	41.3	0.239	225

Tabelle I Modulparameter bei verschiedenen Zelltemperaturen T und Bestrahlungen G.

$$I = I_{ph0} \left(\frac{G}{G_0}\right)^m [1 + \lambda \cdot (G - G_0)] - h \left(\frac{G}{G_0}\right)^s \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \exp\left[-p \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \cdot \left\{ \exp\left[\frac{q}{kT} \cdot \frac{U + R_{s0}[1 + \beta \cdot (G - G_0)] \cdot I}{v + wG/G_0}\right] - 1 \right\} - \left(\frac{G}{G_0}\right)^r \cdot \frac{U + R_{s0}[1 + \beta \cdot (G - G_0)] \cdot I}{R_p}$$

Formel 3

Leistung,  $P_{mpp} = 110$  W; Kurzschlussstrom,  $I_{sc} = 6,9$  A; Leerlaufspannung,  $U_{oc} = 21,7$  V. Die aktive Zellenfläche beträgt  $0,72$  m<sup>2</sup>. Für den ersten Fit wurde ein Datensatz bei einer Zelltemperatur von  $337,3$  K ( $64,15$  °C) und einer Bestrahlungsleistung von  $1013$  Wm<sup>-2</sup> ausgewählt. Unter diesen Bedingungen erbrachte das Modul eine maximale Leistung von  $86,9$  W sowie  $U_{oc} = 18,9$  V und  $I_{sc} = 6,79$  A. Via nichtlineare Ausgleichsrechnung wurden die physikalischen Modulparameter für die erwähnten Betriebsbedingungen bestimmt:

- $I_{ph} = 6,779$  A
- $I_s = 7,335 \cdot 10^{-6}$  A
- $n = 47,29$
- $R_s = 0,2307$  Ω
- $R_p = 249,7$  Ω

(Beachte: Der Diodenfaktor einer einzelnen Zelle beträgt  $n_{zelle} = n/36 = 1,31$ )

Um einen Eindruck über die Variation dieser Parameter bei verschiedenen Betriebsbedingungen zu erhalten, wurden elf Datensätze nach obiger Methode ausgewertet. Innerhalb dieser Datensätze variiert die Zelltemperatur von  $47$  bis  $64$  °C und die Bestrahlungsleistung von  $456$  bis  $1013$  W/m<sup>2</sup>. Die Ergebnisse sind in der Tabelle I zusammengefasst.

Aus Tabelle I und Regressionsanalysen folgt, dass der Seriewiderstand  $R_s$  leicht von der Bestrahlungsleistung  $G$  abhängig ist. Der Parallelwiderstand  $R_p$  zeigt eine grosse Streuung, das heisst, es kann keine klare Abhängigkeit von der Zelltemperatur  $T$  und/oder der Bestrahlungsleistung  $G$  festgestellt werden. Deshalb wird er im folgenden verallgemeinert

als konstant vorausgesetzt. Wie erwartet, variieren der Photostrom  $I_{ph}$  und der Sättigungsstrom  $I_s$  je nach Bestrahlungsleistung und Zelltemperatur beachtlich. Wider Erwarten kann eine leichte Erhöhung des Diodenfaktors  $n$  mit der Temperatur  $T$  und/oder Bestrahlungsleistung  $G$  festgestellt werden. Gestützt auf diesen Befund wird das klassische Ein-Dioden-Modell nun so verallgemeinert, dass der Arbeitsstrom  $I$  nicht nur in Funktion der Betriebsspannung  $U$  und Zelltemperatur  $T$ , sondern gleichzeitig auch in Abhängigkeit der Bestrahlungsleistung  $G$  wiedergegeben werden kann.

### Verallgemeinertes Modell

Bei einer früheren Untersuchung [6] wurde festgestellt, dass gemessene Kennlinien besser dargestellt werden können durch das Ein-Dioden-Modell, wenn die Temperaturabhängigkeit des Sättigungsstroms  $I_s$  mitberücksichtigt wird [7]. Weiter zeigt Tabelle I, dass der Photostrom  $I_{ph}$  eine nichtlineare Funktion der Bestrahlungsleistung  $G$  ist. Für diese Abhängigkeit wird hier ein neuer Ansatz vorgeschlagen (Formel 2).

$$I_{ph} = I_{ph0} \left(\frac{G}{G_0}\right)^m [1 + \lambda \cdot (G - G_0)]$$

Dabei ist  $G_0$  die Standard-Bestrahlungsleistung ( $G_0 = 1000$  W/m<sup>2</sup>) und  $I_{ph0}$ ,  $m$  und  $\lambda$  die anpassbaren Modellparameter.

Auch für den Seriewiderstand und Diodenfaktor werden hier Abhängigkei-

ten von der Bestrahlungsleistung angenommen. Um ferner zu berücksichtigen, dass der Diodenstrom  $I_D$  und der Parallelstrom  $I_p$  bei einer Bestrahlungsleistung von null gleich null sein müssen, werden hier noch Vorfaktoren der Form  $(G/G_0)^s$  und  $(G/G_0)^r$  eingeführt.

Die Berücksichtigung all dieser Überlegungen führt zum einem verallgemeinerten neuen Modell (Formel 3).

Dieses neue Modell wurde nun in einem einzigen Fit an alle elf Kennlinien (rund 3300 Messpunkte) angepasst. Das beste Ergebnis wurde mit  $m = 1,25$ ,  $s = 2/3$  und  $r = 1$  erzielt. Die übrigen neun Modellparameter  $I_{ph0}$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ,  $p$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $R_{s0}$ ,  $\beta$  und  $R_p$  wurden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme bestimmt und sind in Tabelle II aufgeführt.

Um die mpp-Leistungen des Moduls rasch ablesen zu können, sind in Bild 2 nicht die Strom-Spannungs-, sondern die Leistungs-Spannungs-Kennlinien ( $P = I \cdot U$ ) dargestellt. Zu beachten ist, dass jede Kurve eine Kennlinie darstellt, die bei einer bestimmten konstanten Zelltemperatur und Bestrahlungsleistung gemessen wurde (Tabelle I). Der besseren Übersicht halber wurde in Bild 2 der Datensatz 948 aus Tabelle I nicht eingezeichnet. Bild 2 zeigt, dass die Messungen sehr gut mit den Modellergebnissen übereinstimmen.

### Ergebnisse

Mit dem neuen Kennlinienmodell und den Parameterwerten aus Tabelle II kann der Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  und die Leerlaufspannung  $U_{oc}$  bei der Zelltemperatur  $\vartheta = 25$  °C und Bestrahlungsleistung  $G = 1000$  W/m<sup>2</sup> bestimmt werden:  $I_{sc} = 6,6995$  A,  $U_{oc} = 21,84$  V. Die Leerlaufspannung stimmt gut mit den Herstellerangaben überein. Der Kurzschlussstrom liegt 3% tiefer als angegeben, aber noch innerhalb der Toleranz.

Mit der Bedingung  $dP/dU = 0$  bei  $G$  und  $T =$  konstant lassen sich mit dem

Fitparameter		Zahlenwert
$I_{ph0}$	(A)	6.7075
$\lambda$	(m <sup>2</sup> /W)	-0.4762 · 10 <sup>-3</sup>
$h$	(A)	6.1584 · 10 <sup>-8</sup>
$p$	(K)	10242
$v$	(-)	44.1536
$w$	(-)	1.8291
$R_{s0}$	(W)	0.2321
$\beta$	(m <sup>2</sup> /W)	0.2965 · 10 <sup>-3</sup>
$R_p$	(W)	196.51

Tabelle II Fitparameter für ein SM110-Modul von Siemens gemäss neuem Kennlinienmodell. Das Ergebnis des Fits zeigt Bild 2.

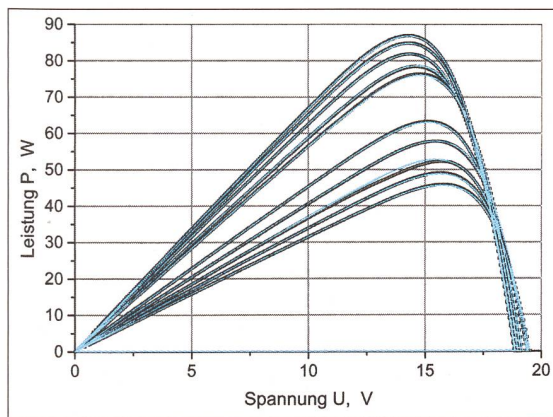


Bild 2 Leistungs-Spannungskennlinien des Siemens Solar-Moduls SM110 (offene Quadrate: Messpunkte; Linien: Modell).

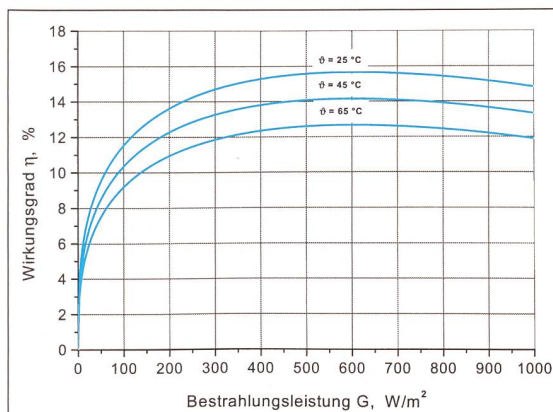


Bild 3 Wirkungsgrad  $\eta$  des Siemens-Moduls SM110 in Funktion der Bestrahlungsleistung  $G$  und der Zelltemperatur  $\vartheta$  (Beachte:  $\eta$  bezieht sich auf die aktive Zellenfläche,  $0,72 \text{ m}^2$ ).

neuen Modell auch die Punkte maximaler Leistung (maximum power points, mpp) bestimmen. Die so erhaltenen Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und errechneten mpp-Spannungen bzw. mpp-Leistungen (Abweichungen  $< 1,4\%$ , bzw.  $< 0,8\%$ ). Für  $\vartheta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  ergeben sich die mpp-Daten zu  $17,25 \text{ V}$  und  $106,2 \text{ W}$ . Das letzte Ergebnis liegt  $3,5\%$  unter dem vom Hersteller angegebenen Wert, jedoch innerhalb der Toleranz von  $\pm 5\%$ . Mit der aktiven Zellenfläche des Moduls von  $A = 0,72 \text{ m}^2$  und der Leistung von  $106,2 \text{ W}$  ergibt sich der Standard-Wirkungsgrad zu  $14,75\%$ .

Durch Einsetzen von  $I = \eta AG/U$  ins neue Modell gelangt man zur Abhängigkeit des Wirkungsgrades  $\eta$  von der Bestrahlungsleistung  $G$  und der Zelltemperatur  $\vartheta$ . Das Ergebnis ist in Bild 3 dargestellt.

Bild 3 zeigt, dass der maximale Wirkungsgrad bei einer Bestrahlungsleistung von etwa  $600 \text{ W/m}^2$  auftritt und, dass der Wirkungsgrad, wie erwartet, mit zunehmender Temperatur abnimmt. Im Bereich von  $0$  bis  $300 \text{ W/m}^2$  scheint das Modell den Wirkungsgrad aber etwas zu unterschätzen [8].

## Folgerungen

Ein neues Modell für das elektrische Verhalten von Solarzellen und Modulen unter realen Betriebsbedingungen wurde entwickelt und erfolgreich auf ein SM110-Modul von Siemens Solar angewandt. Es wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und errechneten Daten festgestellt. Mit Ausnahme des Kurzschlussstroms und maximalen Leistung stimmen die errechneten Daten auch gut mit den Herstellerangaben überein. Es wurde festgestellt, dass der Serienwiderstand und der Diodenfaktor von der Bestrahlungsleistung abhängen, was bedeutet, dass sie sich bis zu einem gewissen Grad wie photosensitive Elemente verhalten. Die Einführung einer zweiten parallelen Diode in der Ersatzschaltung sowie die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Widerstände könnte zu einer Verbesserung des Modells führen. Das Modell würde dann aber zusätzliche Parameter enthalten, zu deren Bestimmung zusätzliche Kennlinienmessungen notwendig wären. Von besonderem Interesse wären noch Messungen bei Bestrahlungsleistungen im Bereich von  $100$  bis  $400 \text{ W/m}^2$  und Zelltemperaturen von  $25$  bis  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Damit könnte das Modell auch in diesen Bereichen verifiziert und/oder verbessert werden. Interessant und zweckmässig wäre es zu untersuchen, ob das neue Modell auch auf andere Solarzellen als monokristalline Siliziumzellen angewandt werden

## Adresse der Autoren

Dr. Wilhelm Durisch  
Jean-Claude Mayor  
Paul Scherrer Institut, PSI  
3252 Villigen PSI

E-Mail: wilhelm.durisch@psi.ch

kann. Wie in einer früheren Arbeit berichtet [8], kann auch die Air Mass AM einen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben. Beim SM110-Modul scheint er allerdings gering zu sein [8]. Deshalb wurde er in dieser Arbeit vernachlässigt.

## Referenzen

- [1] W. Durisch, M. Bühlmann, P. Kesselring und R. Morisod: Measurements and Operational. Experience with a Photovoltaic Plant in the Swiss Alps. Proceedings of the ISES Solar World Congress, Hamburg, Vol. 1, S. 289–297, Pergamon Press, Oxford 1987.
- [2] W. Durisch, J. Urban und G. Smestad: Characterisation of Solarcells and Moduls under Actual Operating Conditions. Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Denver, Vol. 1, S. 359–366, Pergamon, Oxford, 1996.
- [3] W. Durisch, J. Keller, W. Bulgheroni, L. Keller und H. Fricker: Solar Irradiation Measurements in Jordan and Comparison with Californian and Alpine Data. Applied Energy 52 (1995), 111–124.
- [4] W. Durisch und W. Bulgheroni: Climatological Measurement for Solar Power Station in the Swiss Alps. Applied Energy 64 (1999) 411–415.
- [5] F. Lasnier und T.G. Ang: Photovoltaic Engineering Handbook. Adam Hilger, Bristol und New York, 1990.
- [6] J.-C. Mayor, W. Durisch: Application of a Generalized Model for the Electrical Characterisation of a Commercial Solar Cells. World Renewable Energy Congress VI, WREC 2000, Brighton, UK, July 1–7, 2000. Renewable Energy, Erstaussgabe 2000, Elsevier, 2081–2084 (2000).
- [7] J. D. Chatelain und R. Dessoulavy: Traité d'Electricité, Vol. VIII: Electronique. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 3. Auflage, 1989.
- [8] W. Durisch, O. Struss, K. Robert: Efficiency of Selected Photovoltaic Modules under Varying Climatic Conditions. Renewable Energy, First Edition 2000, Elsevier, 779–788 (2000).

## Utilisation d'un nouveau modèle de lignes caractéristiques sur un module photovoltaïque commercialisé

Onze lignes de tension caractéristiques ont été mesurées sur le module monocristallin SM110 de Siemens Solar dans des conditions d'exploitation réelles. Lors de la saisie des données, la puissance de rayonnement a varié entre  $456$  et  $1013 \text{ W/m}^2$  et la température des cellules entre  $47$  et  $64 \text{ }^\circ\text{C}$ . Grâce à l'application d'un nouveau modèle sur les lignes caractéristiques, il a été possible de déterminer les paramètres caractéristiques du module (photo-électricité, courant de saturation, résistance de série, résistance parallèle et facteur de diode). La puissance du module et le rendement des cellules peuvent ainsi être calculés, indépendamment de la puissance de rayonnement et de la température des cellules. Pour  $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , la puissance du modèle est de  $106,2 \text{ W}$  et le rendement des cellules de  $14,8\%$ .

# Online-Bestellung von Normen beim SEV

In nur 4 Schritten zu Ihrer Norm.

Ab sofort können Sie dank modernster Datenbanktechnik in über 11 000 Normen beim SEV recherchieren, suchen und bestellen.

**1. recherchieren**

**2. auswählen**

**3. Daten erfassen**

**4. bestellen**

**fertig**

[www.sev.normenshop.ch](http://www.sev.normenshop.ch)

[www.sev-tsm.ch](http://www.sev-tsm.ch)

In diesem Shop sind folgende aktuell gültigen Normen aus dem Fachgebiet Elektrotechnik enthalten:

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>International:</b> | IEC (International Electrotechnical Commission)                 |
| IEC                   | Internationale Norm oder Technical Reports                      |
| CISPR                 | Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques |
| <b>Europa:</b>        | CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique)     |
| EN                    | Europäische Norm  |
| ENV                   | Europäische Vornorm   |
| HD                    | Harmonisierungsdokument   |
| ES                    | Europäische Spezifikation                                       |
| <b>National:</b>      | CES (Comité Electrotechnique Suisse)                            |
| SEV                   | Schweizerische Norm (nationale Norm)                            |

**Wir freuen uns auf Ihren Besuch.  
Ihr Normen-Team.**