

Analytisch eindeutige Berechnung der Parameter des Eindiodenmodells aus Datenblattangaben

Jürgen Schumacher, Ursula Eicker, Dirk Pietruschka

Forschungszentrum Nachhaltige Energietechnik zafh.net

Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart

schumacher@zafh.net, Telefon 0711.8926.2840, Telefax 0711.8926.2698, www.zafh.net

Problemstellung

Von Simulationstools zur Prognose des Energieertrags photovoltaischer Anlagen wird heutzutage ein extrem hohes Maß an die Güte der Rechenergebnisse gestellt. In realen Projekten hängt die Entscheidung, ob eine Anlage wirtschaftlich ist oder nicht, meist prozentgenau von den Ergebnissen der Ertragsgutachten ab. Den wichtigsten Faktor macht hier sicherlich die Kenntnis der langjährigen Monatsmittelwerte der Globalstrahlung am Projektstandort aus. Liegen die um fünf Prozent daneben, kann kein Programm der Welt eine Ertragsprognose mit einem Fehler kleiner fünf Prozent berechnen.

Den zweitwichtigsten Faktor stellt die Modellierung des PV-Generators selbst dar. Niemand rechnet bei Ertragsprognosen für kristallines Silizium mit einem Modell, das genauer ist, als das unter dem Namen Zweidiodenmodell bekannte. Das Hauptproblem hierbei ist, dass die Parameter des Zweidiodenmodells nur für wenige PV Module bekannt sind, obwohl es sehr schnelle Fitverfahren gibt, die die Parameter schon beim Flashertest von Zellen in der Produktion numerisch bestimmen können. Was letztendlich über ein Modul eines bestimmten Typs bekannt ist, sind die Herstellerangaben über das Modulverhalten unter Standard Test Bedingungen, also 1000 W/m^2 bei AM 1.5 und $25 \text{ }^\circ\text{C}$ Modultemperatur sowie der Temperaturkoeffizienten des Kurzschlussstroms und der Leerlaufspannung.

Das Eindiodenmodell gilt als erste Vereinfachung des Zweidiodenmodells und wird in Simulationsprogrammen häufig zur Berechnung von Ertragsprognosen herangezogen. Die Parameter lassen sich relativ einfach aus den Herstellerangaben berechnen [z. B. Duffie, Beckman]. In der Regel werden dabei jedoch Annahmen gemacht (zum Beispiel, dass der Parallelwiderstand unendlich groß ist), die zwangsläufig zu schwer abschätzbaren Fehlern bei der Erstellung der Ertragsprognose führen.

Wir haben ein analytisch eindeutiges Verfahren zur Berechnung der Parameter des Eindiodenmodells gefunden, das ausschließlich auf den Datenblattangaben der Hersteller basiert und diese eineindeutig reproduziert. Wir zeigen, in welcher Größenordnung dennoch der Fehler bei der Prognose des langjährigen Energieertrages von PV-Anlagen bei der Verwendung der Herstellerangaben und des Eindiodenmodells gegenüber einem Fit an eine gemessene Kennlinie liegt.

Zweidiodenmodell

Solarzellen aus kristallinem Silizium sind großflächige Dioden, deren Physik sich mit der Shockley Theorie erklären lässt. Im Ergebnis kann das Strom-Spannungs-Verhalten idealer Solarzellen mit der Diodengleichung

$$i_s = c_s T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

beschrieben werden. Hierin ist neben den physikalischen Konstanten Bandabstand des Halbleitermaterials E_g , Boltzmann Konstante k , Elementarladung q sowie der Spannung V , der Stromdichte i_s und der Temperatur T die Shockley Konstante c_s der einzig freie Fitparameter.

Die Shockley Theorie vernachlässigt Rekombination in der Raumladungszone. Wird diese berücksichtigt, so ergibt sich der Rekombinationsstrom zu

$$i_r = c_r T^{5/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1\right)$$

mit dem anpassbaren Rekombinationsparameter c_r . Mit der temperatur- und strahlungs-abhängigen Photostromdichte $i_{ph} = (c_{ph} + c_t T)G$ und unter Berücksichtigung von Leckströmen durch den Parallelwiderstand r_p sowie des Spannungsabfalls am Serienwiderstand r_s folgt die bekannte Zweidiodenmodell Gleichung

$$i = i_{ph} - i_s - i_r - \frac{V + ir_s}{r_p}$$

wobei in i_s und i_r der Spannungsabfall am Serienwiderstand r_s zu berücksichtigen ist, also $V + ir_s$ statt V einzusetzen ist.

Mit den sechs Parametern c_{ph} , c_t , c_s , c_r , r_s und r_p lässt sich also das physikalische Verhalten realer Solarzellen aus kristallinem Silizium hervorragend beschreiben – das gilt im übrigen auch für zum Beispiel CIS Zellen; für amorphes Silizium muss die Spannungsabhängigkeit des Photostroms berücksichtigt werden.

Das Problem, die Parameter für eine konkrete Zelle bzw. ein Modul zu bestimmen, lässt sich prinzipiell auf zwei Arten lösen: Liegen eine oder mehrere Kennlinien vor, so kann man über ein Fitverfahren die Parameter so anpassen, dass die Abweichung zwischen Daten und Fit minimiert wird. Mit dem so ermittelten Parametersatz lässt sich das Modul über den gesamten Einstrahlungsbereich mit einem Fehler von weniger als 0.5 Prozent simulieren.

Meist liegen jedoch nur die Datenblattangaben eines Moduls vor. In diesem Fall müssen die Parameter über analytische Gleichungen berechnet werden. Diese Gleichungen sind bisher meist für das Eindiodenmodell angewendet worden.

Eindiodenmodell

Obwohl Shockleystrom und Rekombinationsstrom linear unabhängig sind, werden beide Stromterme unter Einführung eines unphysikalischen "Diodenfaktors" n_s häufig zusammengefasst und als Eindiodenmodell bezeichnet:

$$i = i_{\text{ph}} - c_s T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{q(V + ir_s)}{n_s kT}\right) - 1\right) - \frac{V + ir_s}{r_p}$$

Das Eindiodenmodell zur Simulation der Strom-Spannungs-Kennlinien von Solarzellen und PV-Modulen gilt allgemein als unzureichend zur Beschreibung des Verhaltens realer Solarzellen. In der Fachliteratur wird unterstellt, dass die Bestimmung der Parameter zu physikalisch unsinnigen Werten – wie zum Beispiel negativen Serienwiderständen – führt [Duffie, Beckman]. Desweiteren wird allgemein akzeptiert, dass es nicht möglich ist, alle sechs Modellparameter aus den "fünf" Herstellerangaben (Nennleistung (V_m, I_m) , Kurzschlussstrom I_{sc} und dessen Temperaturkoeffizient α_I , Leerlaufspannung V_{oc} und deren Temperaturkoeffizient α_V) zu berechnen, die üblicherweise auf den Datenblättern der Hersteller angegeben werden [ebenda] – mit der Konsequenz, dass z. B. die modellierte Nennleistung nicht mit der vorgegebenen Leistung übereinstimmt.

Tatsächlich sind diese Gegenargumente aber darauf zurückzuführen, dass bisher übersehen worden ist, dass aufgrund der Bedingung des Punktes maximaler Leistung an dieser Stelle $dP/dV = 0$ gelten muss und somit die Herstellerangaben eine sechste linear unabhängige Gleichung zur Bestimmung der Parameter beinhalten. Also lassen sich die sechs Parameter des Eindiodenmodells mathematisch eindeutig aus den Datenblattangaben berechnen. Mit etwas Algebra und Analysis kommt man zu einem Satz von Gleichungen für die Parameter, die sich mit einem Taschenrechner von Hand berechnen lassen.

Wir haben das Verfahren auf eine Datenbank [Photon] mit Daten von mehr als zweitausend Modulen angewendet und die Datensätze in die Simulationsumgebung INSEL [Luther, Schumacher] integriert. Negative Werte für den Serienwiderstand kommen praktisch nicht vor, wie Abbildung 1 deutlich zeigt.

Ein Problem aber liegt darin, dass durch die Herstellerangaben nicht spezifiziert ist, wie der Verlauf des Stromabfalls der Module im Spannungsbereich bis zum MPP ist. Dieser Fehler lässt sich nur durch einen Fit an eine komplette Kennlinie vermeiden.

In Abbildung 2 ist eine gemessene Strom-Spannungs-Kurve und die zugehörige Leistung einer Beipiel solarzelle aufgetragen. Zusätzlich eingezeichnet sind die Kurvenverläufe eines an das Zweidiodenmodell angefütteten Parametersatzes. Mit bloßem Auge sind die Kurven kaum zu unterscheiden. Das dritte Kurvenpaar (mit etwas niedrigerem Strom bzw. niedrigerer Leistung) wurde nach dem oben beschriebenen analytischen Parameterberechnungsverfahren berechnet.

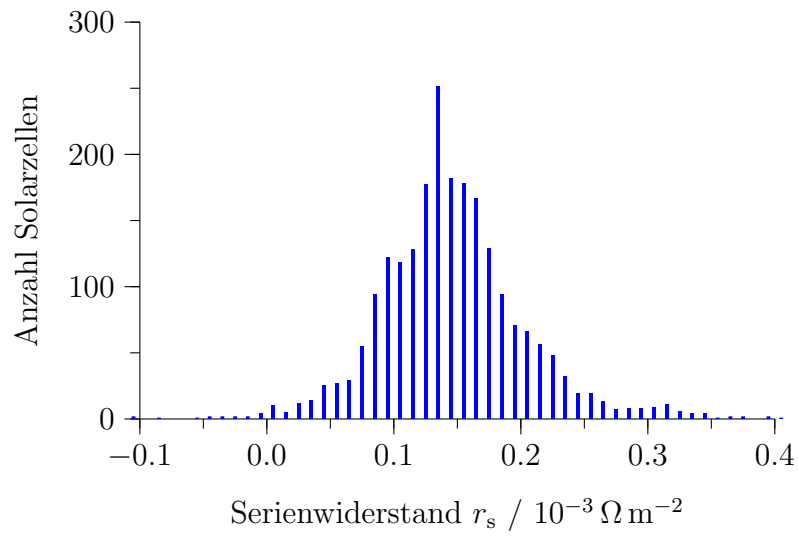


Abbildung 1: Serienwiderstandswerte von Solarzellen – berechnet aus der Photon Moduldatenbank 2006 mit mehr als 2000 Modulen.

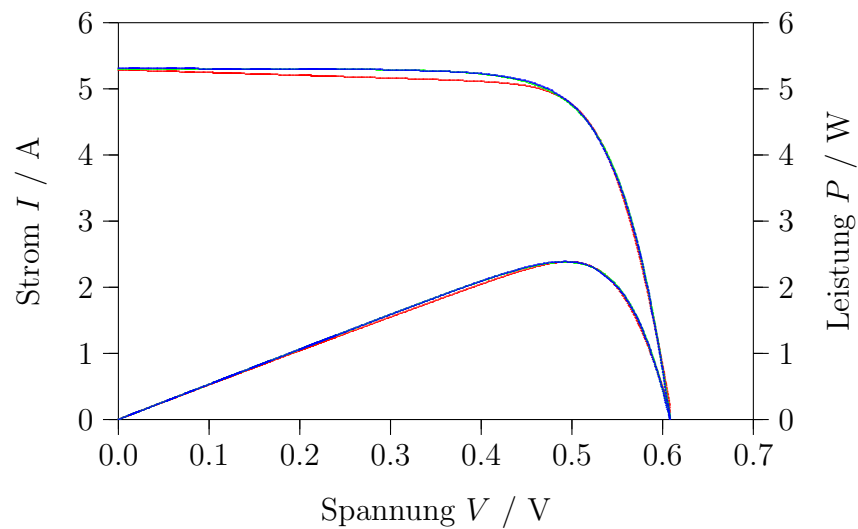


Abbildung 2: Strom-Spannungs-Charakteristik und Leistung einer Beispielzelle bei Standard Test Bedingungen.

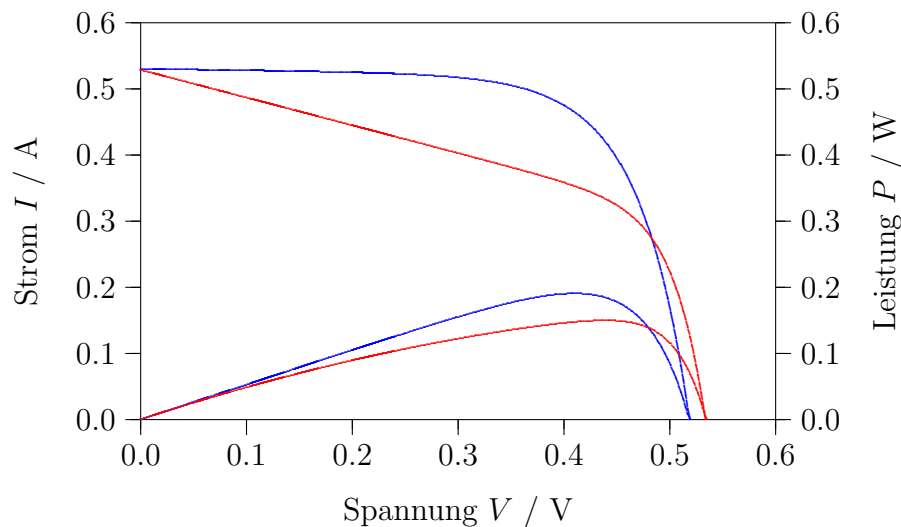


Abbildung 3: Strom-Spannungs-Charakteristik und Leistung einer Beispielizele bei 100 W/m^2 Einstrahlung und $25 \text{ }^\circ\text{C}$ Modultemperatur.

Die für die Parameterberechnung verwendeten Datenblattangaben sind: Leerlaufspannung 0.60881 V , Kurzschlussstrom 5.3125 A , Spannung im Punkt maximaler Leistung 0.49223 V , zugehöriger Strom 4.8329 A , Temperaturkoeffizient des Kurzschlussstroms 0.003397 A/K , Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung -0.002222 V/K . Die Nennleistung der Zelle liegt demzufolge bei 2.3789 Watt . Mit dem berechneten Parametersatz ergibt sich die Nennleistung der Zelle aufgrund kleiner Rundungsfehler zu 2.3839 Watt , also einem um 0.2 Prozent höheren Wert.

Bei hohen Einstrahlungen scheint die Abweichung zwischen den drei Fällen vernachlässigbar. Bei Betrachtung der Kurven bei niedriger Einstrahlung von 100 W/m^2 in Abbildung 3 fällt jedoch die große Abweichung zwischen der "realen" (d.h. aus dem perfekten Zweiodenmodell Fit umgerechneten) Zelle und dem analytisch aus den Datenblattangaben berechneten Verlauf auf. Die Abweichung in der Leistung liegt hier im Punkt maximaler Leistung bei -44.1 mW bzw. -23.1 Prozent .

Abbildung 4 zeigt die Abweichungen als Funktion der Einstrahlung. Unterhalb von ca. 200 W/m^2 steigt der Fehler rasch auf bis zu 100 Prozent an.

Ertragsprognosen

Wie stark sich diese Abweichungen in einer mehrjährigen Ertragssimulation auswirken, haben wir am Beispiel für den Standort München über den Zeitraum von acht Jahren (1998 bis 2005) berechnet. Ausgangsbasis für die meteorologischen Daten waren die vom Deutschen Wetterdienst in der Zeitschrift Sonnenenergie veröffentlichten Monatsmittelwerte der Globalstrahlung sowie die langjährigen Monatsmittel der Umgebungstemperatur, die der DWD unter www.wetter.com veröffentlicht. Daraus wurden in INSEL mit den Standardverfahren Stundenmittel der Strahlung auf eine 30 Grad geneigte, südorientierte Fläche berechnet und für jede Stunde der Ertrag im Punkt maximaler Leistung der Zelle mit den beiden Parametersätzen berechnet.

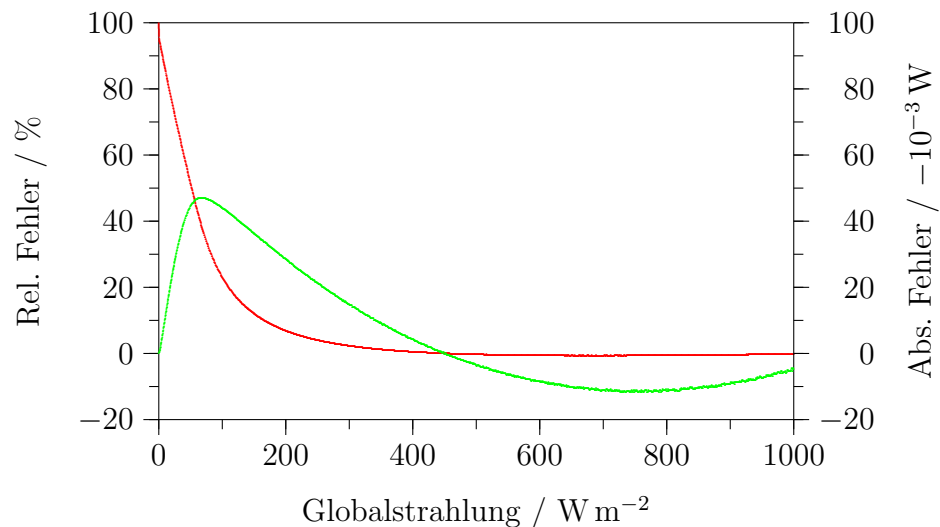


Abbildung 4: Relative und absolute Abweichung zwischen Zweidiodenmodell Fit und Eindiodenmodell mit analytisch berechnetem Parametersatz.

Der Ertrag der Zelle nach dem Zweidiodenmodell Fit beträgt 23189 Wh, der Ertrag mit dem analytisch berechneten Parametersatz liegt bei 22424 Wh, also 3.30 Prozent niedriger. Hochgerechnet auf 1 kW peak liegen die Werte bei 1219 bzw. 1176 kWh/kWp. Hierbei ist zu beachten, dass diese Angaben Erträge vor dem Wechselrichter sind und dass im Simulationszeitraum der Jahrhundertsommer 2003 enthalten ist.

Nach dem Wechselrichter (wir haben exemplarisch den Wirkungsgradverlauf des Conergy IPG 280K auf die Beispielzelle normiert) ergeben sich 22011 Wh und 21276 Wh bzw. 1156.6 und 1115.6 kWh/kWp, also mit 3.34 Prozent nur wenig weniger als ohne Wechselrichtersimulation.

Schlussfolgerung

Es ist sehr, sehr einfach, in der Ertragsberechnung von Photovoltaikanlagen allein aufgrund der Modellierung der Solarzellen – von Leistungstoleranzen, Verschattung, Mismatch Verlusten, Leitungsverlusten, Verschmutzungseffekten, Schneeproblemen und anderen Unregelmäßigkeiten komplett abgesehen – Fehler in der Größenordnung von drei bis vier Prozent zu machen. Für eine Ertragsberechnung, die eine Genauigkeit von wenigen Prozent garantieren kann, muss das Kennlinienfeld der PV Module genauer bekannt sein, als in den Datenblättern der Hersteller angegeben.

Referenzen

J. Duffie, W. Beckman. Solar Engineering of thermal processes. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1991.

U. Eicker, D. Pietruschka, J. Schumacher, J. da Costa Fernandes, Th. Feldmann, E. Bollin. Improving the energy yield of PV power plants through Internet based simulation, monitoring and visualisation. Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2670-2673) Barcelona, Spain, June 2005.

Photon Marktübersicht Solarmodule 2006.

J. Luther, J. Schumacher. INSEL – A simulation system for renewable electrical energy supply systems. Proceedings 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference (457–460) Lisbon, Portugal, April 1991. www.insel.eu.