

# PEAK-LEISTUNG- UND SERIEN-INNENWIDERSTAND-MESSUNG UNTER NATÜRLICHEN UMGEBUNGSBEDINGUNGEN

ANDREAS WAGNER

Fachhochschule Dortmund, Postfach 10 50 18, 44047 Dortmund  
Fax + 49 231 9112283, e-mail wagner@fh-dortmund.de

**Abstract** – Zur Qualitätskontrolle von PV-Modulen gehört die Messung der Peak-Leistung  $P_{pk}$  und des Serien-Innenwiderstandes  $R_s$ . Peak-Leistung ist definiert als die maximale Leistung bei Standard-Prüfbedingungen (standard test conditions STC). Als Folge von Degradationserscheinungen kann die Peak-Leistung abnehmen, was eine kontinuierliche Qualitätskontrolle unter realen Umgebungsbedingungen notwendig macht. Verluste in den PV-Modulen werden durch den Serien-Innenwiderstand  $R_s$  beschrieben. Ein zunehmender  $R_s$  zeigt sowohl interne Verluste als auch alternde Kontakte. Es wird ein Messverfahren vorgestellt, mit dem unter natürlichen Umgebungsbedingungen die Kennwerte Serien-Innenwiderstand  $R_s$  und Peak-Leistung  $P_{pk}$  gemessen und direkt angezeigt werden können. I-U-Kennlinien, die unter natürlichen Umgebungsbedingungen gemessen werden, können bezüglich Bestrahlungsstärke und Temperatur umgerechnet werden (vgl. DIN EN 60891). Die Beschreibung der Kennlinie durch die "Effektive Solarzellen-Kennlinie" ermöglicht eine explizite Berechnung zur Ermittlung von  $P_{pk}$ . DIN EN 60891 beschreibt auch eine Methode zur Ermittlung des Serien-Innenwiderstandes  $R_s$ . Eine zeichnerische Methode wird vorgeschlagen zur Ermittlung bestimmter Arbeitspunkte der I-U-Kennlinie, wodurch charakteristische Werte zur Berechnung von  $R_s$  ermittelt werden. Die Genauigkeit dieser zeichnerischen Methode ist begrenzt durch die zeichnerische Genauigkeit der ermittelten Punkte. Durch Anwendung der Methode der "Effektiven Solarzellen-Kennlinie" kann die gemessene I-U-Kennlinie explizit berechnet werden, wodurch die explizite Berechnung des Serien-Innenwiderstandes möglich ist. Die Methode der "Effektiven Solarzellen-Kennlinie" wird vorgestellt sowie exemplarische Messergebnisse zur  $P_{pk}$ - und  $R_s$ -Messung unter natürlichen Umgebungsbedingungen.

## 1. EINLEITUNG

Qualitätskontrolle von PV-Modulen unter natürlichen Umgebungsbedingungen ist eine notwendige Dienstleistung für die Anwender von PV-Systemen unter Berücksichtigung von Garantieleistungen von 10 und mehr Jahren. Das Betriebsverhalten einer Solarzelle wird durch ihre Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie) dargestellt. Durch Messung aktueller Kennlinien unter natürlichen Umgebungsbedingungen kann die Funktionsfähigkeit eines Solargenerators, bestehend aus einem oder mehreren PV-Modulen nachgewiesen werden. (Schulte K.M. et al 1993) Abweichungen des Kennlinienverlaufs vom theoretischen Erwartungswert erlauben Rückschlüsse auf interne Störungen, Kabelbrüche, Teilabschattungen, Fehlanpassung u.s.w. Neben dem aktuellen Betriebsverhalten ist zur Erkennung von Degradationserscheinungen auch die Messung der stationären Eigenschaften Peakleistung und Serien-Innenwiderstand notwendig. Zur Messung der Peakleistung  $P_{pk}$  sind jedoch Standard Prüfbedingungen (STC, DIN EN 60904-3) vorgeschrieben, die hohe Anforderungen an den Prüfstand stellen, was folglich zu hohen Kosten pro Messung führt. Auch der experimentelle Aufwand für die Messung des Serien-Innenwiderstandes  $R_s$  im Labor ist recht aufwendig. Für die Messung von  $P_{pk}$  und  $R_s$  und realen Umgebungsbedingungen müssen die Messwerte der aktuellen Kennlinie auf STC umgerechnet werden unter Berücksichtigung von Bestrahlungsstärke und Zelltemperatur. Zur Beschreibung der I-U-Kennlinie von Solarzellen stehen einige Ersatzschaltbilder mit ihren Kennliniengleichungen zur Verfügung, aus denen für die Umrechnung der Kennlinie auf STC ein geeignetes Ersatzschaltbild ausgewählt werden soll.

## 2. EFFEKTIVE SOLARZELLEN-KENNLINIE

*2.1. Anforderungen an Solarzellen-Kennlinien-Modelle*  
Der Sinn der Kennlinien-Approximation mit Ersatzschaltbildern liegt in der daraus folgenden expliziten Berechenbarkeit von Anpassungsproblemen zwischen PV-Solargeneratoren und Verbrauchern. An eine Berechnungsmethode für Anpassungs-Aufgaben im Engineering-Bereich müssen daher die folgenden Anforderungen gestellt werden:

- Explizite Berechnung der Strom-Spannungs-Kennliniengleichung  $U(I)$
- Explizite Berechnung der Kennlinien-Gleichungsparameter aus den Kennwerten  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_{pmax}$ ,  $U_{pmax}$ .
- Approximationsgenauigkeit im Bereich der zur Verfügung stehenden Meßgenauigkeit (Stand der Technik: 1%)

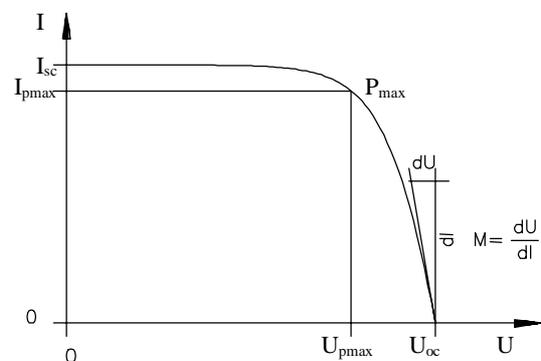


Abb. 1. Strom-Spannungs-Kennlinie

2.2 Existierende Ersatzschaltbilder

Aus den folgenden Ersatzschaltbildern im quasistationären Zustand soll eines ausgewählt werden, das alle drei genannten Anforderungen erfüllt:

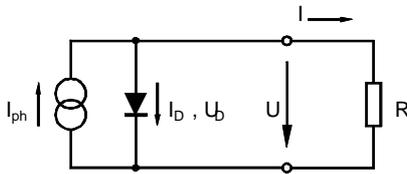


Abb. 2. Ideal-Modell

Geringe Approximationsqualität.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

$$U = U_T \ln \left( \frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0} \right)$$

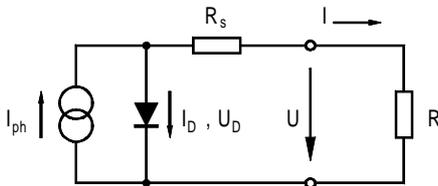


Abb. 3. Einfaches Modell

Gute Approximationsqualität.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U+IR_s}{U_T}} - 1 \right)$$

$$U = U_T \ln \left( \frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0} \right) - IR_s$$

Zahlenwert für  $R_s$  kann negativ werden.

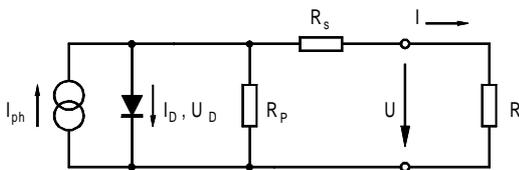


Abb. 4. Standard-Modell

Gute Approximationsqualität.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U+IR_s}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U+IR_s}{R_p}$$

$U=?$  explizite Lösung unbekannt

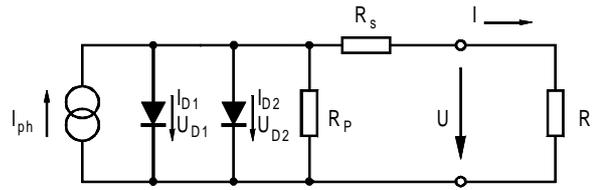


Abb. 5. Zwei-Dioden-Modell

Sehr gute Approximationsqualität

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{U+IR_s}{U_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{U+IR_s}{U_{T2}}} - 1 \right) - \frac{U+IR_s}{R_p} \quad (6)$$

(1)  $U=?$  explizite Lösung unbekannt

Keines der 4 dargestellten Ersatzschaltbilder (Abb.2 bis Abb.5) erfüllt alle drei definierten Anforderungen.

(2)

Interessanterweise konnte gezeigt werden (Wagner A. 1999), dass die sehr gute Approximationsqualität des Zwei-Dioden-Modells auch mit dem Ersatzschaltbild Abb. 3 erreicht werden konnte, wenn ein negativer Zahlenwert für  $R_s$  zugelassen wurde. Da negative Widerstände real nicht existieren, kann das ermittelte Element kein ohmscher Widerstand sein.

Das Element im Ersatzschaltbild muss daher durch ein fiktives photoelektrisches Bauelement dargestellt werden, dessen Kennlinie in erster Näherung der eines positiven oder negativen Widerstandes entspricht.

Das Bauelement soll durch  $R_{pv}$  (Photovoltaik-Widerstand) beschrieben werden.

Wichtig: der wahre Serien-Innenwiderstand  $R_s$  darf nicht mit dem Photovoltaik-Widerstand  $R_{pv}$  verwechselt werden.

(3)

(4)

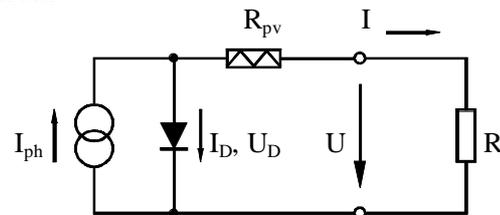


Abb.6 Ersatzschaltbild für die Effektive Solarzellen-Kennlinie

Es folgt die Effektive Solarzellen-Kennlinie

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U+IR_{pv}}{U_T}} - 1 \right) \quad (7)$$

Explizite Form

$$U = U_T \ln \left( \frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0} \right) - IR_{pv} \quad (8)$$

Durch die Einführung des Photovoltaik-Widerstandes lassen sich Leistungsberechnungen und Berechnungen zum Teillastverhalten mit der geforderten Genauigkeit von 1% explizit durchführen. Die Bezugsgröße für die Genauigkeit ist die maximale Leistung  $P_{max}$  des untersuchten Solargenerators.

### 2.3 Ermittlung der Gleichungsparameter

Zur Ermittlung der 4 unabhängigen Gleichungsparameter  $R_{pv}$ ,  $U_T$ ,  $I_0$ ,  $I_{ph}$  werden auch 4 unabhängige Kennwerte der Kennlinie benötigt. Im vorliegenden Fall sind dies die Kennwerte  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_{pmax}$  und  $U_{pmax}$ .

Wird zusätzlich noch die Steigung  $M$  bei der Leerlaufspannung in dem Gleichungssystem berücksichtigt (vgl. Abb. 1)

$$M = \frac{dU}{dI}(I=0) \quad (9)$$

können für die 4 Kennwerte folgende 5 Bestimmungsgleichungen aufgestellt werden:

$$U(I=0) = U_{oc} \quad (10)$$

$$U(I = I_{sc}) = 0 \quad (11)$$

$$U(I = I_{pmax}) = U_{pmax} \quad (12)$$

$$\frac{d(U \cdot I)}{dI}(I = I_{pmax}) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{dU}{dI}(I=0) = M \quad (14)$$

Aus diesem Gleichungssystem lassen sich die Gleichungsparameter der Effektivkennlinie näherungsweise wie folgt ermitteln (Wagner A. 1999):

$$R_{pv} = -M \frac{I_{sc}}{I_{pmax}} + \frac{U_{pmax}}{I_{pmax}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{pmax}}\right) \quad (15)$$

$$U_T = -(M + R_{pv})I_{sc} \quad (16)$$

$$I_0 = I_{sc} e^{-\frac{U_{oc}}{U_T}} \quad (17)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (18)$$

Voraussetzung für die Berechnung der 4 Gleichungsparameter ist, dass die 5 Kennwerte  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_{pmax}$ ,  $U_{pmax}$ ,  $M$  mit hinreichender Genauigkeit bekannt sind.

Üblicherweise lassen sich die 4 Kennwerte  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_{pmax}$ ,  $U_{pmax}$  messtechnisch mit einem Fehler  $<1\%$  ermitteln. Die Ermittlung der Steigung  $M$  ist dagegen mit einem größeren Fehler behaftet.

Da sich mit Hilfe des Gleichungssystems (10), (11), (12), (13) aus den 4 Kennwerten  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_{pmax}$ ,  $U_{pmax}$  eindeutig die Gleichungsparameter  $R_{pv}$ ,  $U_T$ ,  $I_0$ ,  $I_{ph}$  berechnen lassen und da weiter die Steigung  $M$  (9) eindeutig aus den Gleichungsparametern mit (8) berechnet werden kann, existiert eine eindeutige Funktion

$$M = f(I_{sc}, U_{oc}, I_{pmax}, U_{pmax}) \quad (19)$$

Folgende allgemeingültige Approximationsfunktion wurde für die Steigung  $M$  hergeleitet, die die Berechnung der effektiven Solarzellen-Kennlinie mit einer Genauigkeit von 1% gestattet (Wagner A. 1999).

$$M = \frac{U_{oc}}{I_{sc}} \left( k_1 \frac{I_{pmax} U_{pmax}}{I_{sc} U_{oc}} + k_2 \frac{U_{pmax}}{U_{oc}} + k_3 \frac{I_{pmax}}{I_{sc}} + k_4 \right) \quad (20)$$

mit den Gleichungskonstanten

$$k = \begin{pmatrix} -5.411 \\ 6.450 \\ 3.417 \\ -4.422 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Das folgende Anwendungsbeispiel zeigt den Arbeitspunkt eines Widerstandes  $R_L$  bei Direktanschluss an das Solarmodul. Gesucht ist der Widerstand, bei dessen Anschluss der Strom  $I_L=2A$  fließt.

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 3.65A & R_{pv} &= -0.624\Omega \\ U_{oc} &= 21.7A & M &= -0.222 \frac{V}{A} & U_T &= 3.09V \\ I_{pmax} &= 3.15A & & & I_0 &= 3.253mA \\ U_{pmax} &= 17.5V & & & I_{ph} &= 3.65A \end{aligned} \quad (22)$$

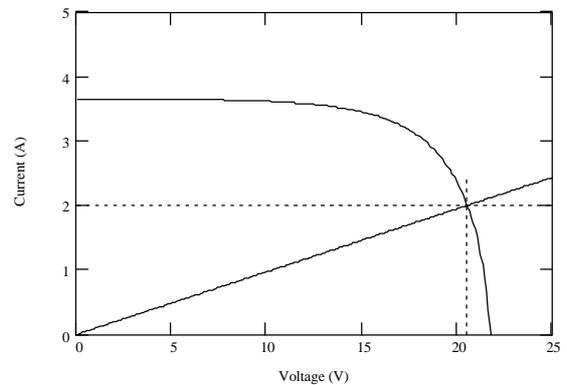


Abb. 7. Widerstand als Last eines Solarmoduls

$$\text{Mit (8) folgt } U(I_L = 2A) = 20.5V \quad (23)$$

$$R_L = 10.25\Omega$$

### 3. SERIEN-INNENWIDERSTAND

#### 3.1 Messmethode

Die Norm DIN EN 60 891 schreibt Verfahren zur Umrechnung von gemessenen Strom-Spannungskennlinien von photovoltaischen Bauelementen aus kristallinem Silizium auf andere Temperaturen und Einstrahlungen vor.

Zur Bestimmung des Serien-Innenwiderstandes  $R_s$  unter künstlichem Sonnenlicht müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Bei Raumtemperatur müssen 2 Kennlinien bei unterschiedlicher Bestrahlungsstärke (die Größe braucht nicht bekannt zu sein) aber gleicher spektraler Verteilung der Bestrahlungsstärke gemessen werden.
- Während der Messung muß die Temperatur der Zellen konstant gehalten werden (zulässige Toleranz  $\pm 2^\circ\text{C}$ )

Aus den beiden Kennlinien müssen zwei Arbeitspunkte  $U_1$  und  $U_2$  ermittelt werden, woraus der Serien-Innenwiderstand berechnet werden kann. Die Norm IEC 60 891 schreibt folgende Prozedur zur Ermittlung der beiden Arbeitspunkt vor:

- Festlegung einer Stromdifferenz  $\Delta I$  zwischen Kurzschlußstrom und Strom im gewählten Arbeitspunkt der Kennlinie 2 (der Index 2 bezeichnet die Kennlinie mit dem niedrigeren Kurzschlußstrom).

$$\Delta I = 0.5 \cdot I_{sc2} \quad (24)$$

- Ermittlung der Arbeitspunkte  $U_1$  und  $U_2$  mit (8)

$$U_1 = U(I_{sc1} - \Delta I, R_{pv1}, U_{T1}, I_{01}, I_{ph1}) \quad (25)$$

$$U_2 = U(I_{sc2} - \Delta I, R_{pv2}, U_{T2}, I_{02}, I_{ph2}) \quad (26)$$

- Berechnung des Serien-Innenwiderstandes

$$R_s = \frac{U_2 - U_1}{I_{sc1} - I_{sc2}} \quad (27)$$

Da das Spektrum für die  $R_s$ -Messung nicht bekannt sein muss, kann auch unter freiem Himmel unter natürlichem Sonnenlicht gemessen werden.

Die Bedingung der unveränderten spektralen Verteilung des Sonnenlichtes lässt sich dadurch einhalten, daß die Messung der beiden Kennlinien innerhalb eines kurzen Zeitintervalls ( $\Delta T < 1 \text{ min}$ ) durchgeführt wird.

Die Veränderung der Bestrahlungsstärke ohne Änderung des Spektrums wird durch ein großflächiges Filter bewirkt, das unmittelbar nach der ersten Messung ohne Filter über die Solarmodul-Fläche gelegt wird.

Als Filter wird ein feinmaschiges Netz verwendet (Maschenabstand ca. 5 mm). Dadurch bleibt das Spektrum unverändert.

#### 3.2 Exemplarisches Messergebnis

Die Ermittlung des Serien-Innenwiderstandes soll am Beispiel der folgenden Messung gezeigt werden.

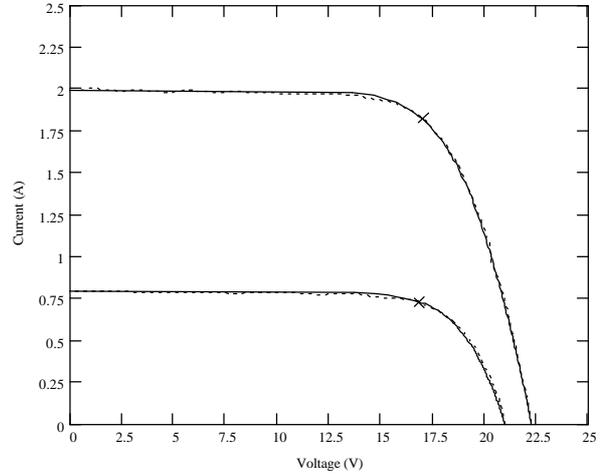


Abb. 8. Messungen zur  $R_s$ -Ermittlung

##### Messung 1

$$\begin{aligned} I_{sc1} &= 1.998 \text{ A} & R_{pv1} &= 0.908 \Omega \\ U_{oc1} &= 22.235 \text{ V} & M &= -1.652 \frac{\text{V}}{\text{A}} & U_{T1} &= 1.488 \text{ V} & (28) \\ I_{p \max 1} &= 1.821 \text{ A} & I_{01} &= 6.442 \cdot 10^{-7} \text{ A} \\ U_{p \max 1} &= 16.977 \text{ V} & I_{ph1} &= 1.998 \text{ A} \end{aligned}$$

##### Messung 2

$$\begin{aligned} I_{sc2} &= 0.795 \text{ A} & R_{pv2} &= 0.721 \Omega \\ U_{oc2} &= 20.958 \text{ V} & M &= -2.551 \frac{\text{V}}{\text{A}} & U_{T2} &= 1.455 \text{ V} & (29) \\ I_{p \max 2} &= 0.730 \text{ A} & I_{02} &= 4.402 \cdot 10^{-7} \text{ A} \\ U_{p \max 2} &= 16.798 \text{ V} & I_{ph2} &= 0.795 \text{ A} \end{aligned}$$

In Abb.8 sind zur Demonstration der Approximationsgenauigkeit sowohl die Messwerte als auch die mit (8) berechneten Effektivkennlinien eingetragen.

Festlegung der Stromdifferenz mit (24)

$$\Delta I = 0.5 \cdot I_{sc2} = 0.398 \text{ A} \quad (30)$$

Arbeitspunkt  $U_1$  mit (8)

$$U_1 = U(I_{sc1} - \Delta I, R_{pv1}, U_{T1}, I_{01}, I_{ph1}) = 18.38 \text{ V} \quad (31)$$

Arbeitspunkt  $U_2$  mit (8)

$$U_2 = U(I_{sc2} - \Delta I, R_{pv2}, U_{T2}, I_{02}, I_{ph2}) = 19.663 \text{ V} \quad (32)$$

Serien-Innenwiderstand

$$R_s = \frac{19.663 \text{ V} - 18.38 \text{ V}}{1.998 \text{ A} - 0.795 \text{ A}} \quad (33)$$

$$R_s = 1.067 \Omega \quad (34)$$

#### 4. PEAK-LEISTUNG

##### 4.1 Messmethode

Peakleistung ist die Spitzenleistung bei Standard-Prüfbedingungen (STC)

$$P_{pk} = P_{\max}(E_0, T_{j0}) \quad (35)$$

Standard Test Conditions (STC):

- Bestrahlungsstärke  $E_0 = 1000 \frac{W}{m^2}$  (36)

- Sonnenspektrum AM 1.5 (37)

- Zelltemperatur  $T_{j0} = 25 \text{ °C} (= 298 \text{ K})$  (38)

Bei Messungen der aktuellen Spitzenleistung unter natürlichen Umgebungsbedingungen hat neben der Bestrahlungsstärke auch die aktuelle spektrale Verteilung des Lichtes maßgebliche Auswirkung auf die Photonen-Ausbeute. Die spektrale Bewertung der Solarzellenempfindlichkeit drückt sich im Kurzschluss-Strom der Solarzelle aus.

Vorschlag: zur linearen Beschreibung der spektralen Abhängigkeit wird eine spektral bewertete Effektive Bestrahlungsstärke eingeführt.

Definition: Die Effektive Bestrahlungsstärke für eine Solarzelle wird nur aus dem Teil des Sonnenspektrums gebildet, das zur Energiewandlung in dieser Solarzelle genutzt wird. In Analogie zur Einheit Lux (lx) der Beleuchtungstechnik, wo die Bestrahlungsstärke durch die menschliche Augenempfindlichkeit spektral bewertet wird, wird hier vorgeschlagen, spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle durch eine effektive Bestrahlungsstärke mit der neuen Einheit "Photovoltaik Lux" (phox) zu beschreiben. Der Kurzschluss-Strom ist ein lineares Maß für die effektive Bestrahlungsstärke.

Bei AM 1.5 gilt:

$$E_{\text{eff}} = E \quad (39)$$

$$\text{phox} = \frac{W}{m^2}$$

Außerhalb AM 1.5 gilt:

$$E_{\text{eff}} = I_{sc} \cdot K_{\text{phox}} \quad (40)$$

Das zu vermessende Solarmodul dient bei bekannter phox-Konstante selbst als "phox-Messgerät".

Ermittlung der phox-Konstanten bei AM 1.5 an einem klaren Tag unter natürlichen Umgebungsbedingungen:

AM 1.5 tritt auf, wenn für den Zenitwinkel gilt

$$\cos(\Theta_z) = \frac{1}{AM} \quad (41)$$

Mit AM=1.5 folgt daraus

$$\cos(\Theta_z) = \frac{1}{1.5} \quad (42)$$

Die Uhrzeiten, zu denen dieser Zenitwinkel auftritt lassen sich bei bekannter geografischer Lage und Datum ermitteln (Duffie J.A., Beckman W.A. 1980).

Beispiel: Dortmund ( $\lambda = -7^\circ$  östliche Länge,  $\varphi = 51^\circ$  nördliche Breite) 17. August (Wagner A. 1999)

Angaben in Mitteleuropäischer Sommerzeit MESZ

$$AM = 1.5(\text{am}) \quad 11\text{h}9 \text{ min} \quad (43)$$

$$AM = 1.5(\text{pm}) \quad 16\text{h}4 \text{ min}$$

Zur Ermittlung der phox-Konstante wird bei AM 1.5-Bedingungen mit einem Pyranometer die Bestrahlungsstärke gemessen sowie der dabei auftretende Kurzschluss-Strom.

$$K_{\text{phox}} = \frac{E_{AM1.5}}{I_{scAM1.5}} \quad (44)$$

Bei bekannter phox-Konstante für das zu messende Modul ist bei bekanntem Kurzschluss-Strom eine zusätzliche Messung der Bestrahlungsstärke für die Ermittlung der Peakleistung nicht notwendig. Für die weiteren Berechnungen wird die Bestrahlungsstärken-Abhängigkeiten immer auf die effektive Bestrahlungsstärke  $E_{\text{eff}}$  (gemessen in phox) bezogen. Zur Ermittlung der Peakleistung eines PV-Moduls muss zunächst die phox-Konstante des Moduls bekannt sein. Bei bekannter phox-Konstante kann zu einem beliebigen Zeitpunkt eine aktuelle Kennlinie des Moduls gemessen werden.

Es lassen sich nun die aktuellen Effektiv-Kennlinien-Parameter ermitteln. Bei zusätzlich bekannter Zelltemperatur  $T_j$  sowie dem Temperaturkoeffizient  $c_T$  der Leistung lassen sich die Erwartungswerte bei STC berechnen. (Wagner A. 1999).

Umrechnung von Messwerten auf STC:

$$I_{p\max0} = I_{p\max} \frac{E_0}{E_{\text{eff}}} \quad (45)$$

$$U_{p\max0} = \frac{U_{p\max}}{1 + c_T(T_j - T_{j0})} \quad (46)$$

$$+ U_T \frac{T_{j0}}{T_j} \ln\left(\frac{E_0}{E_{\text{eff}}}\right) - I_{p\max} R_{pv} \left(\frac{E_0}{E_{\text{eff}}} - 1\right)$$

Es folgt die Peakleistung:

$$P_{pk} = I_{p\max0} \cdot U_{p\max0} \quad (47)$$

Zur vollständigen Kennlinien-Darstellung können die folgenden Beziehungen näherungsweise herangezogen werden.

$$I_{sc0} = I_{sc} \frac{E_0}{E_{\text{eff}}} \quad U_{oc0} = U_{oc} \frac{U_{p\max0}}{U_{p\max}} \quad (48)$$

Zur Anwendung der Beziehung (46) werden noch einige Zusatz-Informationen benötigt.

- Leistungs-Temperaturkoeffizient Silizium-Zellen
- Zelltemperatur

Der Leistungstemperaturkoeffizient muss aus den Datenblatt-Angaben übernommen werden. Sind keine Angaben vorhanden, so kann für kristalline Silizium-Zellen folgender Wert als Standardwert angenommen werden:

$$\text{typisch } c_T = -0,0044 \text{ K}^{-1} \quad (49)$$

Das folgende Diagramm zeigt den Fehlerbereich der ermittelten Peakleistung, bedingt durch die Unsicherheit des verwendeten Temperaturkoeffizienten.

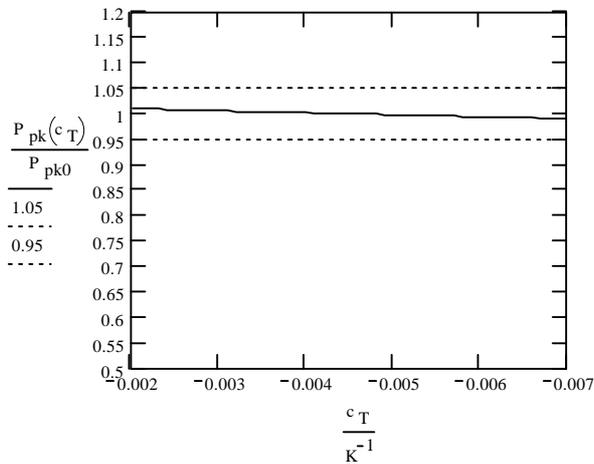


Abb. 9. Fehlerbereich Temperaturkoeffizient

Die Zelltemperatur verändert sich in Abhängigkeit von Einstrahlung und Umgebungstemperatur. Häufig existiert die Angabe der Nennbetriebs-Zelltemperatur.

$$\text{NOCT} = T_j(E_N, T_{\text{ambN}}) \quad (50)$$

Prüfbedingungen zur Ermittlung von NOCT  
Nominal Operating Cell Temperature

- Bestrahlungsstärke  $E_N = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  (51)
- Umgebungstemperatur  $T_{\text{ambN}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (52)

Die Nennbetriebs-Zelltemperatur muss aus den Datenblatt-Angaben übernommen werden. Sind keine Angaben vorhanden, so kann für kristalline Silizium-Zellen folgender Wert als Standardwert angenommen werden:

$$\text{typisch } \text{NOCT} = 48^\circ\text{C} \quad (53)$$

Bei bekannter Umgebungstemperatur lässt sich über NOCT die Zelltemperatur näherungsweise ermitteln (Wagner A. 1999).

Es folgt die Zelltemperatur in Abhängigkeit von der Einstrahlung.

$$T_j(E_{\text{eff}}, T_{\text{amb}}) = T_{\text{amb}} + (\text{NOCT} - T_{\text{ambN}}) \frac{E_{\text{eff}}}{E_N} \quad (54)$$

Das folgende Diagramm zeigt den Fehlerbereich der ermittelten Peakleistung, bedingt durch die Unsicherheit bei der ermittelten Zelltemperatur

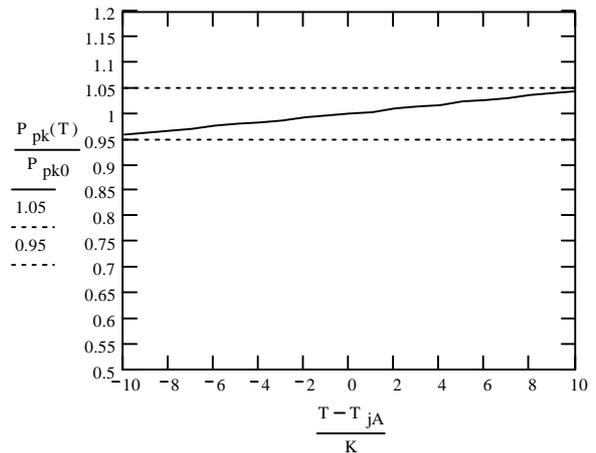


Abb. 10. Fehlerbereich Zelltemperatur

#### 4.2. Exemplarisches Messergebnis

Die Messung in Abb.8 zur Ermittlung des  $R_s$  wurde bei folgender Effektiv-Bestrahlungsstärke durchgeführt:

$$E_{\text{eff1}} = 777 \text{ phox} \quad (55)$$

Durch Abdeckung des Moduls mit dem feinmaschigen Netz verringerte sich die Effektiv-Bestrahlungsstärke um den Faktor

$$k = \frac{I_{\text{sc2}}}{I_{\text{sc1}}} = 0,398 \quad (56)$$

Somit folgt

$$E_{\text{eff2}} = 309 \text{ phox} \quad (57)$$

Die folgende Zelltemperatur wurde für beide Messungen ermittelt:

$$T_j = 294 \text{ K} \quad (58)$$

Hinweis: da die beiden Messungen innerhalb eines kurzen Zeitintervalls durchgeführt wurden und die Zelltemperatur sich durch das Maschenfilter nicht sprunghaft ändert, liegt bei beiden Messungen die gleiche Zelltemperatur vor.

Zur Berechnung der Peakleistung mit den Formeln (45), (46) und (47) wurden die folgenden Werte verwandt:  
Messung 1

$$\begin{aligned} I_{p\max 1} &= 1.821 A & (45) \longrightarrow I_{m1} &= 2.35 A \\ U_{p\max 1} &= 16.977 V & & \\ U_{T1} &= 1.488 V & (46) \longrightarrow U_{m1} &= 16.59 V & (59) \\ R_{pv1} &= 0.908 \Omega & & \\ T_{j1} &= 294 K & (47) \longrightarrow P_{pk1} &= 39 W \\ E_{eff1} &= 777 \text{ phox} & & \end{aligned}$$

Messung 2

$$\begin{aligned} I_{p\max 2} &= 0.730 A & (45) \longrightarrow I_{m2} &= 2.36 A \\ U_{p\max 2} &= 16.798 V & & \\ U_{T2} &= 1.455 V & (46) \longrightarrow U_{m2} &= 17.06 V & (60) \\ R_{pv2} &= 0.721 \Omega & & \\ T_{j2} &= 294 K & (47) \longrightarrow P_{pk2} &= 40 W \\ E_{eff2} &= 309 \text{ phox} & & \end{aligned}$$

Im vorliegenden Fall handelt es sich um ein polykristallines Modul, Herstellungsjahr 1991. Qualitätskontrolle Februar 2000. Datenblattangaben: Peakleistung  $P_{pk} = 50 \text{ W}$  Toleranz  $\pm 10\%$ , Degradationsverluste in 10 Jahren  $<10\%$  Mit der garantierten Mindestleistung  $45 \text{ W}$  und den Degradationsverlusten  $<5 \text{ W}$  folgt die zulässige Mindestleistung nach 10 Jahren  $40 \text{ W}$ . Die 10-Jahres-Garantie wurde hier eingehalten.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Beschreibung des Betriebsverhaltens von Solarzellen durch die Effektive Solarzellen-Kennlinie ermöglicht die explizite Berechnung der Kennlinienparameter aus den Kennwerten  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $I_{p\max}$ ,  $U_{p\max}$  mit einer Genauigkeit von 1% (bezogen auf die Leistung im MPP). Die Berechnung des Serien-Innenwiderstandes  $R_s$  wird dadurch explizit möglich und ersetzt die grafische Methode, die in IEC 60891 angegeben wird.

Die zur  $R_s$ -Ermittlung notwendigen beiden Kennlinien gleicher Temperatur aber unterschiedlicher Bestrahlungsstärken werden durch Abschattung des Solarmoduls durch ein feinmaschiges Netz bewirkt. Das feinmaschige Netz wird nach der ersten Messung ohne Netz über das Solarmodul gezogen.

Bei der Ermittlung der Peakleistung wird zur Umrechnung der aktuellen Effektiv-Kennlinie auf STC eine neue Beschreibung der Bestrahlungsstärke als effektive Bestrahlungsstärke vorgeschlagen. In Analogie zur Helligkeitsmessung, die mit der auf die menschliche Augenempfindlichkeit angepassten Einheit Lux (lx) eine spektrale Bewertung des Sonnenlichtes vornimmt, kann durch eine Messgröße, die die spektrale Empfindlichkeit der jeweiligen Solarzelle beschreibt, ein einfache Umrechnung der gemessenen aktuellen Kennlinie auf

STC durchgeführt werden. Als neue Einheit wird hier das auf die jeweilige Solarzellenempfindlichkeit angepasste PhotovoltaikLux (phox) vorgeschlagen.

## FORMELZEICHEN

AM	Air Mass, relative Weglänge durch Erdatmosphäre
$c_T$	Leistungs-Temperaturkoeffizient
E	Bestrahlungsstärke ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$E_0$	$1000 \text{ W}/\text{m}^2$ (Bestrahlungsstärke bei STC)
$E_{eff}$	Effektive Bestrahlungsstärke (phox)
$E_N$	$800 \text{ W}/\text{m}^2$ (Bestrahlungsstärke für NOCT)
I	Strom (A)
$I_0$	Sperrstrom (A)
$I_D$	Diodenstrom (A)
$I_L$	Strom im aktuellen Arbeitspunkt (A)
$I_{ph}$	Photostrom (A)
$I_{p\max}$	Strom im MPP (A)
$I_{sc}$	Kurzschlussstrom (A)
$K_{phox}$	Phox-Konstante des PV-Moduls
M	Kennliniensteigung im Leerlaufpunkt (V/A)
MPP	Maximum Power Point Punkt maximaler Leistung
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature( $^{\circ}\text{C}$ ) Zellen-Betriebstemperatur bei $T_{ambN}$ und $E_N$
$P_{pk}$	peak power(W) Spitzenleistung bei STC
R	Widerstand ( $\Omega$ )
$R_L$	Lastwiderstand (W)
$R_p$	Parallel-Widerstand ( $\Omega$ )
$R_{pv}$	Photovoltaik-Widerstand (V/A)
$R_s$	Serien-Widerstand ( $\Omega$ )
STC	Standard Test Conditions ( $E_0$ , $T_{j0}$ bei AM 1.5)
T	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ oder K)
$T_{ambN}$	$20^{\circ}\text{C}$ (Umgebungstemperatur für NOCT)
$T_j$	Sperrschicht-Temperatur (K)
$T_{j0}$	$25^{\circ}\text{C}$ (Zellentemperatur bei STC)
U	Spannung (V)
$U_D$	Diodenspannung (V)
$U_L$	Spannung im aktuellen Arbeitspunkt (V)
$U_{oc}$	Leerlaufspannung (V)
$U_{p\max}$	Spannung im MPP (V)
$U_T$	Temperaturspannung (K)

## LITERATUR

- Duffie J.A., Beckman W.A. (1980) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley and Sons, New York, Brisbane.
- IEC 891. (1992) *Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices*.
- DIN EN 60891. (1994) *Verfahren zur Umrechnung von gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien von photovoltaischen Bauelementen aus kristallinem Silizium auf andere Temperaturen und Einstrahlungen*.
- Schulte K.M., Sommerfeld A., Wagner A. (1993) *Mobiles Mess-System für PV-Stromversorgungsanlagen Final report, research project AG-Solar NRW, Jülich*
- Wagner A. (1999) *Photovoltaik Engineering. Die Methode der Effektiven Solarzellen-Kennlinie*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.