

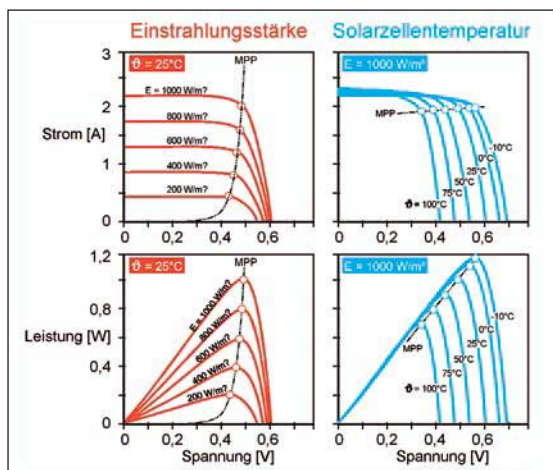
# Auslegung einer netzgekoppelten PV-Anlage (2)

Joachim Laschinski

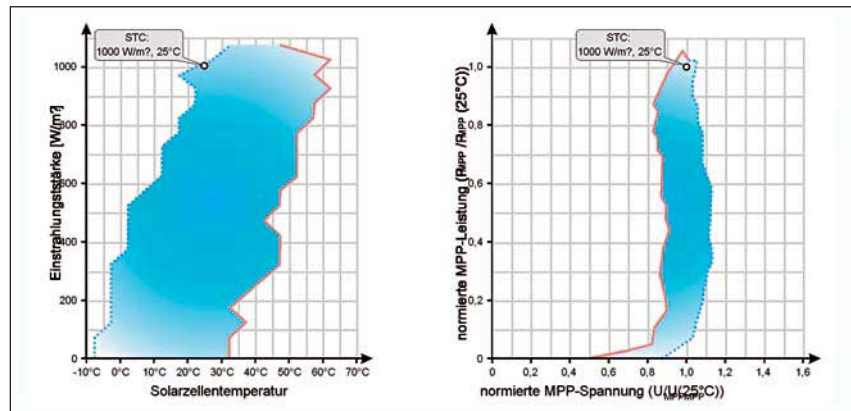
Nach der Auslegung der Wechselrichterleistung stellt die Festlegung der Ausgangsspannung der PV-Module den wichtigsten Aspekt dar. Der nachgeschaltete Wechselrichter muss den Spannungsbereich der Module abdecken. Dieser hängt von einigen Faktoren ab.

Neben der Leistung, welche abhängt von der Gesamtzahl der PV-Module muss die Spannung des PV-Generators (= Gesamtheit der PV-Module), welche abhängt von der Anzahl der PV-Module pro String, zum Eingangsspannungsbereich des Wechselrichters passen. Schließlich soll der PV-Generator möglichst immer im Arbeitspunkt maximaler Leistung (MPP) arbeiten, sich aber jederzeit abschalten lassen. Das Datenblatt des verwendeten PV-Moduls enthält mindestens die I(U)-Kennlinie für den Nennbetrieb und gibt Auskunft über die Spannung im MPP und im Leerlauf. Bei (poly-)kristallinen Zellen stehen diese beiden Spannungen etwa im Verhältnis von 8 : 10. Im realen Betrieb variiert die Spannung von Solarzellen leicht mit der Einstrahlungsstärke und sehr stark mit ihrer Temperatur (Bild 3).

Dipl.-Ing. Joachim Laschinski, SMA, Niestetal  
Fortsetzung aus »de« 24/2002, S. 63ff



**Bild 3:** Kennlinien einer Solarzelle bei unterschiedlichen Einstrahlungsstärken und Temperaturen



**Bild 4:** Statistische Verteilung der Arbeitspunkte maximaler Leistung eines PV-Generators als Darstellung der physikalischen Betriebsbedingungen (Einstrahlungsstärke über der Zelltemperatur) und wie sie sich an den Generatorklemmen elektrisch widerspiegeln als Darstellung der MPP-Leistung über der MPP-Spannung

## Spannung abhängig von Einstrahlung und Temperatur

Es gibt genau einen Arbeitspunkt, der die aktuelle Generatorleistung bestmöglich nutzt, der MPP. Die Leistung in diesem Arbeitspunkt sowie seine Position auf der Kennlinie, die MPP-Spannung, hängt nicht nur von der Einstrahlung ab, viele andere Umgebungsbedingungen beeinflussen die Solarzellen zusätzlich. Die Arbeitspunkte liegen daher nicht auf einer einheitlichen Kennlinie, sondern auf einer Kennlinienschar und bilden, über ein Betriebsjahr betrachtet, im I(U)-Diagramm eine ganze Fläche aus (Bilder 4, 5).

Um daraus den Eingangsspannungsbereich eines Wechselrichters zu ermitteln, muss diese MPP-Statistik noch durch den Betriebszustand »Leerlauf« ergänzt werden. In Bild ist dies für die jeweils höchsten MPP-Spannungen eingearbeitet worden.

Als Grenzwerte für die Spannungsauslegung werden üblicherweise verwendet:

- $U_{MPP}(70^\circ\text{C})$ , die MPP-Spannung bei 1000 W/m<sup>2</sup> und einer Zelltemperatur von +70 °C und
- $U_0(-10^\circ\text{C})$ , die Leerlaufspannung bei 1000 W/m<sup>2</sup> und einer Zelltemperatur von -10 °C.

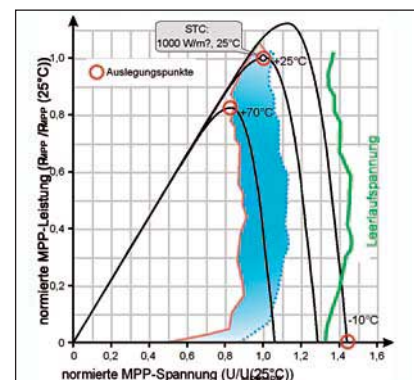
Die Arbeitspunktverteilung in den I(U)-Kennlinien bei den Nenn- und Grenzbedingungen zeigt,

dass die oben definierten Grenzbedingungen für mitteleuropäische Klima- und Einstrahlungsverhältnisse eine gute Auslegungsgrundlage darstellen (Bild 5).

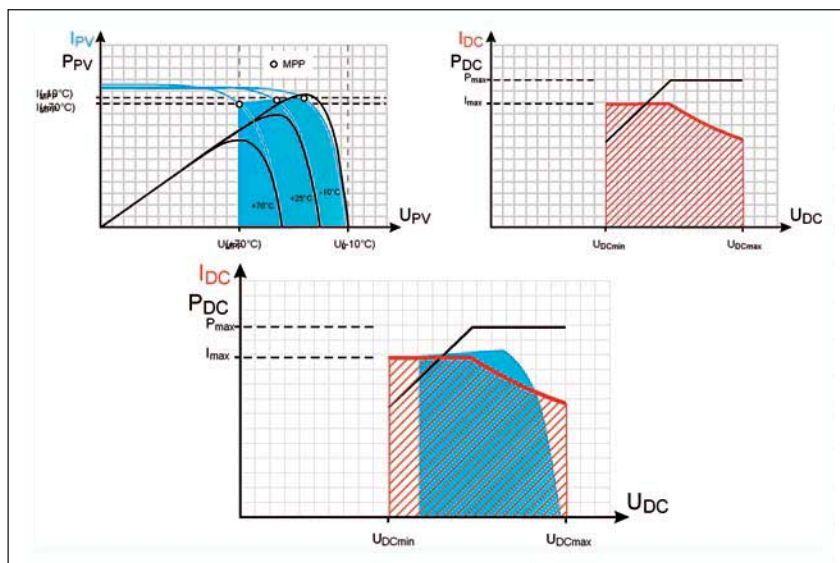
Im gewählten Beispiel steht die kleinste MPP-Spannung zur höchsten auftretenden Leerlaufspannung im Verhältnis 0,8 : 1,5 bzw. 55 : 100  $\approx$  1 : 2. Ein Wechselrichter muss also mindestens einen Eingangsspannungsbereich von 1 : 2 aufweisen, damit alle Arbeitspunkte eines PV-Generators eingestellt werden können (Bild 6).

## Leistungsüberschreitung ja, Spannungsüberschreitung nein

Der Wechselrichter deckt den Spannungsbereich des PV-Generators komplett ab. Lediglich die Leistung des PV-Generators übersteigt die maximale Eingangsleistung des Wechselrichters (»de« 24/2002, S.63f). Die niedrigste Arbeitsspannung eines PV-Generators stellt sich



**Bild 5:** Statistische Verteilung aller Arbeitspunkte eines PV-Generators



**Bild 6:** Vergleich der Arbeitsbereiche von PV-Generator und Wechselrichter

bei der höchsten Temperatur der Solarzellen ein. Entscheidend ist hier die Temperatur der im Modul eingebetteten Zellen, die in der Regel deutlich über der Umgebungstemperatur liegt und auch davon abhängt, wie effektiv die Wärmeabfuhr erfolgen kann. So kann z. B. ein Indach-Modul, das ein Bestandteil der

Dachhaut ist, die absorbierte und in Wärme umgewandelte Sonnenenergie wesentlich schlechter an die Umgebung abgeben, als ein frei hinterlüftetes oder aufgeständertes Modul und wird daher wesentlich wärmer (Tabelle 1).

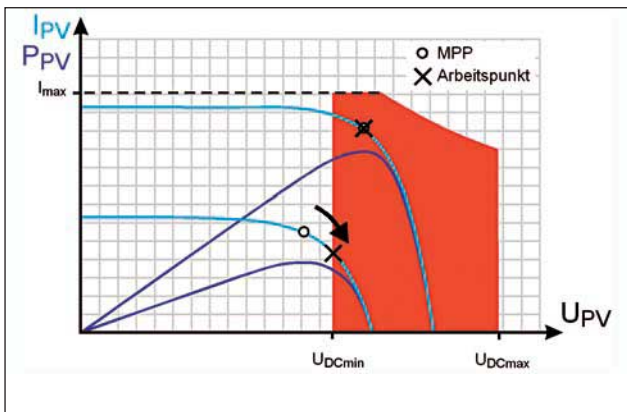
Verlässt der MPP eines PV-Generators, z. B. wegen zu hoher Zelltempe-

ratur, den Eingangsspannungsbereich des Wechselrichters, dann würde die Anlage nicht im MPP, sondern nur bei der kleinsten Eingangsspannung des Wechselrichters arbeiten (Bild 7). Diese Betriebsituation bildet kein Problem für den Wechselrichter, führt aber zu einem Minderertrag des PV-Generators. Die Größe des Minderertrages hängt vom verwendeten Modul, den Einbauverhältnissen, z. B. Zelltemperatur, sowie anderen Faktoren ab und muss im Einzelfall abgeschätzt werden.

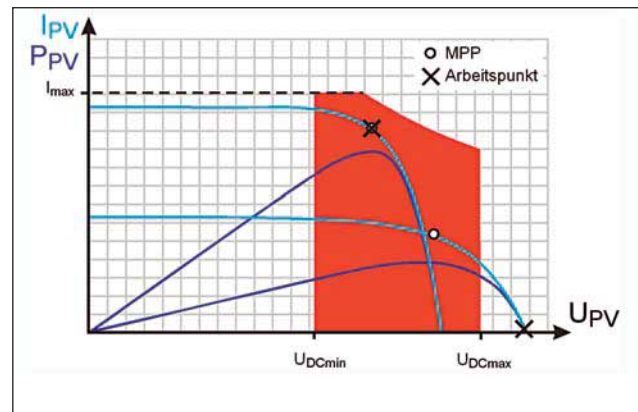
### Ertragssteigerung durch Hinterlüftung der Module

Bei Einhaltung der oben erwähnten Auslegungsregel, d. h., wenn sich die MPP-Spannung bei  $1000 \text{ W/m}^2$  und einer Zelltemperatur von  $+70 \text{ °C}$  im erlaubten Eingangsspannungsbereich des Wechselrichters befindet, lässt sich der eventuelle Ertragsverlust vernachlässigen, wenn eine gute Hinterlüftung der PV-Module sichergestellt ist.

Thermisch ungünstigere Betriebsbedingungen der Module sollten bei der Auslegung durch eine entsprechend hö-



**Bild 7: Die MPP-Spannung des PV-Generators ist niedriger als die kleinste mögliche Eingangsspannung des Wechselrichters**



**Bild 8: Die Leerlaufspannung des PV-Generators ist höher als die höchste erlaubte Eingangsspannung des Wechselrichters**

here Zelltemperatur berücksichtigt werden.

Die minimale Eingangsspannung des Wechselrichters kann also über die Effektivität der PV-Anlage mitentscheiden. Bei den Wechselrichtern der Sunny Boy Familie von SMA, Niestetal, wurde deshalb alles versucht, diese Betriebsgrenze so niedrig wie möglich festzusetzen.

### Die höchste Arbeitsspannung

So wie die niedrigste Arbeitsspannung mit der höchsten Zelltemperatur verknüpft ist, so tritt die höchste Arbeitsspannung zusammen mit der niedrigsten Zelltemperatur auf. Hier ist allerdings nicht nur die MPP-Spannung zu betrachten, sondern die etwas höhere Leerlaufspannung des PV-Generators (Bild 5).

Wenn die Leerlaufspannung des PV-Generators die höchste erlaubte Eingangsspannung des Wechselrichters übersteigt, geht der Wechselrichter nicht in Betrieb, da sonst seine Leistungshalbleiter überlastet würden (Bild 8). Doch selbst eine lediglich am nicht einspeisenden Wechselrichter anliegende Über-

spannung kann dessen Bauelemente schädigen und sogar zu einer irreparablen Beschädigung des Gerätes führen. Diese Situation darf also unter keinen Umständen auftreten.

Überspannungen gefährden den Eingangskondensator im Eingangsteil des Wechselrichters, da die Leistungshalbleiter bei einer Überspannung durch die Betriebsführung des Wechselrichters nicht schalten. Die maximale Eingangsspannung entspricht in der Regel auch der Nennspannung dieser Bauteile. Eine Beaufschlagung des Elektrolytkondensators mit einer höheren als seiner Nennspannung zerstört im Regelfall dieses Bauteil.

### MPP-Spannung und Wirkungsgrad

Bei Vorgabe einer bestimmten PV-Modul-Wechselrichter-Kombination bleiben nur noch wenige Varianten übrig, die die bisher beschriebenen Regeln für die Leistungs- und Spannungsanpassung von PV-Generator und Wechselrichter einhalten. Ein zusätzliches Unterschei-

dungsmerkmal und damit auch Auswahlkriterium stellt die Entfernung vom optimalen Arbeitspunkt des Wechselrichters dar.

Die Höhe der Eingangsspannung hat bei den Sunny Boys wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Der Grund hierfür liegt in der notwendigen Spannungsanpassung zwischen Eingang und Ausgang des Wechselrichters. Das grundsätzliche Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangsspannung wird durch das Übersetzungsverhältnis des Transformators bestimmt (Bild 9).

Im Zeitdiagramm über eine Netzhalbperiode ist zu erkennen, dass die Schalter der Wechselrichterbrücke im Bereich des Netzspannungsmaximums nur mit geringen zeitlichen Unterbrechungen geschlossen sind. Kennzeichnend wird dies durch die Markierung dieser Zeiten mit einem farbigen Rechteck. Die Energie des PV-Generators gelangt hier sehr verlustarm ins Netz. Im Bereich zwischen den Rechtecken muss die Energie in den Drosseln dagegen verlustreich zwischengespeichert werden. Je geringer diese Zwischenräume sind, desto höher ist der Wirkungsgrad des Wechselrichters.

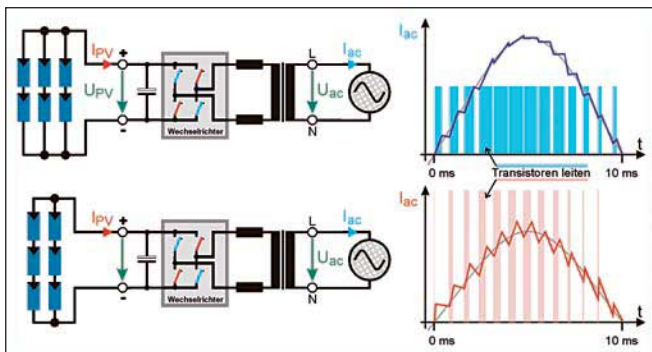
## Modultemperaturen

Montageart	Zelltemperatur gegen Umgebung	Energieertrag gegen freier Aufstellung
völlig freie Aufstellung	+22 °C	0,0 %
auf Dach großer Abstand	+28 °C	-1,8 %
auf/im Dach, gute Hinterlüftung	+29 °C	-2,1 %
auf/im Dach, schlechte Hinterlüftung	+32 °C	-2,6 %
auf/in Fassade, gute Hinterlüftung	+35 °C	-3,6 %
auf/in Fassade, schlechte Hinterlüftung	+39 °C	-4,8 %
Dachintegration, ohne Hinterlüftung	+43 °C	-5,4 %
Fassadenintegration, ohne Hinterlüftung	+55 °C	-8,9 %

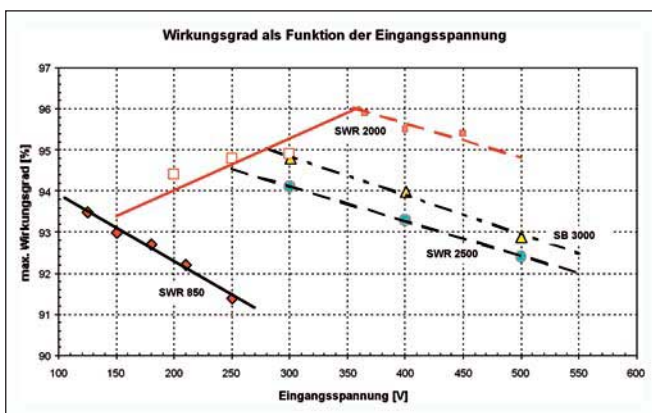
**Tabelle 1: Erwärmung der Solarzelle gegenüber der Umgebung bei unterschiedlichen Montagearten**

### Spannungsregelung durch Pulsweitenmodulation

Bei einer höheren als der minimalen Eingangsspannung (Bild 9 unten) bleiben die Schalter der Wechselrichterbrücke nur jeweils für kurze Zeiten geschlossen. Die roten Rechtecke erscheinen deshalb wesentlich schmäler als die blauen Rechtecke im oberen Diagramm. Dies deutet darauf hin, dass der Wechselrichterbetrieb bei (zu) hohen Eingangsspannungen mit hohen Verlusten verbunden ist.



**Bild 9: Betrieb eines Wechselrichters mit niedriger und hoher Eingangsspannung; die Situation beim Anlegen der minimalen Eingangsspannung zeigt der obere Teil der Abbildung**



**Bild 10: Der maximale Wirkungsgrad als Funktion der Eingangsspannung für Sunny Boys mit Netztransformator (SWR 850, SWR 2500 und SB 3000) und einem transformatorlosen Sunny Boy (SWR 2000).**

Die hergeleitete Spannungsabhängigkeit des Wechselrichter-Wirkungsgrads ist nicht nur auf Sunny Boys mit Transformator beschränkt, sondern ist auch auf transformatorlose Wechselrichter anwendbar. Allerdings gilt dies nur für Eingangsspannungen, die – je nach der Wechselrichter-Topologie – die Amplitude bzw. doppelte Amplitude der Netzspannung überschreiten. Kleinere Eingangsspannungen müssen erst bis zur Netzspannungsamplitude hochgesetzt werden und verursachen dadurch Verluste, die mit der Differenz zwischen diesen beiden Spannungen steigt. Der Wirkungsgrad eines transformatorlosen Wechselrichters steigt deshalb mit der Eingangsspannung bis zur einfachen bzw. doppelten Netzspannungsamplitude und sinkt dann wieder (Bild 10). Um einen Sunny Boy möglichst verlustarm zu betreiben, gelten demnach die folgenden Regeln:

- Sunny Boys mit Transformator sollten eine möglichst geringe Eingangsspannung haben.
- Sunny Boys ohne Transformator sollten eine Eingangsspannung haben, die der internen Zwischenkreisspannung entspricht,
- der Netzspannungsamplitude (ca. 325 V bei 230 Veff) beim SWR 2000 und SB 2100TL, bzw.
- der doppelten Netzspannungsamplitude (ca. 650 V bei 230 Veff) beim SB 5000TL MS.

(wird fortgesetzt)