

Wechselrichter-Wirkungsgrade

Praxisgerechte Modellierung und Abschätzung

von H. Schmidt, D.U. Sauer Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Zur Modellierung des Wirkungsgradverlaufes von Wechselrichtern und auch anderer Energiewandler wird ein physikalisch motiviertes Verlustmodell vorgestellt. Die notwendigen Parameter lassen sich einfach aus den Datenblattangaben bestimmen, wozu die erforderlichen Gleichungen angegeben werden. Die analytische Beschreibung der Wechselrichterverluste erlaubt eine einfache und präzise Umrechnung in unterschiedliche Darstellungsformen und den direkten Vergleich verschiedener Wechselrichter bezüglich ihres Wirkungsgradverhaltens. Unter Annahme bestimmter Randbedingungen ist eine einfache Abschätzung des zu erwartenden Jahreswirkungsgrades direkt aus den Datenblattangaben möglich.

1 Motivation

Mit dem Dioden-Modell zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften von Solarzellen existiert ein Modell für die numerische Simulation, das in weiten Kreisen anerkannt ist. Für den Wechselrichter, der einen wesentlichen Einfluß auf den Jahresertrag einer PV-Anlage hat, gibt es ein solches allgemein anerkanntes Modell nicht. Zwar existieren eine Reihe von Vorschlägen /1/, aber diese sind kompliziert und lassen sich nicht anhand der Datenblattangaben parametrisieren. In Simulationsprogrammen wird die Wirkungsgradkurve beispielsweise noch häufig durch lineare Interpolation zwischen einer mehr oder weniger großen Anzahl von Meßpunkten dargestellt.

Bei Energiewandlern kann der Umwandlungswirkungsgrad entweder in Abhängigkeit von der Eingangs- oder der Ausgangsleistung angegeben werden. Welche Darstellung ist nun sinnvoll?

Bei PV-Wechselrichtern ist dies abhängig vom Anwendungsfall - bei einem Wechselrichter für Inselssysteme wird die zu übertragende Leistung von der Last vorgegeben, so daß hier eine Darstellung des Wirkungsgrads

als Funktion der Ausgangsleistung angebracht ist.

Bei Netzwechselrichtern hingegen wird die momentane Leistung vom Solargenerator bestimmt - daher ist hier eine Auftragung des Wirkungsgrades über der Eingangsleistung sinnvoller.

Abb. 1 zeigt für drei Wechselrichter typische Verläufe der Wirkungsgradkurve in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung. Der Verlauf wird im Bereich kleiner Leistungen maßgeblich von den Leerlaufverlusten bestimmt, die für den Jahreswirkungsgrad von entscheidender Bedeutung sind. Bei höheren Leistungen überwiegen hingegen die lastabhängigen Verluste.

Zur Beschreibung der Wechselrichtercharakteristik wurde in /2/ ein physikalisch motivierter Ansatz angegeben, der von verschiedenen Autoren weiterverfolgt wurde /3,4,5/. Dabei handelt es sich um ein Verlustmodell, das zu dem in Formel (1) dargestellten Ansatz führt.

Dabei sind p_{out} , p_{in} und p_{loss} die auf die Nennleistung bezogenen Ausgangs-, Eingangs- bzw. Verlustleistungen. In /2/ werden die Parameter dieses Modells mit einer Regressionsanalyse der Meßpunkte bestimmt.

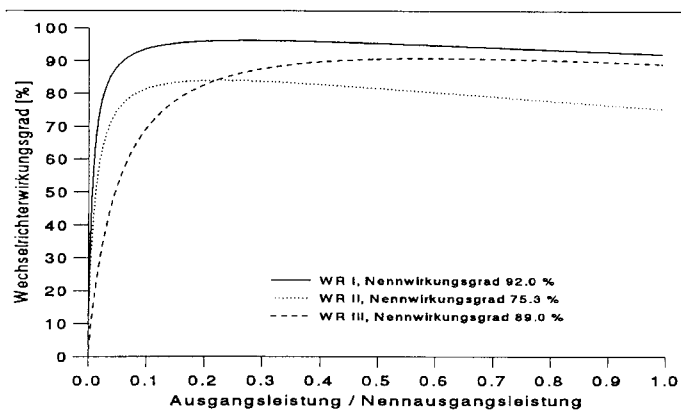


Abb. 1: Wirkungsgradkennlinien verschiedener Wechselrichter in Abhängigkeit von der auf die Nennleistung normierten Ausgangsleistung

Das im folgenden vorgestellte einfache Verfahren erlaubt eine Bestimmung der Modellparameter mit einem weit geringeren Aufwand, wenn der Wirkungsgrad im Datenblatt als Funktion der Ausgangsleistung oder als Funktion der Eingangsleistung gegeben ist.

Die dabei berechneten Parametersätze können durch einfache Zusammenhänge ineinander umgerechnet werden und erlauben somit einen Vergleich von Wechselrichtern auf einer gemeinsamen Basis.

Auf dem Modell basiert weiterhin ein Verfahren zur Abschätzung des Jahreswirkungsgrades von Wechselrichtern, das im letzten Abschnitt dargestellt wird.

2 Das Modell und die Parameterbestimmung

Der Modellansatz beruht auf der Annahme, daß sich die Verluste eines Wechselrichters in der in (2) angegebenen Form darstellen lassen.

Nach /2/ lassen sich die Terme p_{self} , v_{loss} und r_{loss} nach entsprechender Normierung interpretieren als ein leistungsunabhängiger Eigenverbrauch, als Spannungsverluste an Dioden und Transistoren, die Leistungsverluste proportional zum Ausgangsstrom und somit der Ausgangsleistung verursachen und ohmsche Verlustwiderstände z.B. von Spulen, Leitungen und Verbindern, deren Verluste quadratisch mit der Ausgangsleistung ansteigen.

Für den Wirkungsgrad erhält man daraus die Zusammenhänge (3) als Funktion der Ausgangsleistung mit dem Parametersatz (p_{self} , v_{loss} , r_{loss}) und (4) als Funktion der Eingangsleistung mit dem Parametersatz (p_{self}^* , v_{loss}^* , r_{loss}^*). Sollte bei der Parameter-

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{in}} = \frac{p_{out}}{p_{out} + p_{loss}} \quad (1)$$

$$p_{loss} = p_{self} + v_{loss} \cdot p_{out} + r_{loss} \cdot p_{out}^2 \quad (2)$$

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{out} + p_{self} + v_{loss} \cdot p_{out} + r_{loss} \cdot p_{out}^2} \quad (3)$$

$$\eta^* = \frac{1 + v_{loss}^*}{2 \cdot r_{loss}^* \cdot p_{in}} + \sqrt{\frac{(1 + v_{loss}^*)^2}{(2 \cdot r_{loss}^* \cdot p_{in})^2} + \frac{p_{in} - p_{self}^*}{r_{loss}^* \cdot p_{in}^2}} \quad (4)$$

$$\eta^* = \frac{p_{in} - p_{self}^* - v_{loss}^* \cdot p_{in} - r_{loss}^* \cdot p_{in}^2}{p_{in}} \quad (5)$$

Abb. 2: Formeln (1) bis (5)

$$p_{self} = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{\eta_{100}} - \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\eta_{50}} + \frac{5}{36} \cdot \frac{1}{\eta_{10}} \quad (6)$$

$$v_{loss} = -\frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\eta_{100}} + \frac{33}{12} \cdot \frac{1}{\eta_{50}} - \frac{5}{12} \cdot \frac{1}{\eta_{10}} - 1 \quad (7)$$

$$r_{loss} = \frac{20}{9} \cdot \frac{1}{\eta_{100}} - \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{\eta_{50}} + \frac{5}{18} \cdot \frac{1}{\eta_{10}} \quad (8)$$

Abb. 3: Formeln (6) bis (8)

berechnung der Parameter r_{loss}^* mit einem negativen Vorzeichen berechnet worden sein, muß das Pluszeichen vor der Wurzel durch ein Minuszeichen ersetzt werden. Die weitere Berechnung erfolgt dann mit dem negativen r_{loss}^* wie beschrieben.

Analog zur Gleichung (3) wäre eine Darstellung wie in (5) naheliegend. Diese erfüllt jedoch nicht die Forderung $\eta^* = 0$ für $p_{in} = p_{self}^*$.

Hier und im folgenden werden alle auf die Eingangsleistung bezogenen Größen mit einem "*" gekennzeichnet.

Aus der Erkenntnis, daß der Betriebswirkungsgrad eines Wechselrichters in PV-Anlagen wesentlich vom Verhalten im kleinen Leistungsbereich bestimmt wird, wurden die Hersteller dazu gedrängt, Wirkungsgrade im Datenblatt auch für kleine Leistungen anzugeben – heute geben eine große Zahl von Herstellern die Wirkungsgrade bei 10 %, 50 % und 100 % der Nennleistung an. Ein Vorteil des hier vorgestellten Modells ist es, daß es anhand dieser wenigen Datenblattangaben mit guter Genauigkeit parametrisiert werden kann.

Eine Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades wird dabei nicht explizit berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, daß die Ermittlung der Wirkungsgradkennlinie im thermischen Gleichgewicht des Wechselrichters erfolgte und somit lastbedingte thermische Einflüsse bereits enthalten sind.

Die Gleichungen (6) - (8) geben die Zusammenhänge an, die zur Berechnung des Parametersatzes (p_{self} , v_{loss} , r_{loss}) notwendig sind, wenn die Wirkungsgrade bei 10 %, 50 % und 100 % der Nennleistung gegeben sind. Hierbei bedeuten z.B. η_{50} den Wirkungsgrad bei 50 % der Nennausgangsleistung.

Die Zusammenhänge können auch für den Fall dreier beliebiger Stütz-

stellen angegeben werden. Die dafür notwendigen etwas aufwendigeren Formeln finden sich im Anhang.

Der Parametersatz (p_{self}^* , v_{loss}^* , r_{loss}^*) wird mit den Gleichungen (9) - (11) bestimmt, wenn die Wirkungsgrade als Funktion der Eingangsleistung gegeben sind.

Für einen schnellen Vergleich verschiedener Wechselrichter eignet sich auch ein modifizierter Ansatz, der lediglich zwei Parameter berücksichtigt. Dazu bleiben die Parameter v_{loss} bzw. v_{loss}^* unberücksichtigt. Es gelten mit dieser Wahl weiterhin die Gleichungen (3) bzw. (4), und zur Bestimmung der Parameter aus den Wirkungsgradangaben bei 10 % und 100 % der Nennleistung können die Gleichungen (12) und (13) bzw. (14) und (15) verwendet werden.

Zwischen den Parametersätzen (p_{self} , v_{loss} , r_{loss}) und (p_{self}^* , v_{loss}^* , r_{loss}^*) besteht der in (16) dargestellte einfache Zusammenhang.

Dabei ist η_{nom} der Wirkungsgrad bei Nennleistung des Wechselrichters. Da dieser unabhängig von einer Darstellung als Funktion der Ausgangs- oder Eingangsleistung ist, können die Datenblattangaben jeweils auf die gewünschte Bezugsgröße (Ausgangs- oder Eingangsleistung) umgerechnet werden und mit den Gleichungen (3) und (4) der Wirkungsgrad bei beliebigen Leistungen bestimmt werden.

Da es sich trotz der physikalischen Motivation des Ansatzes um ein em-

$$p_{self} = -\frac{1}{99} \cdot \frac{1}{\eta_{100}} + \frac{10}{99} \cdot \frac{1}{\eta_{10}} - \frac{1}{11} \quad (12)$$

$$r_{loss} = \frac{100}{99} \cdot \frac{1}{\eta_{100}} - \frac{10}{99} \cdot \frac{1}{\eta_{10}} - \frac{10}{11} \quad (13)$$

$$p_{self}^* = \frac{(\eta_{10}^*)^2 \cdot (\eta_{100}^* - 1) - 10 \cdot (\eta_{100}^*)^2 \cdot (\eta_{10}^* - 1)}{100 \cdot (\eta_{100}^*)^2 - \eta_{10}^*} \quad (14)$$

$$r_{loss}^* = \frac{10 \cdot (\eta_{10}^* - 10 \cdot \eta_{100}^* + 9)}{100 \cdot (\eta_{100}^*)^2 - \eta_{10}^*} \quad (15)$$

$$\frac{p_{self}^*}{p_{self}} = \eta_{nom} \quad \frac{v_{loss}^*}{v_{loss}} = 1 \quad \frac{r_{loss}^*}{r_{loss}} = \frac{1}{\eta_{nom}} \quad (16)$$

Abb. 4: Formeln (12) bis (16)

$$\eta_{10}^* = 72.7 \%, \quad \eta_{50}^* = 89.1 \% \quad \text{und} \quad \eta_{100}^* = 88.1 \% \quad (17)$$

$$p_{self}^* = 0.02492, \quad v_{loss}^* = 0.02655 \quad \text{und} \quad r_{loss}^* = 0.09041 \quad (18)$$

$$p_{self} = 0.02827, \quad v_{loss} = 0.02655 \quad \text{und} \quad r_{loss} = 0.07969 \quad (19)$$

$$\eta_{10} = 75.9 \%, \quad \eta_{50} = 89.0 \% \quad \text{und} \quad \eta_{100} = 88.1 \% \quad (20)$$

Abb. 5: Werte und Ergebnisse der Beispielrechnung

pirisches Modell handelt, kann es bei einigen Wirkungsgradverläufen zu negativen Werten beim Parameter v_{loss} kommen. Damit büßt das Modell aber nichts von seinen guten Eigenschaften für die Verwendung in Simulationen ein. Lediglich bei der physikalischen Interpretation dieses Parameters muß dieses Verhalten berücksichtigt werden.

3 Beispielrechnung

In diesem Abschnitt soll anhand eines Zahlenbeispiels der Umgang mit den Formeln der vorangegangenen Kapitel noch einmal verdeutlicht werden.

Als Information liegen die Wirkungsgrade bei 10 %, 50 % und 100 % der Eingangsleistung vor (siehe (17)). Mit den Gleichungen (9) - (11) werden die Parameter p_{self}^* , v_{loss}^* , r_{loss}^* bestimmt (siehe (18)).

Zur Berechnung der Parameter p_{self} , v_{loss} und r_{loss} für eine Darstellung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Ausgangsleistung mit Hilfe der Gleichung (3) werden die Zusammenhänge (16) verwendet. Damit ergeben sich für die Parameter die in (19) dargestellten Werte.

Mit den berechneten Parametern können wieder die Wirkungsgrade mit Gleichung (3) bei 10 %, 50 % und 100 % der Ausgangsleistung (s. Gleichung 20) oder an beliebigen anderen Stellen berechnet werden.

Während für mittlere und große Leistungen kaum Unterschiede im Wirkungsgrad bei den beiden Darstellungsarten festzustellen sind, zeigen sich im Bereich kleiner Leistun-

$$p_{self}^* = \frac{(\eta_{10}^*)^2 \cdot (\eta_{50}^* - \eta_{100}^*) + 5 \cdot \eta_{10}^* \cdot (2 \cdot (\eta_{100}^*)^2 - (\eta_{50}^*)^2) + 5 \cdot \eta_{50}^* \cdot \eta_{100}^* \cdot (\eta_{50}^* - 2 \cdot \eta_{100}^*)}{((\eta_{10}^*)^2 - 5 \cdot \eta_{10}^* \cdot (\eta_{50}^* + 2 \cdot \eta_{100}^*) + 50 \cdot \eta_{50}^* \cdot \eta_{100}^*) \cdot (\eta_{50}^* - 2 \cdot \eta_{100}^*)} \quad (9)$$

$$v_{loss}^* = \frac{[(\eta_{10}^*)^2 \cdot (\eta_{50}^* - 2 \cdot \eta_{100}^* + 1) + 5 \cdot \eta_{10}^* \cdot (4 \cdot (\eta_{100}^*)^2 - (\eta_{50}^*)^2) + 5 \cdot ((\eta_{50}^*)^2 \cdot (10 \cdot \eta_{100}^* - 9) - 20 \cdot \eta_{50}^* \cdot (\eta_{100}^*)^2 + 16 \cdot (\eta_{100}^*)^2)]}{[(\eta_{10}^* - 5 \cdot \eta_{50}^*) \cdot (\eta_{10}^* - 10 \cdot \eta_{100}^*) \cdot (2 \cdot \eta_{100}^* - \eta_{50}^*)]} \quad (10)$$

$$r_{loss}^* = \frac{10 \cdot (\eta_{10}^* - 9 \cdot \eta_{50}^* + 8 \cdot \eta_{100}^*)}{((\eta_{10}^*)^2 - 5 \cdot \eta_{10}^* \cdot (\eta_{50}^* + 2 \cdot \eta_{100}^*) + 50 \cdot \eta_{50}^* \cdot \eta_{100}^*) \cdot (\eta_{50}^* - 2 \cdot \eta_{100}^*)} \quad (11)$$

Abb. 6: Formeln (9) bis (11)

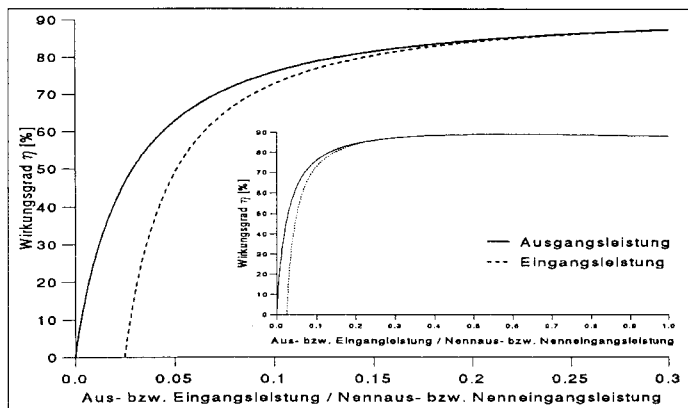


Abb. 7: Wirkungsgradkennlinien im Ausschnitt für kleine Leistungen und über den ganzen Leistungsbereich für den Wechselrichter der Beispielrechnung als Funktion der Ausgangs- und der Eingangsleistung

$$\begin{aligned} \bar{\eta}^* &= 1 - p_{self}^* \cdot 4.38 && \text{mit Nachtabschaltung} && (21) \\ \bar{\eta}^* &= 1 - p_{self}^* \cdot 8.76 && \text{ohne Nachtabschaltung} && (22) \\ \bar{\eta}^* &= 1 - p_{self}^* \cdot 4.38 - 0.4 \cdot r_{loss}^* && \text{mit Nachtabschaltung} && (23) \\ \bar{\eta}^* &= 1 - p_{self}^* \cdot 8.76 - 0.4 \cdot r_{loss}^* && \text{ohne Nachtabschaltung} && (24) \end{aligned}$$

Abb. 9: Formeln (21) bis (24)

gen beträchtliche Differenzen. Bei 5 % der Nenneingangsleistung erhält man einen Wirkungsgrad von 48.8 % und bei 5 % der Nennausgangsleistung von 62.7 % (s. Abb. 7).

4 Einfluß des Wirkungsgradverhaltens auf die Energiebilanz von PV-Systemen

Mit den in den vorigen Abschnitten angegebenen mathematischen Modellen zur Beschreibung des Wechselrichterwirkungsgrades lassen sich mittels Simulationsprogrammen recht genau die zu erwartenden Energieerträge eines PV-Systems berechnen. Neben dem Wechselrichter müssen dabei auch alle weiteren Systemkomponenten betrachtet werden, die durch ihren Eigenverbrauch zu Energieverlusten führen. Eine detaillierte Darstellung dieser Zusammenhänge ist z.B. in /4/ zu finden.

1. Die vom Solargenerator nach Abzug aller DC-Verluste an den Wechselrichter abgegebene Energie beträgt 1.000 kWh/(kW_p·a).
2. Der Wechselrichter hat die gleiche Nennleistung wie der Solargenerator.
3. Zwei verschiedene Betriebsmodi werden angenommen. Entweder Betrieb 24 Stunden am Tag (Betriebsdauer 8.760 h/a) oder Wechselrichter mit Nachtabschaltung (Betriebsdauer 4.380 h/a, Standby-Verluste werden vernachlässigt).
4. Die Rechnungen basieren auf dem Modell mit zwei Parametern (p_{self}^* , r_{loss}^*). Berücksichtigt man bei der Abschätzung des mittleren Jahreswirkungsgrades $\bar{\eta}$ nur den Einfluß des Eigenverbrauchs p_{self} , so ergeben sich mit den obigen Annahmen die einfachen Zusammenhänge (21) und (22).

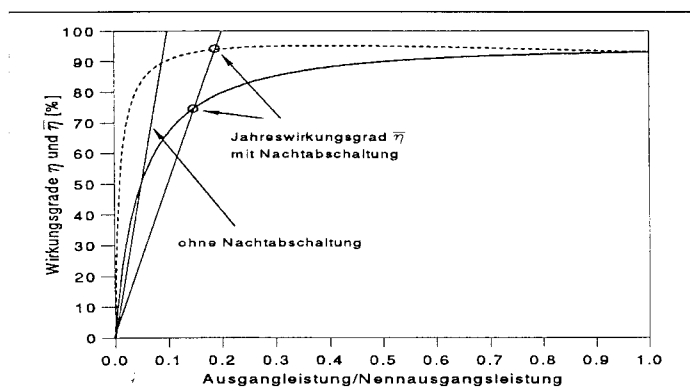


Abb. 10: Graphisches Verfahren zur Abschätzung des mittlerern Jahreswirkungsgrades

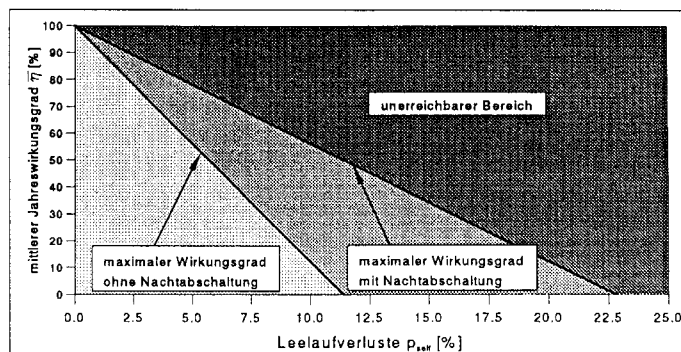


Abb. 8: Maximal erreichbarer Jahreswirkungsgrad in Abhängigkeit des Eigenverbrauchs p_{self} für Wechselrichter mit und ohne Nachtabschaltung

menhänge ist z.B. in /4/ zu finden. Im folgenden werden Verfahren und Grafiken angegeben, die es ermöglichen, den Einfluß des Wechselrichters in netzgekoppelten Anlagen abzuschätzen. Für diese Abschätzungen müssen für Mitteleuropa typische Annahmen gemacht werden:

In Abb. 8 ist dies graphisch dargestellt, wobei die beiden Geraden abhängig von der jeweiligen Betriebsart den maximal erreichbaren mittleren Wirkungsgrad kennzeichnen. Weiterhin ist zu ersehen:

Ohne Nachtabschaltung verursacht jedes Prozent Eigenverbrauch eine Abnahme des mittleren Jahreswirkungsgrades um ca. 10 %!

Der Einfluß der lastabhängigen Verluste auf die Energiebilanz ist bei netzgekoppelten Anlagen natürlich abhängig von der Einstrahlungsstatistik - bei Inselhausversorgungen hingegen sind sie fast völlig zu vernachlässigen. Zur Ermittlung dieser Abhängigkeit wurden in Rechnersimulationen unterschiedliche Wirkungsgradverläufe von Wechselrichtern mit für Mitteleuropa typischen Einstrahlungen kombiniert, woraus sich in Verbindung mit Gleichung (21) und (22) die recht genauen „Faustformeln“ (23) und (24) ergaben.

Die Formeln (23) - (24) können in gleicher Weise auch mit den Parametern p_{self} und r_{loss} (für Wechselrichter von Inselhausversorgungen) verwendet werden.

Da die Größen p_{self} und r_{loss} gemäß Abschnitt 2 aus dem Wirkungsgradverlauf berechnet werden können, ist es unter Berücksichtigung der eingangs gemachten Annahmen möglich, den mittleren Jahreswirkungsgrad auch direkt aus der Wirkungs-

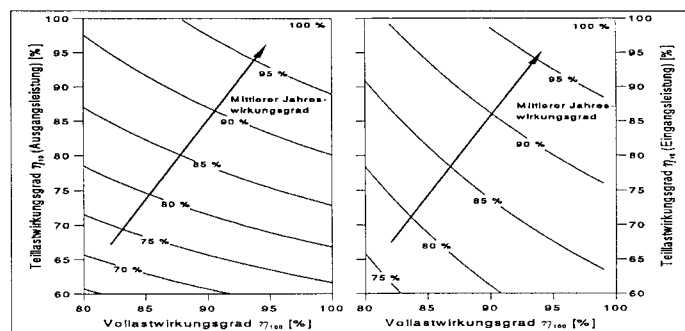


Abb. 11: Mittlerer Jahreswirkungsgrad eines Netz-Wechselrichters unter den angenommenen Bedingungen für Mitteleuropa mit Nachtabschaltung in Abhängigkeit des Wirkungsgrades bei 10 % bzw. 100 % der Nennausgangsleistung (links) und der Nenneingangsleistung (rechts) ohne Berücksichtigung von Standby-Verlusten

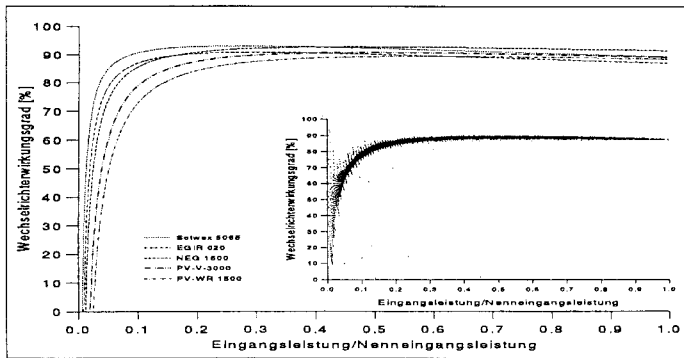


Abb. 12: Beispielhafte Darstellung von Kennlinien, deren Parameter mit dem vorgestellten Verfahren aus den Meßdaten des 1.000-Dächer IMAP gewonnen wurden. Die kleine Grafik zeigt Meßwerte eines Jahres für einen speziellen Wechselrichter

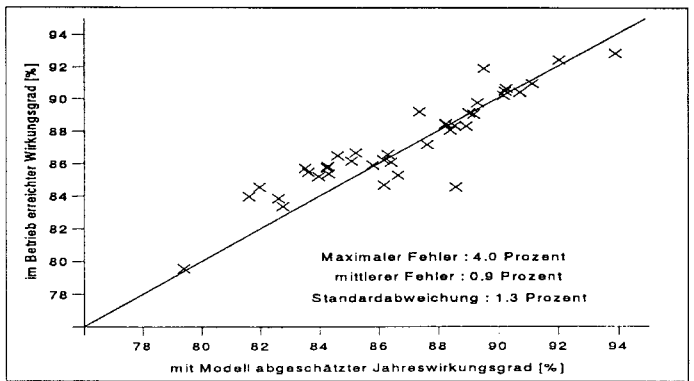


Abb. 13: Vergleich zwischen der Abschätzung des Jahreswirkungsgrades aus den Wirkungsgraden bei 10 % und 100 % und dem im Rahmen des 1.000-Dächer IMAP gemessenen Wertes.

gradkurve abzulesen. Abb. 10 zeigt ein hierzu geeignetes Verfahren.

Die beiden Geraden werden vom Koordinatenursprung bis zu den Punkten 10 %/100 % (ohne Nachtabschaltung) bzw. 20 %/100 % (mit Nachtabschaltung) gezogen.

Wie kommt diese Darstellung zustande? Für eine Schar von typischen Wirkungsgradverläufen wurde gemäß Gleichung (23) und (24) der zu jeder Kurve gehörende Jahreswirkungsgrad berechnet und dieser auf der jeweiligen Kurve markiert. Es zeigte sich, daß diese Punkte sehr gut durch die in Abb. 10 gezeigten Geraden verbunden werden können, so daß umgekehrt der mittlere Jahreswirkungsgrad aus dem Schnittpunkt dieser Geraden mit einer gegebenen Wirkungsgradkurve (als Funktion der Ausgangsleistung) abgelesen werden kann. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, daß für PV-Wechselrichter das Verhalten im untersten Teillastbereich ausschlaggebend ist, das wiederum ganz wesentlich vom Eigenverbrauch p_{self} bestimmt wird.

Liegt der Wirkungsgrad nicht in Form einer Kurve sondern in Tabellenform vor, so kann ein zuverlässiger Anhaltswert für den zu erwartenden mittleren Jahreswirkungsgrad aus Abb. 11 entnommen werden, die eine graphische Darstellung der zusammengefaßten Gleichungen (23) und (12), (13) bzw. (14), (15) bilden. Hier sind nur die Zusammenhänge für Wechselrichter mit Nachtabschaltung dargestellt.

5 Vergleich mit Ergebnissen aus dem 1.000-Dächer-Programm

Im folgenden werden typische Ergebnisse aus dem 1.000-Dächer Intensiv Meß- und Auswerteprogramm (IMAP) bzgl. der Wechselrichter dargestellt (vgl. z.B. /6/), die mit dem vorgestellten Modell gewonnen wurden bzw. verglichen werden.

Abb. 12 zeigt den Wirkungsgradverlauf von fünf Wechselrichtern, die in Anlagen des 1.000-Dächer-Programmes eingesetzt werden. Von al-

len zur Beurteilung des Systemverhaltens notwendigen Daten liegen 5 Minuten-Mittelwerte (tagsüber) vor. Aus diesen wurde der jeweilige Wirkungsgrad berechnet und in Abhängigkeit der Eingangsleistung aufgetragen. Die kleine Grafik in Abb. 12 zeigt für einen Wechselrichter etwa 45.000 Datenpunkte, die im Laufe eines Jahres gemessen worden sind. Um aus dieser großen Zahl von Werten die Stützstellen für das vorgestellte Modell zu berechnen, wurden drei geeignete Wechselrichterleistungen ausgewählt und in einem schmalen Intervall von 10 Watt um diesen Wert die Mittelwerte der gemessenen Wirkungsgrade gebildet. Mit diesen drei Stützstellen wurden die Parameter p_{self}^* , v_{loss}^* , r_{loss}^* bestimmt und die Kennlinien mit Hilfe von Gleichung (4) berechnet.

Im Anhang B finden sich in zwei Tabellen für zwölf verschiedene Wechselrichtertypen aus den Betriebsdaten extrahierte Parameter für den Modellansatz mit zwei (Tab. 2) und drei Parametern (Tab. 1). Zusätzlich sind in der jeweils zweiten Spalte die berechneten Wirkungsgrade (nicht die Datenblattangaben) bei Nennleistung angegeben. Beide Tabellen geben die Parameter für das Modell als Funktion der Ausgangs- und Eingangsleistung an.

In Kapitel 4 wurde ein Verfahren vorgestellt, daß eine einfache und schnelle Abschätzung des Jahreswirkungsgrades erlaubt. Dies ist möglich, wenn entweder die beiden Parameter p_{self} und r_{loss} oder die Wirkungsgrade bei 10 % und 100 % bekannt sind. Im ersteren Fall können die Gleichungen (21) oder (22) und im letzteren Fall die Grafiken in Abb. 11 werden.

Für Wechselrichter aus 40 Anlagen des 1.000-Dächerprogramms wurde der Jahreswirkungsgrad aus den Messdaten berechnet. Zum Vergleich wurden nach dem oben bereits genannten Verfahren die Parameter für das Modell bestimmt und damit nach Gleichung 23 der Jahreswirkungs-

grad errechnet. Abb. 13 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs. Auf der einen Achse ist der mit dem Modell berechnete und auf der andere der im Betrieb erreichte Jahreswirkungsgrad aufgetragen. Während die Kreuze die Ergebnisse für die einzelnen Anlagen kennzeichnen, zeigt die Gerade den Idealfall der absoluten Übereinstimmung zwischen Messung und Modell.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und experimentellem Betrieb, was sich in dem mittleren Fehler von weniger als 1 % (absolut) und einer Standardabweichung von 1,3 % (absolut) ausdrückt bei einer Streuung des Jahreswirkungsgrades zwischen etwa 79 % und 94 %.

Das vorgestellte Modellverfahren erweist sich somit als geeignet, um eine einfache Abschätzung des zu erwartenden Jahreswirkungsgrades aus den Datenblättern zu gewinnen. Dies um so mehr, als zu bedenken ist, daß die 40 Anlagen in ganz Deutschland verteilt sind, somit also unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt sind, die Anpassungsverhältnisse zwischen Nennleistung des PV-Generators und des Wechselrichters zwischen 0,7 und 1,5 liegen und etwa 15 verschiedene Wechselrichtertypen zum Einsatz gekommen sind.

6 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten mathematischen Modell und den Algorithmen zur Parameterbestimmung liegt ein einfaches Modell für den Wechselrichterwirkungsgrad vor, das in der Simulation eingesetzt werden kann, das über die Parameter einen leichten Vergleich verschiedener Wechselrichter erlaubt und das durch die angegebenen Zusammenhänge auch eine einfache Abschätzung des Jahreswirkungsgrades ermöglicht.

Dieses Forschungsvorhaben wurde gefördert vom BMBF im Rahmen des Projektes „Photovoltaik in Gebäuden“.

Literatur

/1/ Concerted Actions on PV Systems Technology & Coordination of PV Systems Development: TASK 6. Modelling and Simulation, CEC-JOULE II, Project No. J0U2-CT92-0120, Second Semi Annual Report 1993

/2/ Laukamp, H.: Wechselrichter in Photovoltaik-Anlagen, Viertes Nationales Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1989

/3/ Schmid, J., Schmidt, H.: Inverters for Photovoltaic Systems, 5th Contractors's Meeting, Commission of the European Communities, DG XVII, ISPRA, Italy 1991

/4/ Schmidt, H., Jantsch, M.: Einfluß des Eigenverbrauches von Wechselrichtern, Überwachungsgeräten und Anzeigeeinheiten auf die Energiebilanz einer Photovoltaikanlage, aus „Grundlagen und Systemtechnik solarer Energiesysteme“, Regensburger Solartage 1992

/5/ Jantsch, M., Schmidt, H., Schmid, J.: Einfluß von Qualität und Auslegung der Systemkomponenten auf die Energiebilanz von Photovoltaik-Anlagen, 8. Nationales Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1993

/6/ Kiefer, K., Körkel, T.: Aktuelle Ergebnisse aus dem 1.000-Dächer-Meß- und Auswerteprogramm (MAP), Zehntes Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1995, S. 63-68

A-Allgemeine Formeln für den Ansatz mit drei Parametern

Im Kapitel 2 wurden die Formeln für die Bestimmung der Parameter p_{self} , v_{loss} und r_{loss} bzw. p_{self}^* , v_{loss}^* und r_{loss}^* für den Fall angegeben, daß die Wirkungsgrade bei 10 %, 50 % und 100 % der Nennleistung gegeben sind.

Insbesondere bei der Datenauswertung kann es aber notwendig sein, die Modellparameter an beliebigen Stützstellen zu berechnen. Dieser Fall tritt z.B. ein, wenn ein Wechselrichter überdimensioniert ist und 100 % der Nennleistung dadurch nie erreicht werden.

Die folgenden Gleichungen (25) - (27) geben die Zusammenhänge für den Fall an, daß die Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung vorliegen. Dabei ist darauf zu achten, daß die kleinste Stützstelle bei möglichst kleiner und die größte bei möglichst hoher Leistung liegt. Die mittlere Stützstelle sollte entweder zwischen diesen oder in dem Bereich der meisten Meßpunkte liegen, um dort eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen. In den Formeln bezeichnet p_i die normierte Wechselrichterausgangsleistung und η_i den zugehörigen Wirkungsgrad.

Liegen die Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Eingangsleistung vor (z.B. bei Netzwechselrichtern), können die Gleichungen (28) - (30)

$$p_{self} = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot (p_1 - p_2) + \eta_1 \cdot \eta_3 \cdot (p_3 - p_1) + \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot (p_2 - p_3))}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot (p_1 - p_2) \cdot (p_1 - p_3) \cdot (p_2 - p_3)} \quad (25)$$

$$v_{loss} = \frac{[\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot (p_1 - p_2) \cdot (\eta_3 \cdot (p_2 - p_3) \cdot (p_1 - p_3) + p_3 \cdot (p_1 + p_2)) + \eta_1 \cdot \eta_3 \cdot p_2 \cdot (p_3^2 - p_1^2) + \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot p_1 \cdot (p_2^2 - p_3^2)]}{[\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot (p_1 - p_2) \cdot (p_1 - p_3) \cdot (p_3 - p_2)]} \quad (26)$$

$$r_{loss} = \frac{\eta_1 \cdot (\eta_2 \cdot p_3 \cdot (p_1 - p_2) + \eta_3 \cdot p_2 \cdot (p_3 - p_1)) + \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot p_1 \cdot (p_2 - p_3)}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot (p_1^2 - p_1 \cdot (p_2 + p_3) + p_2 \cdot p_3) \cdot (p_2 - p_3)} \quad (27)$$

$$p_{self}^* = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot ((\eta_1^*)^2 \cdot p_1 \cdot (\eta_2^* \cdot \eta_3^*) + \eta_1^* \cdot ((\eta_3^*)^2 \cdot p_3 - (\eta_2^*)^2 \cdot p_2) + \eta_2^* \cdot \eta_3^* \cdot (\eta_2^* \cdot p_2 - \eta_3^* \cdot p_3))}{((\eta_1^*)^2 \cdot p_1^2 - \eta_1^* \cdot p_1 \cdot (\eta_2^* \cdot p_2 + \eta_3^* \cdot p_3) + \eta_2^* \cdot \eta_3^* \cdot p_2 \cdot p_3) \cdot (\eta_2^* \cdot p_2 - \eta_3^* \cdot p_3)} \quad (28)$$

$$v_{loss}^* = \frac{[(\eta_1^*)^2 \cdot p_1^2 \cdot (\eta_2^* \cdot p_2 - \eta_3^* \cdot p_3 - p_2 + p_3) + \eta_1^* \cdot p_1 \cdot ((\eta_3^*)^2 \cdot p_3^2 - (\eta_2^*)^2 \cdot p_2^2) + (\eta_2^*)^2 \cdot p_2^2 \cdot (\eta_3^* \cdot p_3 + p_1 - p_3) - \eta_2^* \cdot (\eta_3^*)^2 \cdot p_2 \cdot p_3^2 + (\eta_3^*)^2 \cdot p_3^2 \cdot (p_2 - p_1)]}{[(\eta_1^* \cdot p_1 - \eta_2^* \cdot p_2) \cdot (\eta_1^* \cdot p_1 - \eta_3^* \cdot p_3) \cdot (\eta_3^* \cdot p_3 - \eta_2^* \cdot p_2)]} \quad (29)$$

$$r_{loss}^* = \frac{\eta_1^* \cdot p_1 \cdot (p_2 - p_3) + \eta_2^* \cdot p_2 \cdot (p_3 - p_1) + \eta_3^* \cdot p_3 \cdot (p_1 - p_2)}{((\eta_1^*)^2 \cdot p_1^2 - \eta_1^* \cdot p_1 \cdot (\eta_2^* \cdot p_2 + \eta_3^* \cdot p_3) + \eta_2^* \cdot \eta_3^* \cdot p_2 \cdot p_3) \cdot (\eta_3^* \cdot p_3 - \eta_2^* \cdot p_2)} \quad (30)$$

Abb. 15: Formeln (25) bis (30)

verwendet werden. Für die Auswahl der drei Stützstellen gelten ebenfalls die oben erwähnten Kriterien.

B-Parameterübersicht der Wechselrichter

Die folgenden Tabellen 1 und 2 geben für eine Reihe von Wechselrichtern, die im 1.000 Dächerprogramm vermessen wurden, die Parametersätze für das vorgestellte Modell an. Dabei sind in Tab. 1 die Werte für den Ansatz mit drei und in Tab. 2 für den Ansatz mit zwei Parametern jeweils für die Versionen in Abhängigkeit von der Ein- und der Ausgangsleistung angegeben. Tab. 2 zeigt in der letzten

Spalte zusätzlich den aus den Meßdaten des 1.000 Dächerprogramms berechneten Jahreswirkungsgrad der Anlage, deren Parameter in der Tabelle angegeben sind.

Wurden mehrere Wechselrichter desselben Typs vermessen, sind die Parameter für ein Gerät wiedergegeben, dessen bilanzierter Jahreswirkungsgrad etwa dem Mittelwert der Anlagen mit gleichen Geräten entspricht. Es ist jedoch immer zu berücksichtigen, daß sich die Parameter auf ein bestimmtes Gerät beziehen. Inwieweit dieses repräsentativ für die gesamte Baureihe sind, kann hier nicht erörtert werden.

Parameter aus den Daten des 1000-Dächer-IMAP							
Typ	η_{nom} [%]	p_{self}^*	v_{loss}^*	r_{loss}^*	p_{self}	v_{loss}	r_{loss}
NEG 1400	89.8	0.015505	0.010553	0.095879	0.017271	0.010553	0.086075
SMA PV-WR 1800	88.9	0.016575	0.045513	0.067941	0.018639	0.045513	0.060420
Solwex 5065	89.0	0.006352	0.025185	0.102423	0.007136	0.025185	0.091165
Solwex 1565	88.7	0.012010	0.066289	0.053626	0.013540	0.066289	0.047566
EGIR 020	86.7	0.009172	0.035937	0.123502	0.010581	0.035937	0.107059
NEG 1600	89.3	0.012156	0.018594	0.097853	0.013609	0.018594	0.087399
Solwex 1865	88.1	0.009384	0.032901	0.103725	0.010650	0.032901	0.091392
NEG 1500	91.2	0.012071	0.024711	0.063668	0.013230	0.024711	0.058089
Solwex 1065	90.9	0.014188	0.055145	0.032713	0.015614	0.055145	0.029726
PV-V-3000	88.8	0.019280	0.018103	0.097238	0.021712	0.018103	0.086345
SMA PV-WR 5000	89.3	0.014171	0.027937	0.085456	0.015873	0.027937	0.076293
SMA PV-WR 1500	88.1	0.024915	0.026552	0.090408	0.028266	0.026552	0.079689

Tab. 1: Parameter für den Modellansatz mit drei Parametern

Parameter aus den Daten des 1000-Dächer-IMAP						
Typ	η_{nom} [%]	p_{self}^*	r_{loss}^*	p_{self}	r_{loss}	$\bar{\eta}$ [%]
NEG 1400	89.8	0.016335	0.106828	0.018199	0.095888	88.3
SMA PV-WR 1800	88.9	0.019934	0.115168	0.022422	0.102389	85.3
Solwex 5065	89.0	0.008431	0.128246	0.009473	0.114137	90.9
Solwex 1565	88.7	0.017028	0.122251	0.019201	0.108415	87.1
EGIR 020	86.7	0.012025	0.161435	0.013873	0.139926	88.4
NEG 1600	89.3	0.013629	0.117035	0.015261	0.104516	89.7
Solwex 1865	88.1	0.012006	0.137914	0.013628	0.121497	89.0
NEG 1500	91.2	0.014021	0.088570	0.015369	0.080799	90.6
Solwex 1065	90.9	0.018329	0.088590	0.020174	0.080488	88.1
PV-V-3000	88.8	0.020633	0.116214	0.023241	0.103172	86.6
SMA PV-WR 5000	89.3	0.016320	0.114293	0.018283	0.102019	88.5
SMA PV-WR 1500	88.1	0.026767	0.118542	0.030376	0.104458	85.7

Tab. 2: Parameter für den Modellansatz mit zwei Parametern und im Betrieb erzielter Jahreswirkungsgrad (letzte Spalte)