

Bo Hanus

Photovoltaikanlagen optimieren

30% mehr Gewinn



Leicht gemacht, Geld und Ärger gespart!

- ▶ So steigern Sie den Ertrag Ihrer Photovoltaikanlage
- ▶ Fehler finden und beheben
- ▶ Arbeitet Ihre Photovoltaikanlage optimal?

Bo Hanus
Photovoltaikanlagen optimieren

Bo Hanus

Photovoltaikanlagen optimieren

30% mehr Gewinn

Leicht gemacht, Geld und Ärger gespart!

Mit 88 farbigen Abbildungen

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Hinweis

Alle Angaben in diesem Buch wurden vom Autor mit größter Sorgfalt erarbeitet bzw. zusammengestellt und unter Einschaltung wirksamer Kontrollmaßnahmen reproduziert. Trotzdem sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Der Verlag und der Autor sehen sich deshalb gezwungen, darauf hinzuweisen, dass sie weder eine Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für Folgen, die auf fehlerhafte Angaben zurückgehen, übernehmen können. Für die Mitteilung etwaiger Fehler sind Verlag und Autor jederzeit dankbar.

Internetadressen oder Versionsnummern stellen den bei Redaktionsschluss verfügbaren Informationsstand dar. Verlag und Autor übernehmen keinerlei Verantwortung oder Haftung für Veränderungen, die sich aus nicht von ihnen zu vertretenden Umständen ergeben. Evtl. beigefügte oder zum Download angebotene Dateien und Informationen dienen ausschließlich der nicht gewerblichen Nutzung. Eine gewerbliche Nutzung ist nur mit Zustimmung des Lizenzinhabers möglich.

© 2008 Franzis Verlag GmbH, 85586 Poing

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Das Erstellen und Verbreiten von Kopien auf Papier, auf Datenträgern oder im Internet, insbesondere als PDF, ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verlags gestattet und wird widrigenfalls strafrechtlich verfolgt.

Die meisten Produktbezeichnungen von Hard- und Software sowie Firmennamen und Firmenlogos, die in diesem Werk genannt werden, sind in der Regel gleichzeitig auch eingetragene Warenzeichen und sollten als solche betrachtet werden. Der Verlag folgt bei den Produktbezeichnungen im Wesentlichen den Schreibweisen der Hersteller.

Satz: DTP-Satz A. Kugge, München

art & design: www.ideehoch2.de

Druck: L.E.G.O. S.p.A., Vicenza (Italia)

Printed in Italy

ISBN 978-3-7723-4407-7

Inhaltsverzeichnis

1	Arbeitet meine Photovoltaikanlage optimal?	9
2	Oft vorkommende Fehlfunktionen der Photovoltaikanlagen	13
3	Oft vorkommende Defekte an netzgekoppelten Photovoltaikanlagen	19
4	Bewertungsvergleiche	31
5	Steigerung des Ertrags einer Photovoltaikanlage	61
5.1	Ist Ihr Wechselrichter richtig an Ihre Solarmodule angepasst? _____	62
5.2	Verlängerung des Solarmodulstrangs _____	70
6	Wissenswertes über Solarzellen	75
6.1	Welche Solarzellen sind die besten? _____	79
6.2	Der Solarzellen-Wirkungsgrad _____	82
7	Wichtige technische Parameter der Solarmodule	87
7.1	Die Nennleistung eines Solarmoduls _____	90
7.2	Die Nennspannung eines Solarmoduls _____	96
7.3	Die Leerlaufspannung eines Solarmoduls _____	98
7.4	Der Nennstrom eines Solarmoduls _____	101
7.5	Der Kurzschlussstrom eines Solarmoduls _____	102
7.6	Bypass-Dioden in Solarmodulen _____	103

Inhaltsverzeichnis

8	Wechselrichter für netzgekoppelte Systeme	107
8.1	Wechselrichter mit einem gemeinsamen Eingang (Zentralwechselrichter)	110
8.2	String-Wechselrichter	111
8.3	Multi-String-Wechselrichter	112
8.4	Modulintegrierte Wechselrichter	113
8.5	Welcher Wechselrichter ist der beste?	115
8.6	Konzeptlösungen bei aufwendigeren Anlagen	116
9	Wechselrichter für netzunabhängige Anlagen	119
10	Verluste in den Solarstromleitungen	123
	Stichwortverzeichnis	127

1 Arbeitet meine Photovoltaikanlage optimal?

Diese Frage stellen sich die meisten der privaten Betreiber einer *netzgekoppelten* Photovoltaikanlage vor allem nach der Abrechnung des jährlichen Ertrags der ins öffentliche Netz eingespeisten Solarenergie. Es ist eine berechnete Frage, denn sehr viele der bereits betriebenen Photovoltaikanlagen arbeiten nicht optimal, sondern gewissermaßen nur auf „Sparflamme“: Die Wechselrichter schalten sie zu spät ein, zu früh aus oder eines der Solarmodule stellt ein zu

schwaches Glied des ganzen solarelektrischen Generators dar. Der Betreiber ist dann meist hilflos und kann seine Anlage nicht so einfach überprüfen lassen wie ein schlecht funktionierendes Fernsehgerät.

Eine gut funktionierende Photovoltaikanlage sollte natürlich die in sie investierten Kosten innerhalb einer angemessenen Zeitspanne zurückverdienen. Eine kürzere Zeitspanne trifft vor allem auf größere Anlagen zu, die z. B. teilweise in Eigenleistung errichtet wurden

1 Arbeitet meine Photovoltaikanlage optimal?

(oder werden) und deren Solarmodule auf Feldern, Flachdächern oder auf Dächern mit geringer Neigung aufgestellt wurden. Kostensenkend wirkt es sich dabei aus, wenn die Solarmodule z. B. auf einem Dach installiert werden, bei dem die Dachhaut strapazierfähig ist und keine erhöhten Ansprüche an eine aufwendige Installation stellt. So können z. B. die Gestelle der Solarmodule auf das Trapezblechdach einer Scheune entweder direkt mit den bestehenden Blechdachschrauben oder den gleichen Schraubentypen (mit wasserundurchlässigen Unterlegscheiben) montiert werden.

Wird eine Photovoltaikanlage ohne einen Eigenleistungsanteil vollständig von einem Unternehmen errichtet, verteuert sich verständlicherweise die Installation und es dauert entsprechend länger, bevor das investierte Geld durch die Einspeisung der Solarenergie ins öffentliche Netz zurückverdient wird.

Bei kleineren Photovoltaikanlagen an Wohnhäusern erhöht der Installationsaufwand stark die Errichtungskosten, was zur Folge hat, dass das investierte Geld erst nach einer längeren Zeit zurückverdient wird. Was darunter individuell zu verstehen ist, können Sie

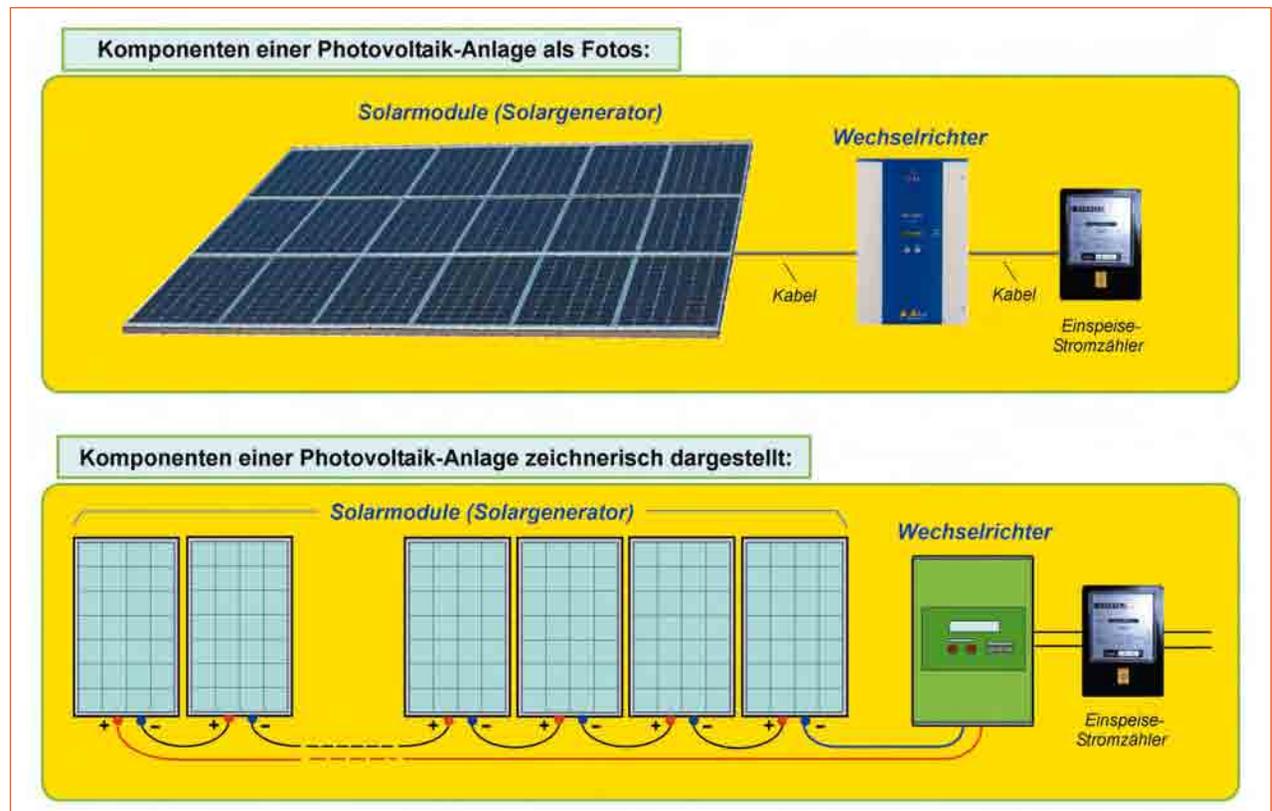


Abb. 1.1 – Eine netzgekoppelte Photovoltaikanlage besteht nur aus zwei Hauptkomponenten: den Solarmodulen, die einen *Solargenerator* bilden, und einem Wechselrichter.

1 Arbeitet meine Photovoltaikanlage optimal?

sich zumindest ungefähr anhand der ins öffentliche Netz eingespeisten Energieportionen ausrechnen. Jedes Jahr ist allerdings das Wetter anders. Abgesehen davon ist der Ertrag einer im Süden des Landes betriebenen Photovoltaikanlage generell wesentlich höher als bei einer im Norden betriebenen.

Eine optimale Konzeptlösung, bei der weder überbeteuerte noch schlechte Solarmodule und Wechselrichter verwendet werden, kann viel Geld sparen. Eigenleistung – oder ein Eigenleistungsanteil – dürfte dabei vor allem bei Häusern mit niedrigen Dächern und Dachneigungen unterhalb von ca. 35° in Erwägung gezogen werden, um Montagekosten zu sparen.

Die von den Herstellern und Erbauern angegebene „Leistungsgarantie“, die bei Solarmodulen ca. 20 bis 26 Jahre beträgt, ist meist unverbindlich. Eine gesetzlich verankerte Haftung gilt nur im Rahmen einer schriftlich definierten Garantiedauer. Defekte, die nach einer schriftlich festgelegten Garantiedauer auftreten, müssen auf Kosten des Anlagenbetreibers behoben werden.

Für den Wechselrichter geben die meisten Hersteller eine Garantie von 5 Jahren oder optional (gegen Aufpreis) eine „Leistungsgarantie“ von 10 Jahren. Muss der

Wechselrichter nach 10 Jahren ersetzt werden (und das kann schon in Hinsicht auf den technischen Fortschritt sinnvoll sein), erhöht es die Betriebskosten.

Entstehen interne Defekte an den Solarmodulen, müssen diese durch neue Module ersetzt werden. Falls für solche Defekte nicht eine Versicherung (Sturm und Hagel) oder der gewerbliche Errichter (während der Garantiedauer) aufkommt, verteuert der an sich kostspielige Modulersatz ebenfalls die Betriebskosten. Dadurch verlängert sich die Zeitspanne, in der die Anlage das in sie investierte Geld zurückverdienen kann.

Das Wetter stellt bei den Photovoltaikanlagen einen Faktor dar, der eine objektive Bewertung der Funktion erschwert. Außerdem handelt

es sich bei einer Photovoltaikanlage um ein Projekt, das oft aus Bausteinen unterschiedlicher Herkunft zusammenmontiert wurde.

In der Praxis sind die gewerblichen Errichter von Photovoltaikanlagen weitgehend auf sich gestellt und werden von den Lieferanten leider meist nur dürftig betreut. Zudem kennen sich die Hersteller und Lieferanten der Solarmodule mit der Materie der Wechselrichter nicht immer ausreichend aus und die Wechselrichterhersteller konzipieren wiederum ihre Produkte als Universalbausteine, die vielseitig angewendet werden können.

Erfahrungsgemäß ist es nicht schwer, eine Photovoltaikanlage so zu installieren, dass sie „generell“ funktioniert. Wenn aber der Wech-



Abb. 1.2 – Von den vielen hundert Solarzellen, die in den Modulen ihrer Photovoltaikanlagen eingebettet sind, kann eine einzige schwache oder kränkelnde Zelle die Gesamtleistung verringern.

1 Arbeitet meine Photovoltaikanlage optimal?

selrichter auf die an ihm angeschlossenen Solarmodule nicht optimal abgestimmt ist, ist es schwer, das im Nachhinein zu erkennen. Der Elektriker kann oft nicht viel mehr tun, als die Solarmodule an den Wechselrichter anzuschließen, ähnlich wie er z. B. die Deckenlampen eines Großraumbüros an die Sicherungsautomaten anschließt. Schaltet man danach alles ein und es funktioniert „ersichtlich“, gibt man sich damit meist zufrieden. So ist es kein Wunder, dass manche Photovoltaikanlage gebaut ist wie ein Porsche mit dem Motor eines VW-Käfers.

Vorteilhaft ist es natürlich, wenn der Installateur über eine technische Ausstattung verfügt, die ihm ein sorgfältiges Austesten der angelieferten und anschließend von ihm ausgelieferten und installierten Solarmodule ermöglicht.

Kommt es z. B. beim Transport zu einer unsichtbaren Beschädigung einer einzigen der mehreren hundert Solarzellen, die in den Modulen integriert sind, kann diese einzige schadhafte Solarzelle den Ertrag der ganzen Anlage auf Dauer drosseln und es ist schwer, diesen Defekt als solchen zu erkennen.

Handelt es sich dabei um ein nicht optisch erkennbar schadhaftes Solarmodul konnte und die Leistung der Solaranlage nicht bei optimalen Wetterbedingungen solide überprüft werden, fällt ein solcher kleiner Defekt gar nicht auf: Die Anlage arbeitet und der Solarstrom wird in das öffentliche Netz gespeist. Der Betreiber gibt sich meist damit zufrieden, dass er seinen Ertrag mit dem Ertrag seiner Nachbarn vergleicht. Stellt er keine alarmierenden Abweichungen fest, weist es theoretisch auf zwei Möglichkeiten hin: Entweder arbeitet

seine Photovoltaikanlage objektiv zufriedenstellend oder die Anlagen der Nachbarn arbeiten ebenfalls nicht optimal. Das muss aber nicht zwingend an einer fehlerhaften Projektentwicklung oder -durchführung liegen, denn manche Schwachstellen zeigen sich erst nach einiger Zeit.

Photovoltaikanlagen sind teure und aufwendige Investitionen, die sich möglichst schnell amortisieren sollen. Oft können einfache Maßnahmen den energetischen (und finanziellen) Ertrag erheblich steigern. Daher sehen wir uns folgend näher an, wie eine Photovoltaikanlage funktionieren sollte und was auch ein technisch wenig erfahrener Betreiber verändern (lassen) kann. Machen Sie sich nun schlau darüber, worauf es ankommt.

Nicht alle Photovoltaikanlagen arbeiten netzgekoppelt. Einige dieser Anlagen werden als *netzunabhängige* (autarke) Photovoltaikanlagen betrieben und nur für den eigenen Bedarf angewendet. Bei solchen Anlagen wird der Solarstrom nicht in das öffentliche Netz eingespeist, sondern zum Laden der Anlagenakkus verwendet. Der tatsächliche energetische Ertrag kann bei diesen Anlagen zwar verständlicherweise nicht vom Einspeisezähler abgelesen werden, lässt sich aber z. B. als Stromverbrauch mit einem Amperemeter ermitteln. Da die Mehrzahl der Leser Photovoltaikanlagen als netzgekoppelte Anlagen betreibt, widmen wir diesen Systemen erhöhte Aufmerksamkeit.

4 Bewertungsvergleiche

Für den Ertrag einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage sind bekanntlich vor allem drei wetterunabhängige Faktoren bestimmend:

- a) die Qualität (der tatsächliche Wirkungsgrad und die Toleranz) der Solarmodule
- b) die Qualität und Funktionsweise des Wechselrichters sowie seine elektrische Abstimmung auf die Solarmodule
- c) die Größe und die Nennleistung der aktiven Solarzellenfläche

4 Bewertungsvergleiche

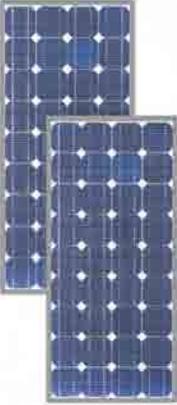
Diese drei Faktoren bestimmen allerdings nur den rein technischen Standard einer Photovoltaikanlage. Für den eigentlichen Ertrag sind zusätzlich noch die Wetter- und Temperaturbedingungen, die Kühlung und die optimale Ausrichtung der Solarmodule zur Sonne bestimmend.

Wenig bekannt, aber wichtig zu wissen: Solarzellen mögen keine Wärme. Da sich in der Praxis eine voll belastete Solarzelle stark aufwärmt, sinken dadurch ihre tatsächliche Spannung und Leistung. Auch bei einem guten Solarmodul sinkt die tatsächliche Ausgangsleistung in der Praxis bei voller Belastung an einem wärme-

ren sonnigen Tag um mehr als 1/3 gegenüber seinen theoretischen technischen Daten. Bei hoher Außentemperatur und Windstille kann der Leistungsrückgang sogar die Schwelle von 45 % überschreiten. Auch an einem kühlen, aber sonnigen Tag heizen sich die Solarzellen intern auf eine Betriebstemperatur auf, die immerhin einen Rückgang der Ausgangsleistung um ca. 15 bis 25 % zur Folge hat.

Die in den Herstellerprospekten angegebenen technischen Daten der Solarmodule wie Nennleistung (Leistung bei max. Leistung) und Nennspannung (Spannung bei max. Leistung) beziehen sich nur auf

Einfluss der Zellen-Erwärmung auf den Leistungs- und Spannungsrückgang von Solarmodulen



Zellentemperatur:	Leistungsrückgang: *	Spannungsrückgang: *
25 °C	0 %	0 %
40 °C	ca. 13,7 %	ca. 4,9 %
45 °C	ca. 18,3 %	ca. 6,6 %
50 °C	ca. 22,9 %	ca. 8,25 %
55 °C	ca. 27,3 %	ca. 9,9 %
60 °C	ca. 32,0 %	ca. 11,6 %
65 °C	ca. 36,4 %	ca. 13,2 %
70 °C	ca. 41,1 %	ca. 14,9 %
75 °C	ca. 45,7 %	ca. 16,5 %

Meist vorkommende (wetterabhängige) Innentemperatur der Solarzellen bei voller Belastung

* gegenüber den offiziellen Modul-Nennwerten und nur bei voller Belastung

Die hier aufgeführten Angaben sind nur als typenabhängige Durchschnitts-Richtwerte zu betrachten.

Table 1 – Abhängigkeit des Leistungsrückgangs eines Solarmoduls (Solargenerators) von der Erwärmung seiner Solarzellen bei voller Belastung. Wenig bekannt, aber leider wahr: Solarzellen und Solarmodule mögen keine Wärme.

4 Bewertungsvergleiche

hypothetische Maximumwerte, die in der Praxis bei normalen Photovoltaikanlagen überhaupt nicht erzielbar sind. Diese theoretischen Parameter stellen also bei allen Solarmodulen quasi nur „Fantasiedaten“ dar, da sich belastete Solarzellen und Solarmodule bei einem normalen Betrieb auf eine Arbeitstemperatur aufwärmen, die den energetischen Ertrag dezimiert. Welchen konkreten Einfluss das auf den Leistungsrückgang eines Solarmoduls sowie auf die Leistung einer ganzen Photovoltaikanlage hat, zeigt Tabelle 1.

Die technischen Daten der Solarmodule, die in den Datenblättern und Prospekten der Solarmodule aufgeführt sind, beruhen dennoch auf offiziell anerkannten Testbedingungen, die ursprünglich als *internationale Testbedingungen* von folgenden Voraussetzungen ausgegangen sind:

Sonneneinstrahlung (Solarstrahlung) $E = 1.000 \text{ Watt/m}^2$
 Spektralverteilung $AM = 1,5$
 Zelltemperatur $T_c = 25^\circ \text{C}$

Einfach erklärt sind die Vorbedingungen *Sonneneinstrahlung* E und die *Spektralverteilung* AM erfüllt, wenn an einem sonnigen Tag die Sonne die Solarzelle mit voller Intensität (mit hoher Dichte der Photonen) und exakt senkrecht bestrahlt (= wenn das Solarmodul optimal gegen die Sonne ausgerichtet ist).

Als neuere Alternative der internationalen Testbedingungen setzen sich zunehmend die *NOCT-Testbedingungen* durch, auf denen die offiziellen Daten einiger Hersteller beruhen. Bei diesen Testbedingungen wird von einer Nennbetriebstemperatur (eng. Normal Operating Cell Temperature) einer Solarzelle ausgegangen, die sich bei einer Sonneneinstrahlung (Solarstrahlung) von 800 Watt/m^2 , einer Spektralverteilung von $AM 1,5$ und einer Windgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde bei einer Umgebungstemperatur von 20°C

einstellt. In beiden Fällen handelt es sich eigentlich um Testbedingungen, die auf unrealistischen Vorbedingungen beruhen. Man könnte es mit der Angabe des Spritverbrauchs eines Autos vergleichen, mit dem man nur bergab fährt und lediglich das Bremspedal betätigt.

Eine kritische und selten angesprochene Schwierigkeit weist bei allen kristallinen Solarzellen die *Zelltemperatur* auf. Man geht hier bei den technischen Daten in beiden Fällen von einer viel zu niedrigen Zelltemperatur aus, die bei belasteten Solarzellen (und Solarmodulen) in der Praxis nicht erzielbar ist. Eine voll belastete Solarzelle heizt sich nämlich sehr schnell auf eine Temperatur auf, die unter Umständen weit über von $+60^\circ \text{C}$ liegt. Je nach der Einbettung der Solarzellen im Solarmodul, der Lüftung und der Umgebungstemperatur steigt die Zelltemperatur eines von der Sonne aufgeheizten Solarmoduls an einem heißen Sommertag leicht auf über $+65^\circ \text{C}$ auf.

Diese Tatsache haben wir in unseren Tabellen und Ertragsberechnungen, die Sie in diesem Buch finden, angemessen berücksichtigt. Dadurch weichen unsere Be-

Fazit

Ein Solarmodul, das normal montiert ist, kommt während seiner Existenz gar nicht in die Situation, die tabellarische *Nennleistung* und *Nennspannung* jemals länger als nur einige Minuten aufzubringen. Da es paradoxerweise an sonnigen Sommertagen zu heiß ist, heizen sich dadurch die Solarmodule sehr schnell auf. Die Ausgangsleistung und die Ausgangsspannung des Solarmoduls werden dadurch schwer in Mitleidenschaft gezogen. Tab. 1 zeigt, in welchem Umfang sich die Innentemperatur der Silizium-Solarzellen auf die tatsächlich erzielbare Nennleistung und Nennspannung der Solarmodule auswirkt.

4 Bewertungsvergleiche

rechnungen der Erträge von der reinen Umrechnung der theoretischen Modulnennleistung auf den tatsächlich erzielbaren Anlagenenertrag auffallend ab.

Die Erwärmung der Solarzellen – und die damit verbundene tatsächlich erzielbare Ausgangsleistung der Photovoltaikanlage – hängt jedoch von mehreren Faktoren ab:

- von der Art der Einbettung der Solarzellen in den Modulen sowie der Abdeckung der Modulrückseite, die fähig sein sollte, die von den Solarzellen erzeugte Wärme an die umgebende Luft abzugeben
- von der Art der Montage der Dachmodule auf dem Dach oder von dem Lüftungszwischenraum, der zwischen den Modulen und der Dachhaut vorhanden ist. Dabei müssten bereits im Planungsstadium die standortbezogene Haupt-Windrichtung sowie auch der Zugang der Luftströmung zu den Modulen berücksichtigt werden. Solarmodule auf dem Dach eines freistehenden Hauses werden wesentlich besser gekühlt als auf einem Dach, das z. B. in einer dicht bebauten Siedlung von anderen Gebäuden umringt ist. Eine bessere Kühlung wird bei Dachmodulen durch einen größeren Zwischenraum zwischen ihrer Rückseite und der Dachhaut erzielt. Mit der Größe des Zwischenraums steigt jedoch die Gefahr, dass ein kräftiger Sturm die Solarmodule abreißt und wegweht.

Hypothetisch wäre es eigentlich angemessen, die Solarmodule an ihrer Rückseite mit ähnlichen Kühlkörpern oder Kühlrippen zu versehen, wie sie z. B. bei Leistungstransistoren der Endverstärker oder bei Leistungsdioden und integrierten Spannungsreglern üblich sind. Eine solche Maßnahme wäre zwar technisch korrekt, würde die Solarmodule aber verteuern und ihre Montage komplizieren.

Die in Tab. 1 angegebenen Leistungs- und Spannungsrückgänge der Solarzellen beziehen sich nur auf den Leistungsrückgang als solchen. Beträgt die theoretische Nennleistung eines Solarmoduls z. B. 100 Watt und handelt es sich dabei um ein Modul, dessen Toleranz mit $\pm 10\%$ angegeben ist, kann es in Wirklichkeit nur eine tatsächliche Nennleistung von 90 Watt haben. Der **temperaturbezogene Leistungsrückgang** aus Tab. 1 bezieht sich dann auf die 90 Watt und nicht auf die 100 Watt des Solarmoduls.

Das Gleiche gilt auch für komplexe Photovoltaikanlagen. Zudem ist auch die Tatsache zu berücksichtigen, dass ein Solarmodul, dessen Solarzellen sich z. B. auf eine Arbeitstemperatur von „nur“ 40 °C erwärmen, kaum eine volle Leistung an den Wechselrichter liefert (weil die Sonne zu schwach strahlt). Ist das Solarmodul also optimal bestrahlt, müsste es seine maximale Spannung und Leistung erzeugen und sich dabei quasi automatisch auf eine höhere Temperatur als auf die angesprochenen 40 °C erwärmen. Auf welche Temperatur konkret? Das hängt vor allem von der Umgebungstemperatur und der Kühlung der Module ab, die wiederum von der Aufstellung der Module und den jeweiligen Windverhältnissen abhängen. Im Grunde besteht das Dilemma bei der photovoltaischen Energieumwandlung darin, dass die Solarzellen zwar kräftige Sonnenstrahlen brauchen, nicht aber die damit verbundene Wärme bzw. Hitze.

Von Solarmodulen einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage wird erwartet, dass sie unter optimalen Bedingungen (bei intensivem Sonnenschein) ohne Pause ihre maximale Leistung liefern. Für Kühlung wird meist nur gesorgt, indem man zwischen den Solarmodulen und der Dachhaut einen Zwischenraum lässt, um einen vorprogrammierten Wärmestau zu vermeiden. Optimale Kühlung wird nur im Rahmen des praktisch Machbaren berücksichtigt, denn eine speziellere Kühlung wäre,

4 Bewertungsvergleiche

z. B. auf einem aufgeheizten Hausdach, technisch schwer realisierbar und kostspielig.

Für die Beurteilung der intakten Funktion einer Photovoltaikanlage sind folgende Grundparameter wichtig:

- Die theoretische **Nennleistung** (Leistung bei max. Belastung) **der Solarmodule**
- Die theoretische **Nennspannung der Solarmodule**
- Die vom Hersteller angegebene **Toleranz der Module in %**
- Arbeitsbereich und Wirkungsgrad des Wechselrichters**

Es wäre auch wichtig zu wissen, welche Innentemperatur die Solarzellen in den Modulen während der Ermittlung der Anlagenfunktion gerade haben. Das ist für

einen privaten Betreiber allerdings messtechnisch schwer realisierbar. Daher haben wir in den Tab. 2 bis 5 jeweils zwei Spalten mit Richtwerten der Ausgangsleis-



Optimale Leistung einer netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage, die am Einspeisezähler in "kWh pro Stunde" ermittelt werden sollte	
Beispiel A: Toleranz der Solarmodule $\pm 2\%$ Wechselrichter-Wirkungsgrad 97 %	
theoretische Nennleistung der Module	ins Netz eingespeiste Energie pro Stunde *
1000 W(p)	ca. 665 bis 761 Wh
1100 W(p)	ca. 732 bis 837 Wh
1200 W(p)	ca. 798 bis 913 Wh
1300 W(p)	ca. 865 bis 989 Wh
1400 W(p)	ca. 931 bis 1065 Wh
1500 W(p)	ca. 998 bis 1141 Wh
1600 W(p)	ca. 1065 bis 1218 Wh
1700 W(p)	ca. 1131 bis 1294 Wh
1800 W(p)	ca. 1198 bis 1370 Wh
1900 W(p)	ca. 1264 bis 1446 Wh
2000 W(p)	ca. 1331 bis 1521 Wh
pro weitere 100 Watt: + ca. 66,5 bis 76,1 Wh	

* die niedrigeren Richtwerte gelten jeweils für sonnige, heiße und windstille Tage, die höheren Richtwerte gelten für sonnige, aber nicht allzu heiße Tage.

Tab. 2 – Optimale Leistung einer Photovoltaikanlage, die Solarmodule mit einer Toleranz von $\pm 2\%$ und einen Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad von 97 % verwendet.

4 Bewertungsvergleiche

Optimale Leistung einer netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage, die am Einspeisezähler in "kWh pro Stunde" ermittelt werden sollte

Beispiel B: Toleranz der Solarmodule $\pm 3\%$
Wechselrichter-Wirkungsgrad 97%

theoretische Nennleistung der Module	ins Netz eingespeiste Energie pro Stunde *
1000 W(p)	ca. 659 bis 753 Wh
1100 W(p)	ca. 725 bis 828 Wh
1200 W(p)	ca. 791 bis 904 Wh
1300 W(p)	ca. 857 bis 979 Wh
1400 W(p)	ca. 923 bis 1054 Wh
1500 W(p)	ca. 988 bis 1129 Wh
1600 W(p)	ca. 1054 bis 1205 Wh
1700 W(p)	ca. 1120 bis 1280 Wh
1800 W(p)	ca. 1186 bis 1355 Wh
1900 W(p)	ca. 1252 bis 1431 Wh
2000 W(p)	ca. 1318 bis 1506 Wh
pro weitere 100 Watt:	+ ca. 65,9 bis 75,3 Wh

* die niedrigeren Richtwerte gelten jeweils für sonnige, heiße und windstille Tage, die höheren Richtwerte gelten für sonnige, aber nicht allzu heiße Tage.

Tab. 3 – Optimale Leistung einer Photovoltaikanlage, die Solarmodule mit einer Toleranz von $\pm 3\%$ und einen Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad von 97% verwendet.

Optimale Leistung einer netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage, die am Einspeisezähler in "kWh pro Stunde" ermittelt werden sollte

Beispiel C: Toleranz der Solarmodule $\pm 5\%$
Wechselrichter-Wirkungsgrad 96%

theoretische Nennleistung der Module	ins Netz eingespeiste Energie pro Stunde *
1000 W(p)	ca. 638 bis 730 Wh
1100 W(p)	ca. 702 bis 803 Wh
1200 W(p)	ca. 766 bis 876 Wh
1300 W(p)	ca. 830 bis 949 Wh
1400 W(p)	ca. 893 bis 1022 Wh
1500 W(p)	ca. 957 bis 1095 Wh
1600 W(p)	ca. 1021 bis 1168 Wh
1700 W(p)	ca. 1085 bis 1241 Wh
1800 W(p)	ca. 1149 bis 1314 Wh
1900 W(p)	ca. 1213 bis 1387 Wh
2000 W(p)	ca. 1276 bis 1460 Wh
pro weitere 100 Watt:	+ ca. 63,8 bis 73 Wh

* die niedrigeren Richtwerte gelten jeweils für sonnige, heiße und windstille Tage, die höheren Richtwerte gelten für sonnige, aber nicht allzu heiße Tage.

Tab. 4 – Optimale Leistung einer Photovoltaikanlage, die Solarmodule mit einer Toleranz von $\pm 5\%$ und einen Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad von 96% verwendet.

4 Bewertungsvergleiche

Optimale Leistung einer netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage, die am Einspeisezähler in "kWh pro Stunde" ermittelt werden sollte

**Beispiel D: Toleranz der Solarmodule $\pm 10\%$
Wechselrichter-Wirkungsgrad 96%**

theoretische Nennleistung der Module	ins Netz eingespeiste Energie pro Stunde *
1000 W(p)	ca. 605 bis 691 Wh
1100 W(p)	ca. 665 bis 760 Wh
1200 W(p)	ca. 726 bis 829 Wh
1300 W(p)	ca. 786 bis 898 Wh
1400 W(p)	ca. 847 bis 968 Wh
1500 W(p)	ca. 907 bis 1037 Wh
1600 W(p)	ca. 968 bis 1106 Wh
1700 W(p)	ca. 1028 bis 1175 Wh
1800 W(p)	ca. 1089 bis 1244 Wh
1900 W(p)	ca. 1149 bis 1313 Wh
2000 W(p)	ca. 1210 bis 1382 Wh
pro weitere 100 Watt:	+ ca. 60,5 bis 69,1 Wh

* die niedrigeren Richtwerte gelten jeweils für sonnige, heiße und windstille Tage, die höheren Richtwerte gelten für sonnige, aber nicht allzu heiße Tage.

Tab. 5 – Optimale Leistung einer Photovoltaikanlage, die Solarmodule mit einer Toleranz von $\pm 10\%$ und einen Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad von 96% verwendet.

tungen aufgeführt: Die Spalte links („von“) gilt jeweils für einen heißen Sommertag, an dem Windstille herrscht, die Spalte rechts („bis“) gilt für einen sonnigen, aber kühleren Sommertag, an dem es leicht windig ist.

Es handelt sich hier nur um Richtwerte, die von vielen flexiblen Faktoren abhängen. Die Intensität der Sonnenbestrahlung, die Umgebungstemperatur, die Belüftung der Solarmodule durch eine Brise usw. stellen keine zuverlässigen Konstanten dar, sondern können nur ungefähr geschätzt werden.

Beachten Sie ferner:

- Die Spannung und die Leistung der Solarzellen sinken mit der zunehmenden Erwärmung linear.
- Der Solarzellenstrom sinkt nicht, sondern steigt sogar mit der Zellenerwärmung – allerdings nur derart geringfügig, dass es für die Praxis nicht von Bedeutung ist.

Wenn Sie über die Funktionsweise und Eigenheiten Ihrer Photovoltaikanlage bereits im Bilde sind, können Sie sich mithilfe von Tabelle 6 vergewissern, ob Ihre Anlage optimal funktioniert oder welche ihrer Teile den Ertrag Ihrer Anlage durch unzureichende Funktion unnötig verringern. Falls Sie mit der Funktionsweise Ihrer Photovoltaikanlage noch nicht angemessen vertraut sind, überspringen Sie vorerst die nun folgende Tabelle, um sich erst in den weiteren Kapiteln Grundwissen über die Problematik zu verschaffen. Die Zeit, die Sie dafür aufbringen, ist eine wichtige Investition in Ihre Photovoltaikanlage. Gutes Grundwissen über Ihre Anlage kann Ihnen viel Zeit, Ärger und Geld sparen. Es

4 Bewertungsvergleiche

wird Ihnen helfen, gelegentlich auftretenden Problemen zu begegnen. Wenn Sie dennoch fremde Hilfe benötigen, haben Sie Überblick, denn Sie werden mit den Zusammenhängen der einzelnen Anlagenkomponenten vertraut sein.

Mithilfe von Tab. 6 können Sie nun überprüfen, ob Ihre Photovoltaikanlage perfekt funktioniert oder nicht:

Frage	Antwort
<p>❶ Funktioniert meine Anlage optimal und speist sie einen angemessenen energetischen Ertrag ins öffentliche Netz ein?</p>	<p>Suchen Sie sich aus den Tabellen 2 bis 5 die Tabelle aus, bei der die Toleranz der Solarmodule auf Ihre Module zutrifft. Suchen Sie sich danach die Zeile mit der Modulleistung aus, die mit der Nennleistung Ihrer Anlage (Ihrer Solarmodule) übereinstimmt. Ist die Nennleistung Ihrer Anlage keine „runde Zahl“, die in einer der Zeilen aufgeführt ist, behelfen Sie sich mit einer Schätzung oder Umrechnung. Beispiel: Ihre Solarmodule haben laut Datenblatt eine Toleranz von $\pm 5\%$ und eine Nennleistung von 1.650 W(p). In Hinsicht auf die Toleranz trifft hier Tabelle 4 zu. Dort gibt es zwar keine Rubrik für 1.650-Watt-, wohl aber für 1.600-Watt-Nennleistung. Da in der untersten Zeile die Leistung für je 100 Watt zusätzlich aufgeführt ist, können Sie die zwei angegebenen Werte halbieren, um sie auf 50 Watt zu reduzieren. Der Ertrag müsste bei 1.600 W(p) ca. 1.021 bis 1.186 Wh und für die zusätzlichen 50 W(p) noch ca. 32 bis 36,5 Wh betragen. Das wären also ca. 1.053 Wh (1.021+32 Wh) bis 1.225 (1.186 + 36,5 Wh). Die 1.053 oder 1.225 Wh zeigt – je nach der Stärke des Sonnenscheins – laut der Tabelle Ihr Einspeisezähler als ins öffentliche Netz eingespeiste Leistung während einer Mittagsstunde an (siehe hierzu auch die Erläuterung der Ertragskontrolle bei den Tabellen). Ist der Wirkungsgrad Ihres Wechselrichters z. B. um 2 % niedriger als in der Tabelle vorgesehen, müssen Sie die vorhergehenden Werte jeweils mit 0,98 multiplizieren, um den erzielbaren Ertrag Ihrer Anlage zu korrigieren. Der würde somit auf 1.032 oder 1.200 Wh sinken. Zeigt nun der Einspeisezähler einen etwas höheren Ertrag an, als wir theoretisch vorgesehen haben, weist es z. B. darauf hin, dass die tatsächliche Toleranz Ihrer Module nicht ausgesprochen bei -5 %, sondern z. B. nur bei -3 % liegt. Es kann auch sein, dass die Sonnenstrahlen während der Messung etwas kräftiger waren als angenommen und z. B. 1.200 Watt/m² anstelle der theoretisch vorgesehenen 1.000 Watt/m² aufgebracht haben. Zeigt der Einspeisezähler Werte an, die niedriger sind, als laut der zuständigen Tabelle und der erläuterten Berechnungen angemessen wäre, stimmt an der Funktion der Anlage etwas nicht. Es lohnt sich allerdings, mehrere Kontrollmessungen (an einem sonnigem Tag um die Mittagszeit) vorzunehmen, um Messfehler auszuschließen. Bestätigen solche Kontrollmessungen den Verdacht, dass die Anlage nicht optimal funktioniert, muss überprüft werden, ob dies nun durch die Solarmodule oder durch den Wechselrichter verursacht wird.</p>

Tab. 6 – Fragen und Antworten zu der intakten Funktion einer Photovoltaikanlage.

7 Wichtige technische Parameter der Solarmodule

7 Wichtige technische Parameter der Solarmodule

Die meisten Photovoltaikanlagenbetreiber interessiert hauptsächlich die elektrische Leistung, die von den Solarmodulen erbracht und ins öffentliche Netz eingespeist wird. Wer jedoch Wert darauf legt, über die Funktion seiner Anlage zumindest einigermaßen im Bilde zu sein oder wer wissen möchte, wie der Ertrag seiner Anlage optimiert werden kann, sollte gewisse Zusammenhänge der technischen Parameter kennen.

Die theoretische **Nennleistung** der Solarmodule, die oft auch als **Leistung bei max. Belastung** oder als **maximale Leistung P_{\max}** bezeichnet wird, finden Sie in den technischen Unterlagen Ihrer Photovoltaikanlage. Sie wird in Watt (W) angegeben, wobei in der Solarelektrik zum Watt-Zeichen noch ein, tiefgestelltes „P“ angehängt wird. Also wird die Leistung eines 100-Watt-Solarmoduls mit $100 W_p$ angegeben. Das zusätzliche „P“ hinter den Watt darf man als einen Hinweis darauf betrachten, dass es sich bei dieser Leistung nicht um eine konstante, sondern nur um eine maximal erzielbare und von vielen Faktoren abhängige Leistung handelt.

Die Nennleistung einer Photovoltaikanlage resultiert aus den Nennleistungen einzelner Solarmodule. Die Leistungen aller einzelnen Solarmodule addieren sich. Vorausgesetzt natürlich, alle Solarmodule – oder alle Solarmodule einzelner Stränge – haben identische Nennleistungen.

Besteht eine Photovoltaikanlage, die auch als *solarelektrischer Generator* bezeichnet werden kann, z. B. aus fünfzehn Solarmodulen à $100 W_p$, beträgt ihre nominale Gesamtnennleistung 1.500 Watt ($15 \times 100 W = 1.500 W$).

Die vom Hersteller angegebene Toleranz der Solarmodule finden Sie in den Datenblättern Ihrer Solarmodule. Die Toleranz der meisten der handelsüblichen Solarmodule beträgt durchschnittlich $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 5\%$ oder $\pm 10\%$. Es gibt aber auch Solarmodule, deren Toleranz nur mit $\pm 1\%$ angegeben wird.

Sind auf Ihrem Dach Solarmodule montiert, deren Toleranz (Leistungstoleranz) laut Hersteller „stolze“ $\pm 10\%$ beträgt, dürften Sie davon ausgehen, dass die tatsächliche Nennleistung der ganzen Photovoltaikanlage wahrscheinlich nur bei 90% der theoretischen Nennleistung liegen kann, die sich aus der Summe einzelner Modulleistungen ergibt. Bei Solarmodulen, deren offizielle Toleranz nur $\pm 5\%$ beträgt, dürfte die tatsächliche Nennleistung nur höchstens 5 % unterhalb der theoretischen Nennleistung liegen. Bei Solarmodulen, deren Toleranz der Hersteller (im Datenblatt) z. B. nur mit $\pm 2\%$ angibt, dürfte die tatsächliche Nennleistung nur höchstens 2 % niedriger sein, als es der theoretischen Nennleistung entspricht usw.

Erhoffen Sie besser nicht, dass Ihre Photovoltaikanlage, die z. B. aus Solarmodulen mit einer Toleranz von

7 Wichtige technische Parameter der Solarmodule

$\pm 10\%$ besteht, einen „Leistungsplus“ von 10% aufbringen könnte. Eine höhere Leistung als es der Summe der einzelnen Modulnennleistungen entspricht, ist nicht zu erwarten. Dies wäre nur dann erzielbar, wenn alle in den Modulen eingebetteten Solarzellen ohne Ausnahme eine um 10% höhere

Leistung aufbringen würden. Einfach formuliert dürfte also keine einzige der Solarzellen eine niedrigere Leistung als 110% haben. Das ist jedoch bei einer normalen serienmäßigen Herstellung der Solarzellen nicht realisierbar und bei der Selektion der einzelnen Solarzellen nicht vorgesehen.

Einige Hersteller von Solarmodulen geben daher die Leistungstoleranz nicht in der Form von Plus/Minus (\pm), sondern nur in der Form von Minus (-) an.

Ausführungsbeispiel eines Solarmodul-Datenblattes:

Multikristallines Solarmodul Typ SIS 106



Elektrische Kennwerte

Nennleistung P_{max}	[W _p] ¹⁾	106
Nennstrom I_{MPP}	[A]	4,25
Nennspannung U_{MPP}	[V]	25
Kurzschluss-Strom I_K	[A]	4,7
Leerlaufspannung U_L	[V]	32,4
Leistungstoleranz		+/- 5 %

Mechanische Daten

Länge	[mm]	1420
Breite	[mm]	816
Höhe (mit Dose)	[mm]	60
Höhe (nur Rahmen)	[mm]	52
Gewicht	[kg]	13

- 1) W_p = Spitzenleistung unter Standard-Testbedingungen:
AM (Air Mass) 1,5
E (Einstrahlung) = 1000 W/m^2
 T_c (Zellentemperatur) = $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Leistungsgarantie: 25 Jahre

Fazit

Wird bei Ihren Solarmodulen eine Toleranz von z. B. $\pm 5\%$ angegeben, dürfen Sie davon ausgehen, dass die Nennleistung (maximale Leistung P_{max}) der ganzen Photovoltaikanlage möglicherweise 5% niedriger ist, als es der Summe der theoretischen Modulleistungen entsprechen würde. Aber verwechseln Sie diese theoretische Nennleistung nicht mit der tatsächlichen elektrischen Leistung, die der Wechselrichter von aufgewärmten Solarmodulen bezieht (siehe hierzu Tab. 1 bis 5 auf Seite 32 bis 37 mit Erläuterung).

7.1 Die Nennleistung eines Solarmoduls

Die theoretische **Nennleistung** eines Solarmoduls, die oft auch als *maximale Leistung* P_{max} bezeichnet wird, ist allerdings keine Konstante, sondern hängt vom jeweiligen Zustand jeder einzelnen Zelle ab, aus denen das Solarmodul, oder auch eine länger Modulkette, besteht.

Ein kristallines Solarmodul setzt sich aus einer größeren Anzahl einzelner Solarzellen zusammen, die in beliebig langen Reihen seriell miteinander zu Ketten verbunden werden.

Die **Nennleistung** einer Solarzelle wird von ihrer **Nennspannung** und ihrem **Nennstrom** bestimmt und nach der Formel

Spannung (in Volt) \times **Strom** (in Ampere) =
Leistung (in Watt) berechnet.

Die Nennleistung eines jeden Solarmoduls wird dann schlicht als die Summe der theoretischen Nennleistungen einzelner Solarzellen festgelegt.

Beispiel A

Die Nennspannung einer Solarzelle beträgt 0,47 Volt (V) und ihr Nennstrom beträgt **4,25 Ampere** (A). Multiplizieren wir die 0,47 Volt mit 4,25 Ampere, ergibt es eine Zellen-Nennleistung von exakt 1,9975 Watt – also aufgerundet 2 Watt.

Beispiel B

Besteht ein Solarmodul aus 36 Solarzellen, deren theoretische Nennleistung 2 Watt pro Zelle beträgt, ergibt es eine Modul-Nennleistung von 72 Watt (36 Zellen \times 2 Watt = 72 Watt).

Wird ein solches Solarmodul z. B. mit Solarzellen bestückt, deren Toleranz $\pm 5\%$ beträgt, ergibt sich daraus automatisch, dass auch das Solarmodul eine

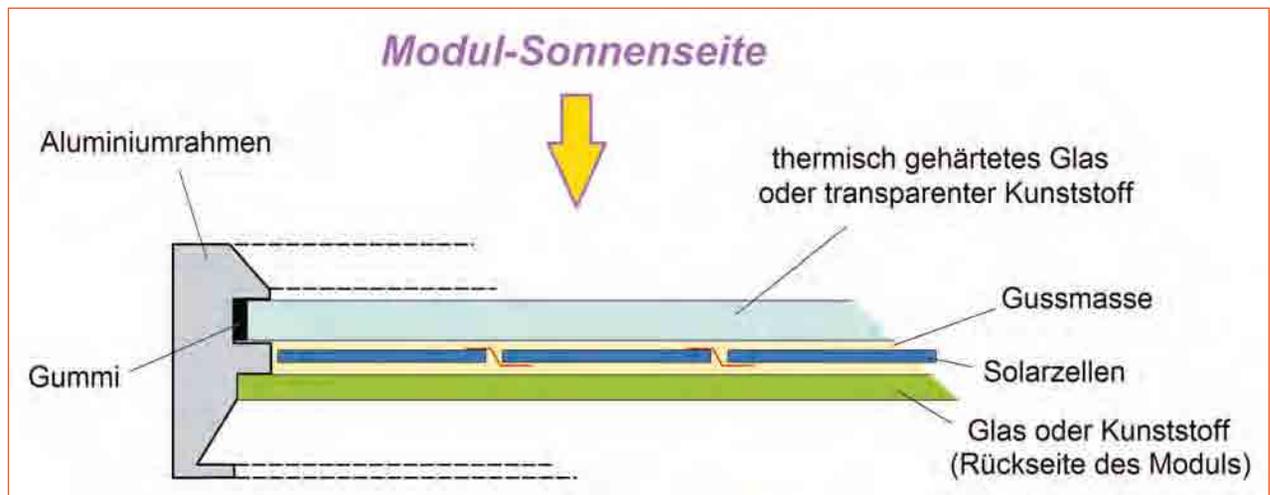


Abb. 7.1 – Beispiel der Solarzellenanordnung im Solarmodul (Ansicht im Schnitt).

7.1 Die Nennleistung eines Solarmoduls

Toleranz von $\pm 5\%$ aufweist. Das Solarmodul wird somit als ein 72 Watt-Modul mit einer Toleranz von $\pm 5\%$ vom Hersteller angeboten. Dies beinhaltet, dass ein solches Modul eventuell nur eine tatsächliche Nennleistung von 68,4 Watt erbringen kann – und möglicherweise (wenn nicht sogar bestenfalls) auch erbringen wird.

Wie inzwischen an anderen Stellen erklärt wurde, genügt es, wenn eine der Solarzellen – oder einige wenige der Solarzellen – durch die Herstellungstreuung in dem „Minus-Bereich von 5 %“ liegen, um die Ausgangsleistung des ganzen Moduls um die vollen „Minus 5 %“ zu verringern. Dieser Aspekt wird jedoch bei der Angabe der Nennleistung eines Solarmoduls

nicht berücksichtigt. In der technischen Dokumentation eines jeden Moduls wird jedoch u. A. angegeben, welche Toleranz das Modul hat.

Die Solarzellen können wahlweise als sogenannte monokristalline oder polykristalline (multikristalline) Zellen ausgelegt sein. Dass monokristalline Solarzellen im Durchschnitt einen etwas höheren Wirkungsgrad als polykristalline Solarzellen haben, spielt im Moment keine Rolle.

Die einzelnen Solarzellen, die gegenwärtig in Solarmodulen eingebettet werden, haben Abmessungen von ca. 100×100 mm bis 155×155 mm und sind überwiegend nur ca. 0,15 bis 0,25 mm dick (zum Vergleich: Die Buchseite, die Sie gerade lesen, ist

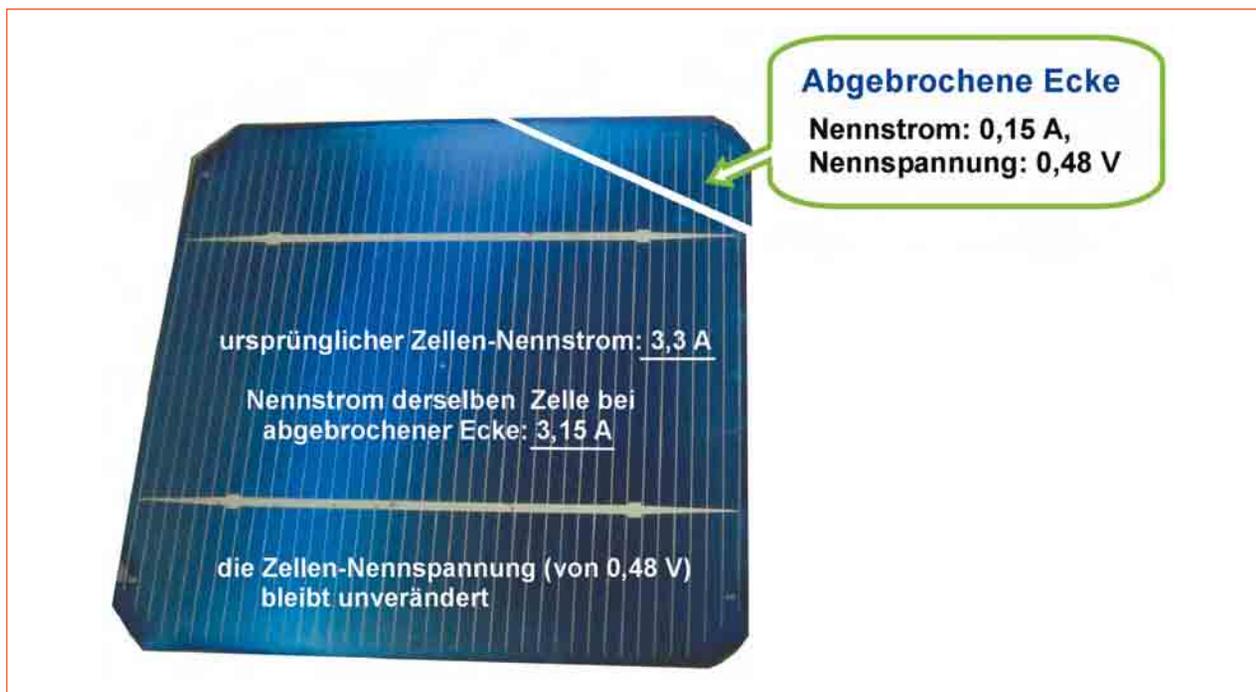


Abb. 7.2 – Die Verkleinerung der „aktiven“ Fläche einer Solarzelle hat praktisch keinen Einfluss auf die Zellenspannung, sondern nur auf den Zellenstrom.

7.1 Die Nennleistung eines Solarmoduls

ca. 0,1 mm dick). Kristalline Solarzellen sind glashart und sehr zerbrechlich. Hält man eine solche „kahle“ Solarzelle mit zwei Fingern unvorsichtig, zerbricht sie wie Eis auf einer Pfütze. In den Solarmodulen sind jedoch die Solarzellen durch die Einbettung und Glasabdeckung gut gegen Beschädigungen geschützt. Es kommt nur sehr selten (aber dennoch) vor, dass eine der Zellen im Solarmodul z. B. beim Transport, bei der Montage oder durch mechanische Spannungen, zu denen es z. B. bei stärkeren Veränderungen der Außentemperatur kommt, zerbricht oder dass eine ihrer Ecken abbricht – wie Abb. 7.2 zeigt.

Eine ähnliche Auswirkung auf den Zellenstrom und die Zellenleistung hat die Beschattung einer der Zellen. Abb. 7.3 verdeutlicht, wie der Zellenstrom durch eine Beschattung verringert werden kann. Bei vielen Solarmodulen setzt sich vor allem in den unteren Ecken Schmutz oder Schnee an, der ebenfalls eine Zellenbeschattung verursacht. Auch wenn es harmlos aussieht, kann die Beschattung einen unerwünscht großen Einfluss auf die Leistung des betroffenen Solarmoduls und damit auf die Leistung der ganzen Photovoltaikanlage haben.

Die Nennleistung (maximale Leistung P_{\max}) eines Solarmoduls oder eines aus mehreren Solarmodulen bestehenden Photovoltaikgenerators hängt von der Nennspannung (Spannung bei Maximalleistung) und dem Nennstrom (Strom bei Maximalleistung) ab. Die Formel lautet:

Nennleistung (P_{\max}) in Watt (W_p) = Nennspannung in Volt \times Nennstrom in Ampere

Abb. 7.2 und 7.3 zeigen, dass eine Verringerung der Zellenfläche keinen Einfluss auf die eigentliche Zellenleistung, wohl aber auf den Zellenstrom hat.

Vom angewehten Laub beschattete Solarzelle:

Ursprünglicher Nennstrom der Solarzelle: 3,3 A

Nennstrom der zu 40% beschatteten Solarzelle: 1,98 A

Die ursprüngliche Zellen-Nennspannung bleibt bei der Beschattung unverändert



Abb. 7.3 – Angewehtes Laub, Schmutz oder Schnee verkleinern ebenfalls die aktive Fläche der Solarzelle und verringern die Zellenleistung.

7.1 Die Nennleistung eines Solarmoduls

Eine Solarzelle (als Grundbaustein des Solarmoduls) kann mit einer großen Menge an Batterien verglichen werden, die nach Abb. 7.4 parallel verschaltet sind. Entnimmt man einen Teil dieser Batterien, hat es keinen Einfluss auf die Ausgangsspannung einer solchen Einheit. Ganz anders verhält es sich dagegen mit dem Zellenstrom. Der Nennstrom der schwächsten Zelle in einem Solarmodul ist für den Ausgangsstrom (Strom bei Maximalleistung) des ganzen Moduls bestimmend.

Wenn beispielsweise ein Solarmodul nach Abb. 7.5 aus 36 Solarzellen besteht, addieren sich die Spannungen einzelner Solarzellen zu einer Ausgangsspannung, die in unserem Beispiel exakt 16,92 Volt beträgt. Das ist allerdings Theorie. In der Praxis werden einige der im Modul eingebetteten Solarzellen vielleicht eine Spannung von z. B. nur 0,465 Volt, bei anderen 0,472 Volt oder 0,462 Volt betragen usw. Kleine Spannungsunterschiede der einzelnen Solarzellen haben jedoch nur einen geringfügigen Einfluss auf die Nennleistung des Moduls. Weshalb dem so ist, zeigt ein konkretes Beispiel:

Angenommen, das Modul aus Abb. 7.5 ist mit Solarzellen bestückt, die laut technischer Daten für eine Nennspannung von

0,47 Volt und einen Nennstrom von 4 Ampere ausgelegt sind. Multipliziert man nun die in der angesprochenen Abbildung eingezeichnete Nennspannung von 16,92 Volt mit dem Zellenstrom von 4 Ampere, ergibt sich eine Modulnennleistung

von theoretisch 67,68 Watt ($16,92 \text{ V} \times 4 \text{ A} = 67,68 \text{ W}$). Beträgt die tatsächliche Nennspannung durch die Streuung einiger Solarzellen z. B. nur 16,7 Volt (anstelle der 16,92 Volt), sinkt die Modulnennleistung „nur“ auf 66,8 Watt ($16,7 \text{ V} \times 4 \text{ A} =$



Abb. 7.4 – Eine Solarzelle besteht aus einer großen Anzahl von „Mini-Spannungsquellen“, die vereinfacht mit einer größeren Menge parallel verschalteter Batterien verglichen werden können: Die Entnahme einiger Batterien hat keinen Einfluss auf die Ausgangsspannung, sondern nur auf den Strom, den die restlichen Batterien liefern können.

7.1 Die Nennleistung eines Solarmoduls

66,8 W). Das kann in der Praxis leicht vorkommen und ist akzeptabel, denn es handelt sich nur um einen kleinen Leistungsunterschied.

Wirklich problematisch ist es bei den Solarmodulen und ganzen Solarmodulketten, wenn ein zu niedriger Nennstrom einer einzigen defekten Solarzelle den ganzen Ausgangsstrom und somit auch die Ausgangsleistung drosselt.

Wie sich so etwas manifestieren kann, zeigt Abb. 7.6: Ist eine der Solarzellen im Modul vorübergehend

durch angewehtes Laub oder angesammelten Schmutz beschattet, drosselt sie unter Umständen den Ausgangsstrom (Nennstrom) des ganzen Solarmoduls auf den Strom ab, den diese eine Solarzelle durchlässt. Dadurch sinkt auch die Nennleistung des Moduls auf den Wert herab, der sich rechnerisch nach der uns bereits bekannten Formel als „Strom mal Spannung“ (in diesem Fall als $3 \text{ A} \times 16,92 \text{ V}$) ergibt.

Bypass-Dioden ermöglichen bei einer defekten oder stark beschatteten Solarzelle sowie auch bei einer

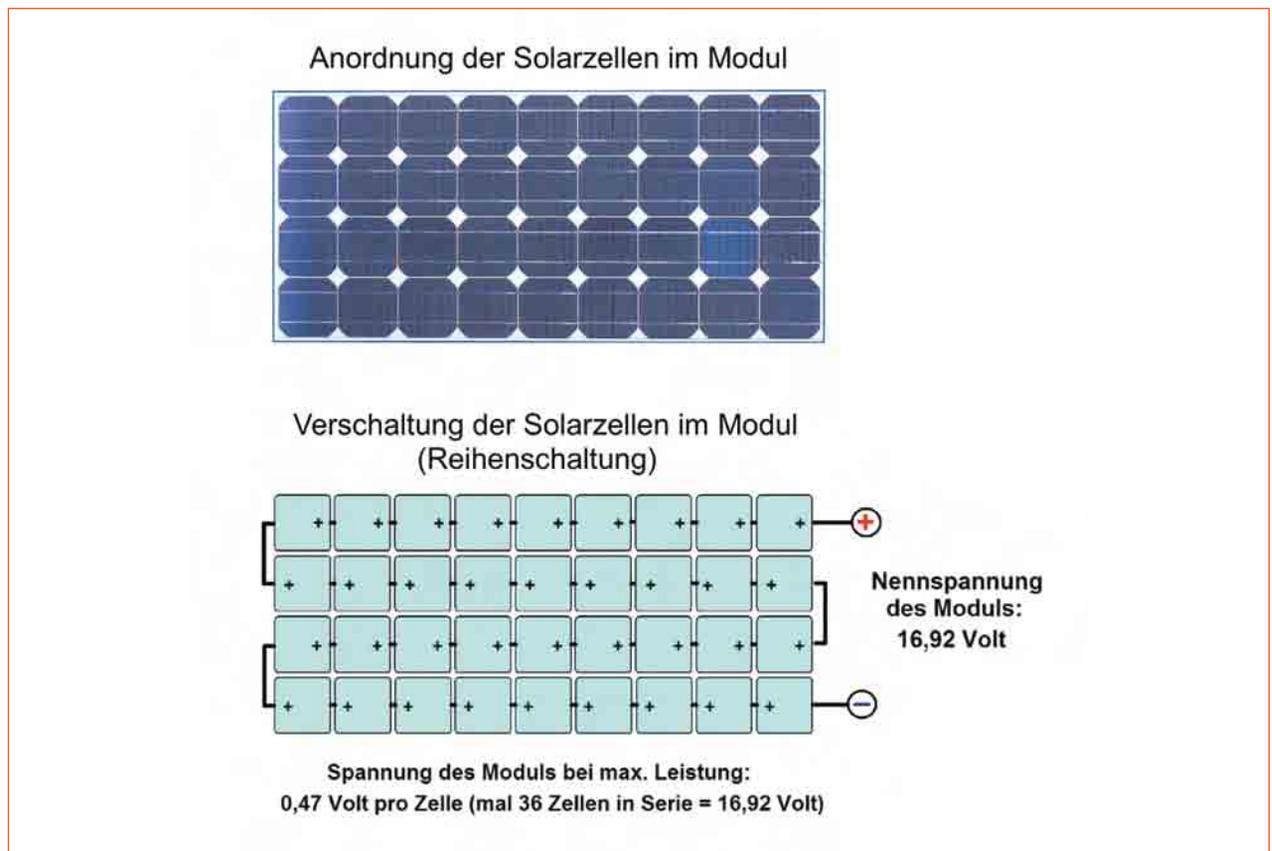


Abb. 7.5 – Serielle Verschaltung der Solarzellen im Solarmodul.

7.1 Die Nennleistung eines Solarmoduls

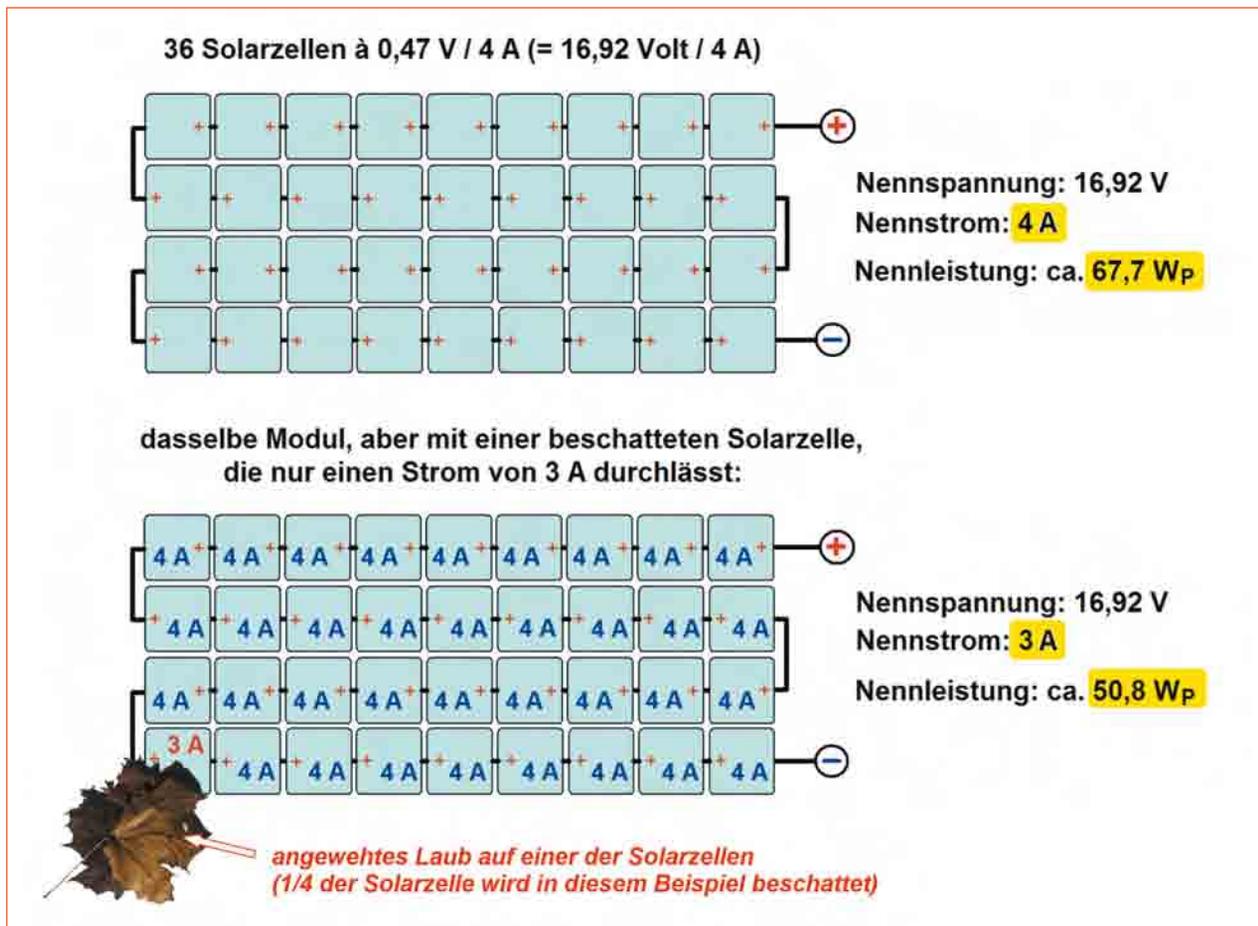


Abb. 7.6 – Eine einzige beschattete oder verschmutzte Solarzelle kann bei einem Solarmodul, in dem keine Bypass-Dioden integriert sind, die Ausgangsleistung kräftig drosseln.

unterbrochenen Verbindung zwischen zwei Solarzellen im Modul eine Umleitung des Stroms und verhindern dadurch, dass wegen dieses Defekts die ganze Solaranlage ausfällt.

Die Leistung der Solaranlage – oder des betroffenen Solarmodulstrangs – verringert sich dann, wie bereits an anderen Stellen in diesem Buch erläutert wurde, nur um den Teil der Modulfläche (Solarzellenkette), die innerhalb der Umleitung liegt.

7.2 Die Nennspannung eines Solarmoduls

Nun bleibt die Frage nach der optimalen Solarspannung, die durch eine Reihenschaltung von mehreren Solarmodulen quasi nach Belieben gewählt werden kann. Bei einer Reihenschaltung von Solarmodulen addieren sich die Spannungen einzelner Module ähnlich wie die Spannungen von Batterien, die in Reihe geschaltet sind (Abb. 7.7).

Die Nennspannung eines aus Solarmodulen zusammengestellten Solarmodulstrangs („Strings“) sollte möglichst nahe an der Obergrenze der maximalen Eingangsspannung des verwendeten Wechselrichters sein. Eine Ausnahme bilden Wechselrichter, bei denen seitens des Herstellers als maximale Eingangsspannung nicht die Summe der Nennspannungen, sondern die Summe der Leerlaufspannungen aller Solarmodule funktionsbedingt bestimmend ist. Was man unter dem Begriff *Leerspannung* zu verstehen hat, wird im nächsten Kapitel erklärt. Vorerst sehen wir uns näher an, was es mit der optimalen Anpassung der Nennspannung der Solarmodulkette an die Eingangsspannung des Wechselrichters auf sich hat.

Bei einer bestehenden Photovoltaikanlage ist die Nennspannung einzelner Solarmodulstränge bereits festgelegt und kann bei Bedarf

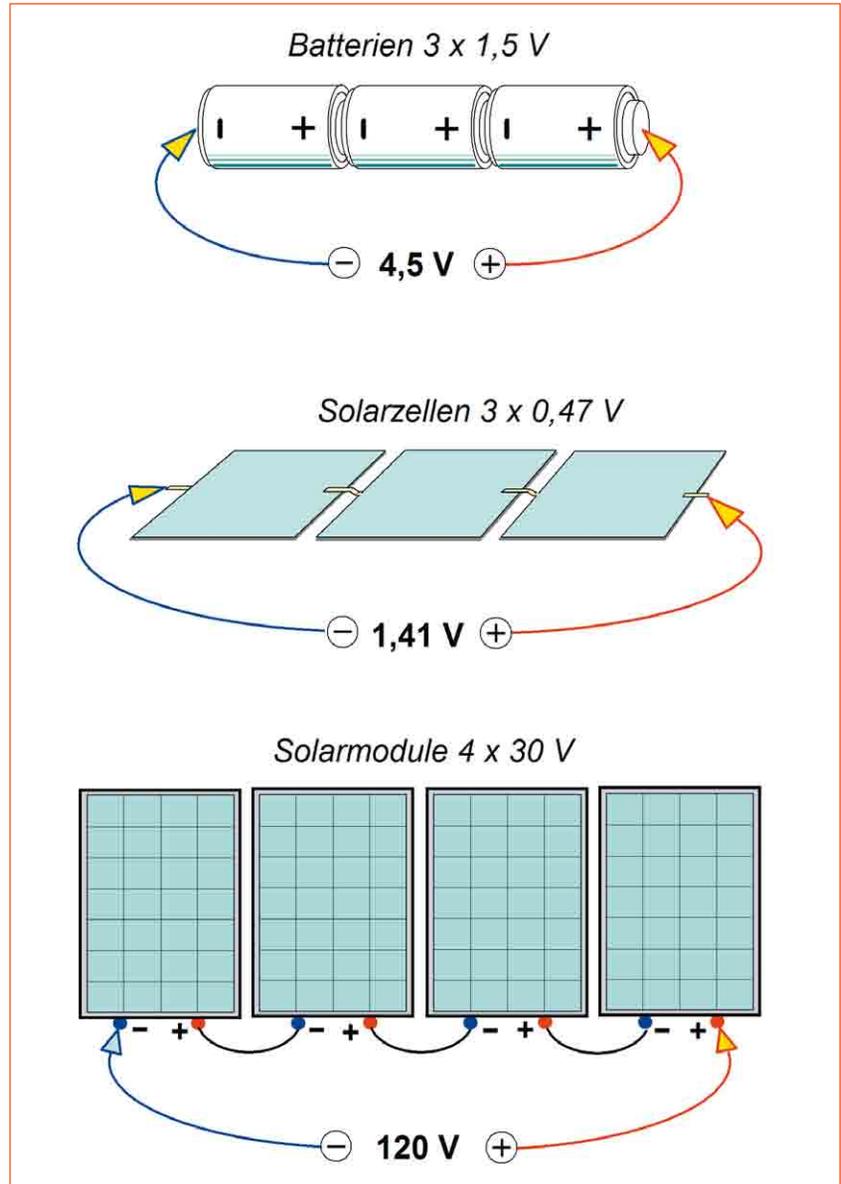


Abb. 7.7 – Bei einer Reihenschaltung (seriellen Schaltung) addieren sich die Spannungen der einzelnen „Spannungsquellen“: Dies gilt z. B. sowohl für Batterien als auch für Solarzellen und Solarmodule.

7.2 Die Nennspannung eines Solarmoduls

nur noch mithilfe zusätzlicher Solarmodule erhöht werden – vorausgesetzt es ist dafür noch Platz vorhanden.

Im Planungsstadium einer Photovoltaikanlage ist es einfacher, denn durch die Wahl der passenden Solar-

module kann die Solarspannung optimal auf den Eingangsspannungsbereich der infrage kommenden Wechselrichter abgestimmt werden.

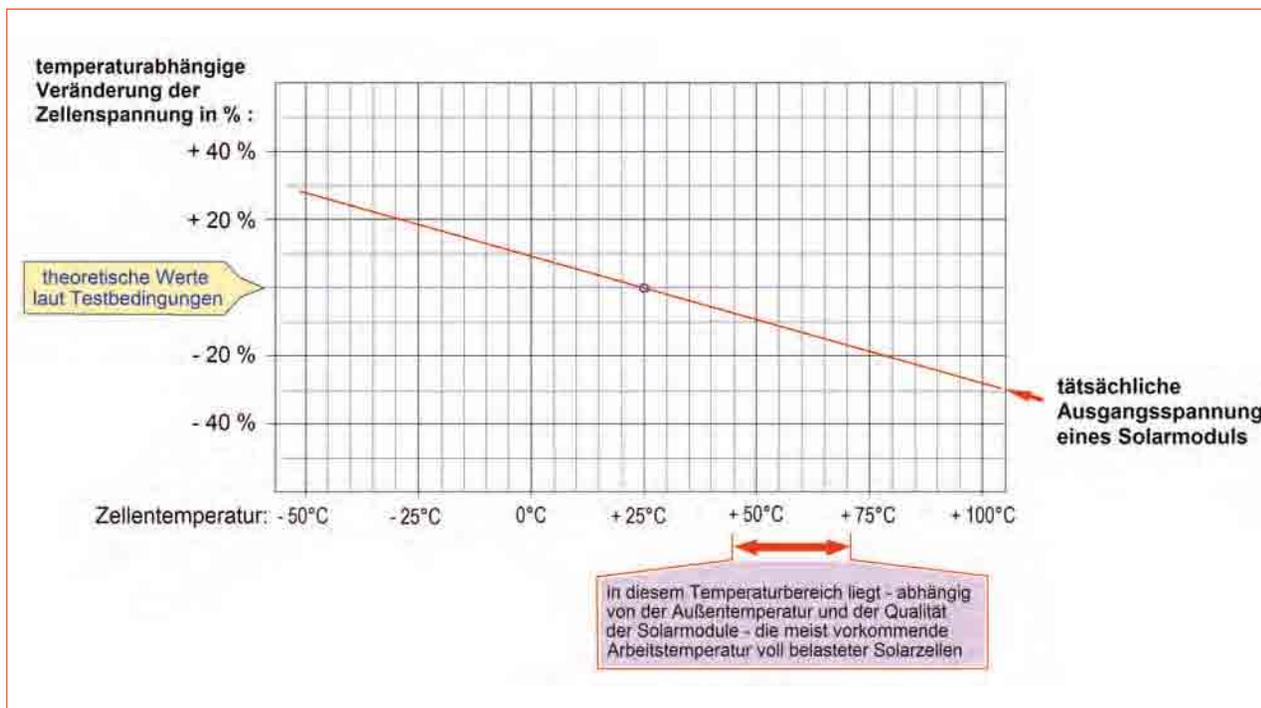


Abb. 7.8 – Gut zu wissen: Die Nennspannung der Solarzellen und Solarmodule sinkt bei Erwärmung zwar nicht so stark wie die Nennleistung, aber bei voller Belastung, höherer Außentemperatur und kräftigerem Sonnenschein sinkt sie dennoch gegenüber dem Nennwert, der in den technischen Daten aufgeführt ist.

7.3 Die Leerlaufspannung eines Solarmoduls

Die Leerlaufspannung einer kristallinen Solarzelle – und somit auch die Leerlaufspannung eines Solarmoduls, das aus kristallinen Solarzellen besteht – ist etwa 18 bis 22 % höher als die Zellen- oder Modulnennspannung. Ihre Höhe wird in der Regel bei den technischen Daten der Solarmodule angegeben.

Wie diese Bezeichnung andeutet, handelt es sich um die Spannung einer unbelasteten Solarzelle oder eines unbelasteten Solarmoduls. Bei einer Photovoltaikanlage verdient die Leerlaufspannung nur deshalb eine gewisse Aufmerksamkeit, weil sie wesentlich höher als die Modulnennspannung ist.

Sind z. B. nach Abb. 7.9 mehrere Solarmodule seriell verbunden, darf nicht vergessen werden, dass an

den Anschlussklemmen eines solchen elektrischen Generators eine lebensgefährlich hohe Spannung liegen kann, wenn sie unbelastet oder nur gering belastet sind. Das Gefährliche daran ist, dass die Leerlaufspannung eines unbelasteten Solarmoduls oder einer Modulkette auch dann noch annähernd das im Prospekt angegebene Maximum haben kann, wenn die Solarmodule nur gering belichtet sind.

Aus diesem Grund sollte vor der Arbeit an einem Solarmodulstrang oder an seiner Zuleitung zum Wechselrichter eine der Verbindungen des Modulstrangs z. B. in seiner Mitte oder an einer zugänglichen Stelle unterbrochen werden. Dies ist bei den meisten Systemen leicht machbar, da nur einer der Verbindungsste-

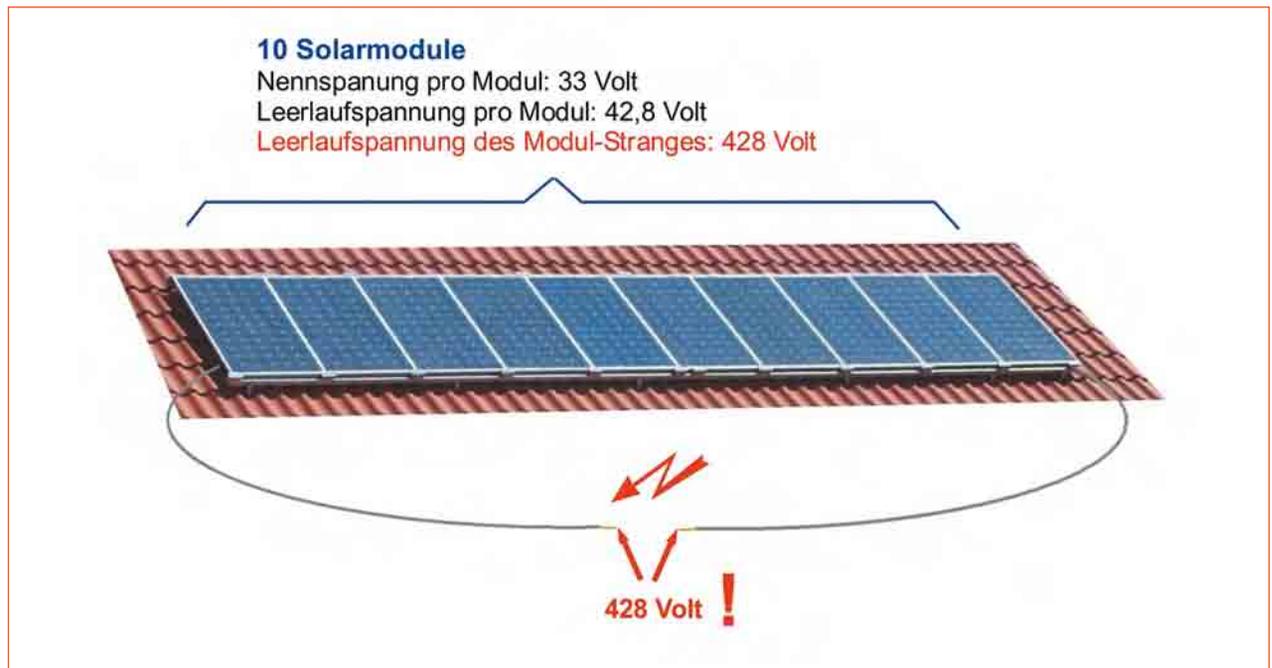


Abb. 7.9 – Vorsicht! Die Leerlaufspannung kann am Ausgang einer unbelasteten Kette von mehreren Solarmodulen lebensgefährlich hoch sein!

7.3 Die Leerlaufspannung eines Solarmoduls

cker (nach Abb. 7.11) einfach aus dem Solarmodul herausgezogen wird. Falls sich der Solargenerator aus mehreren unabhängigen Strängen zusammensetzt, ist darauf zu achten, dass die vorgesehene Unterbrechung der Verbindung des Modulstrangs auch tatsächlich bei dem richtigen Strang vorgenommen wird.

Die Höhe der projektbezogenen Leerlaufspannung muss auch bei der Suche nach einem optimalen Wechselrichter berücksichtigt werden: Manche Wechselrichterhersteller weisen mit Nachdruck darauf hin, dass die höchste Wechselrichtereingangsspannung mindestens der Leerlaufspannung bei 1.000 W/m^2 und niedriger Zelltemperatur (Standard: $-10 \text{ }^\circ\text{C}$) entsprechen müsste. Um dies zu verstehen, hilft eine einfache grafische Darstellung des temperaturabhängigen Verlaufs der Modul-Leerlaufspannung nach Abb. 7.10, die auf den internationalen Testbedingungen beruht: Die Leer-

laufspannung sinkt mit zunehmender und steigt mit abnehmender Temperatur der Solarzellen.

Die in den Datenblättern angegebene Leerlaufspannung der Solarmodule bezieht sich entweder auf eine Zelltemperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (laut internationalen Testbedingungen) oder $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (nach NOCT). Da beide Arten des Tests an dem eigentlichen temperaturbezogenen Verlauf der Leerlaufspannung nichts ändern, können wir anhand der Grafik aus Abb. 7.10 davon ausgehen, dass die Leerlaufspannung eines Solarmoduls bei $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ungefähr 13 % höher ist als die im Datenblatt aufgeführte Leerlaufspannung. Diese Information ist von Interesse für den, der z. B. einen neuen Wechselrichter benötigt oder überprüfen möchte, ob z. B. der Wechselrichter auch richtig dimensioniert wurde.

Aufmerksamkeit verdient die Leerlaufspannung auch beim solarelektrischen Laden von Akkus, denn

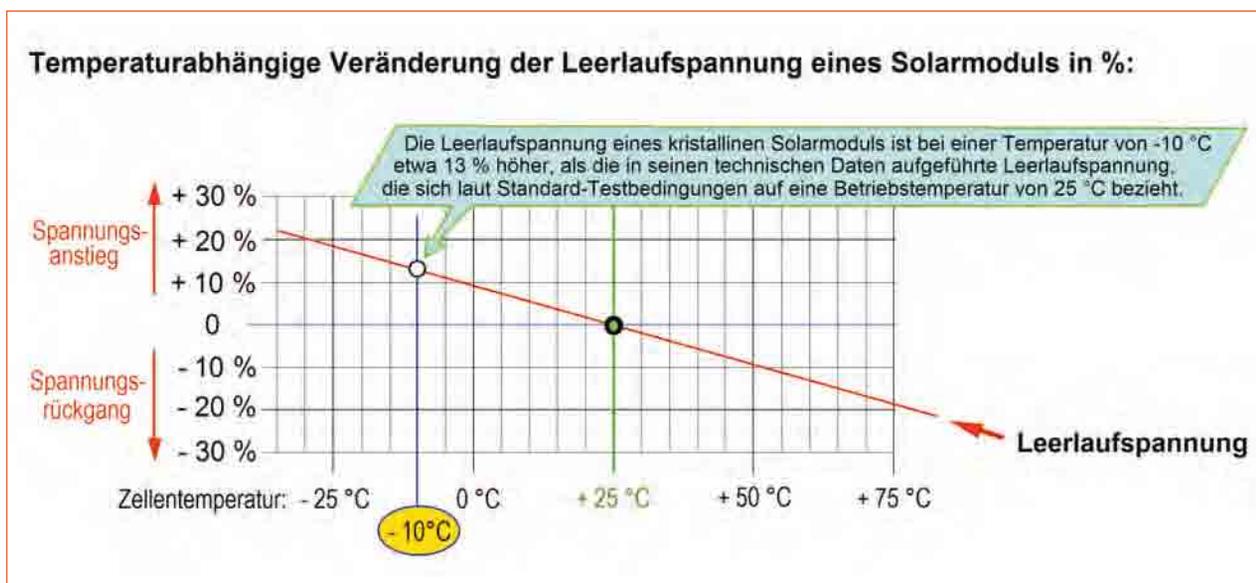


Abb. 7.10 – Ähnlich wie die Nennleistung und die Nennspannung hängt auch die Leerlaufspannung eines kristallinen Solarmoduls von der jeweiligen Zelltemperatur ab.

7.3 Die Leerlaufspannung eines Solarmoduls

hier wird der volle Nennstrom des Solarmoduls nicht während des ganzen Ladevorgangs, sondern nur am Anfang des Ladens (solange der Akku weitgehend leer ist) benötigt. Nachdem der Akku teilweise nachgeladen ist und seine Spannung steigt, nimmt der Ladestrom gleitend ab, das Solarmodul wird dadurch immer weniger belastet und seine Spannung steigt dabei in Richtung seiner Leerlaufspannung.

Diese Funktionsweise hat einen wichtigen praktischen Vorteil: Wenn das Solarmodul nur wenig belastet ist, kann es auch an einem

trüben Tag immer noch eine recht hohe Spannung liefern, wenn die Stromabnahme niedrig ist.

Fazit

Sowohl die Nennspannung als auch die Leerlaufspannung einer Solarzelle oder eines Solarmoduls beschreiben nur anwendungsbezogene Grenzwerte. Die Spannung eines voll belasteten Solarmoduls kann sich nur zwischen Null und der Nennspannung bewegen. Die Spannung eines nicht voll belasteten Solarmoduls kann sich dagegen zwischen Null und der Leerlaufspannung bewegen. Genau genommen kann sie allerdings nur bis in die unmittelbare Nähe der Leerlaufspannung ansteigen, denn die eigentliche „exakte“ Leerlaufspannung wird nur bei absolutem Leerlauf erreicht.



Abb. 7.11 – Nicht vergessen: Vor jeder Arbeit an den spannungsleitenden Teilen einer Photovoltaikanlage sollte aus Sicherheitsgründen die Stromverbindung der Module unterbrochen werden.

8 Wechselrichter für netzgekoppelte Systeme

Folgend geht es um die Funktionsweise und Eigenheiten der Wechselrichter.

Die Funktionsweise eines Wechselrichters für netzgekoppelte Systeme (Abb. 8.1) hat viel Ähnlichkeit mit der Funktionsweise eines einfachen Camping- oder PKW-Wechselrichters: Der Wechselrichter muss hier eine Gleichspannung in eine Wechselspannung umwandeln



Abb. 8.1 – Ausführungsbeispiel eines Kaco-Wechselrichters für netzgekoppelte Systeme.

8 Wechselrichter für netzgekoppelte Systeme

können. Es gibt z. B. viele kleinere Wechselrichter, die eine 12-Volt-Gleichspannung in 230-Volt-Wechselspannung umwandeln können (Abb. 8.2).

Das Gleiche muss vom Prinzip her ein Wechselrichter für netzgekoppelte Systeme können. Er muss aber zudem noch fähig sein, eine sinusförmige netzidentische Wechselspannung zu erzeugen und diese ins öffentliche Netz synchron einzuspeisen. Dies gilt jedoch nicht für Wechselrichter, die nur für netzunabhängige Inselanlagen angewendet werden: Hier genügen unter Umständen auch die einfachsten PKW-Wechselrichter, deren Leistung auf die Abnahmeleistung der vorgesehenen Verbraucher abgestimmt ist, die für 230 Volt~ ausgelegt sind. Je nachdem, welche 230-Volt-Verbraucher an den Wechselrichter angeschlossen werden,

sind die Ansprüche an die vom Wechselrichter gelieferte Wechselspannung entweder nur gering oder sehr hoch (siehe hierzu Kapitel 9).

Die gegenwärtigen Wechselrichtersysteme für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen können nach Abb. 8.3 in Hinsicht auf die Art der Eingänge und Stranganschlüsse (eng. *Strings*) in vier Gruppen eingeteilt werden:

- a) **Wechselrichter mit einem gemeinsamen Eingang (Zentralwechselrichter)**
- b) **String-Wechselrichter**
- c) **Multi-String-Wechselrichter**
- d) **Modulintegrierte Wechselrichter**



Abb. 8.2 – Kleinere Wechselrichter für Anwendungen in PKW- und Campingfahrzeugen sowie für die Umwandlung der Solarakku-Gleichspannung in eine netzidentische 230-Volt-Wechselspannung sind preiswert und die Auswahl ist groß. (Fotos/Anbieter: Conrad Electronic und Reichelt Elektronik)

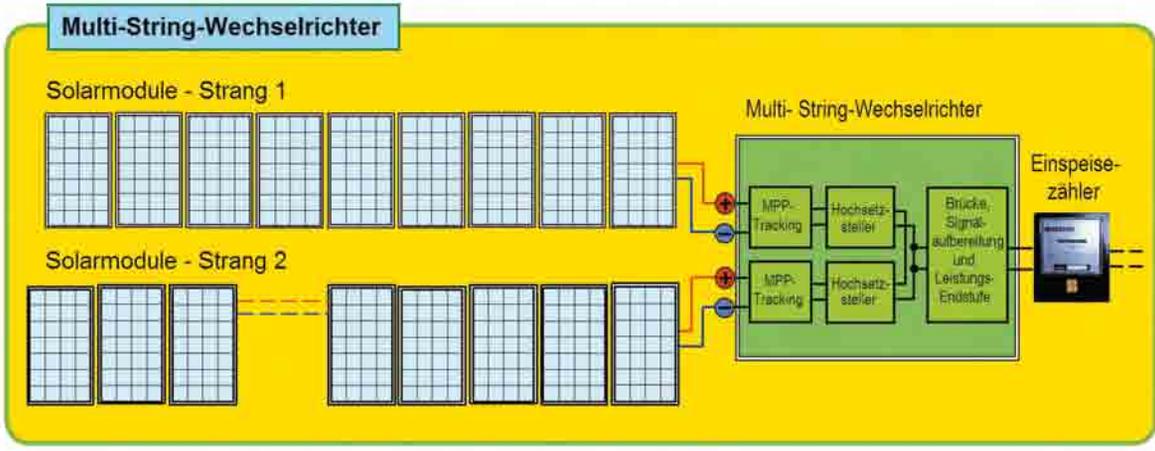
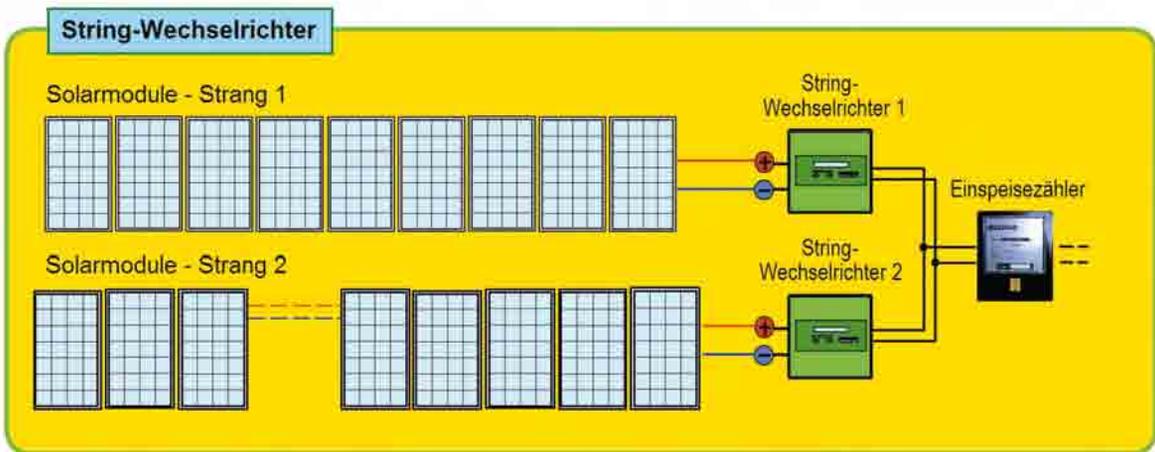
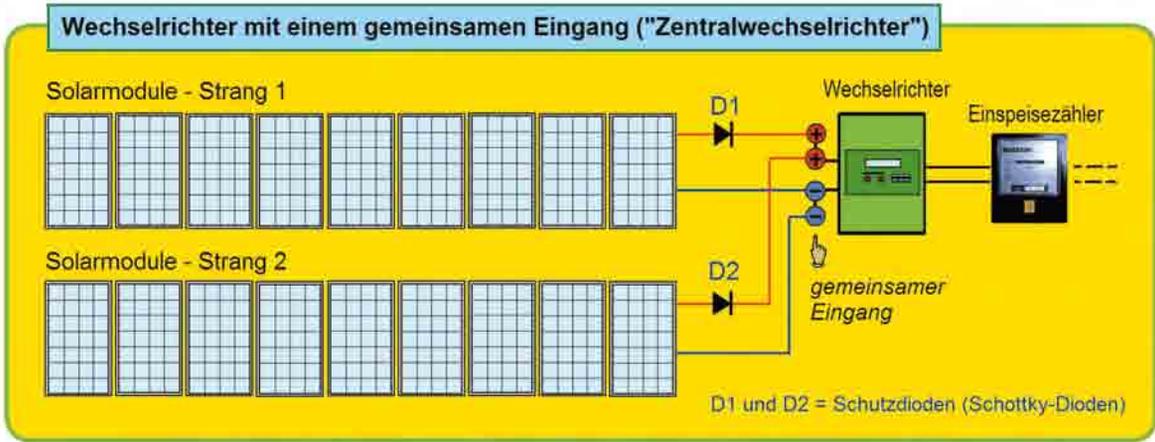


Abb. 8.3 – Drei Wechselrichter-Grundkonzepte in Hinsicht auf die Art der Anschlussmöglichkeiten.

8.1 Wechselrichter mit einem gemeinsamen Eingang (Zentralwechselrichter)

Die herkömmlichen Wechselrichter wurden ursprünglich für einen gemeinsamen Eingang ausgelegt. Die einzelnen Modulstränge wurden – oder werden noch immer – nach Abb. 8.3a einfach über zusätzliche Schutzdioden (Schottky-Dioden) parallel an gemeinsame Anschlussklemmen des Wechselrichtereingangs angeschlossen. Dabei kann es sich unter Umständen um separat angeordnete (also nicht ausgesprochen „gemeinsame“) Klemmen oder Stecker handeln, die z. B. nach Abb. 8.4 als getrennte Stecker am Gerät angebracht, aber intern leitend verbunden sind.

Der Nachteil dieser Konzeptlösung ist, dass sie eigentlich nur dann optimal funktioniert, wenn zwei oder mehrere parallel angeschlossene Modulstränge voll identische Spannungen und Leistungen liefern. Abweichungen in der Anpassung der Stränge oder Teilbeschattung einiger Stränge verringern den Energieertrag dadurch, dass bei dem Strang (oder den Strängen) mit einer niedrigeren Spannung der Wechselrichter nicht ihre zur Verfügung stehende tatsächliche Leistung ins Netz einspeist. Ein Teil dieser Leistung bleibt dann quasi ungenutzt. Wie groß dieser ungenutzte Teil tatsächlich ist, hängt vor allem von dem Spannungsunterschied zwischen einzelnen Modulsträngen ab. Je grö-

ßer dieser ist, desto höher sind die Leistungsverluste, die in der technischen Terminologie als *Anpassungsverluste* bezeichnet werden.

Vier-Strang-Wechselrichter



Vier separate Wechselrichter-Eingänge verraten als solche nichts über die Art der internen Bearbeitung der Solarenergie einzelner Modul-Stränge

Beachten Sie

Wenn in den technischen Unterlagen eines Wechselrichters z. B. „maximale Stringanzahl (parallel): 3“ steht, bezieht es sich nur darauf, dass dieser Wechselrichter eingangsseitig für drei Parallelanschlüsse (nach dem Beispiel aus Abb. 8.3a/8.4) ausgelegt ist. Alle ihm zugeführte Solarleistungen werden jedoch bei einem *Zentralwechselrichter* gemeinsam bearbeitet.

Abb. 8.4 – Wechselrichter mit gemeinsamem Eingang sind oft mit mehreren Steckverbindungen versehen, die jedoch an der Rückseite der Stecker jeweils leitend miteinander verbunden sind.

8.2 String-Wechselrichter

Die vorher angesprochenen Nachteile der Wechselrichter mit einem gemeinsamen Eingang entfallen bei der Anwendung von String-Wechselrichtern. Hier verarbeitet jeder Wechselrichter (nach Abb. 8.3b und 8.5) unabhängig die Solarenergie seines Modulstrangs optimal. Technisch heißt es, dass hier jeder Strang im eigenen *Maximum-Power-Point (MPP)* betrieben wird. Die Modulstränge dürfen dabei unterschiedlich lang sein und unterschiedliche Parameter (Nennspannung, Nennleistung und Nennstrom) aufweisen. Gelegentliche Beschattung eines der Stränge oder eines ihrer Module oder Defekte in Modulen, die von Bypass-Dioden abgefangen werden, verringern den Energieertrag nur im mathematisch gerechtfertigten Umfang, der sich z. B. auf den tatsächlichen Energieverlust in einer defekten Modulektion bezieht.

Die Anzahl der Modulstränge sowie auch die Anzahl der String-Wechselrichter pro Photovoltaikanlage sind praktisch uneingeschränkt. Die einzelnen String-

Wechselrichter dürfen dabei für unterschiedliche Leistungen und PV-Spannungsbereiche ausgelegt sein, denn ausgangsseitig müssen sie sowieso eine exakt netz- und damit auch phasenidentische Wechselspannung an den Eingang des Netzeinspeise-Stromzählers liefern. String-Wechselrichter werden ausgangsseitig parallel miteinander verbunden und an den Netzeinspeise-Stromzähler angeschlossen. Mehrere einzelne String-Wechselrichter sind allerdings teurer als ein einziger Wechselrichter mit zwei oder auch mehreren parallelen Eingängen. Sie sind dennoch vor allem dann unerlässlich, wenn die einzelnen Modulstränge der Photovoltaikanlage unterschiedlich ausgerichtet sind, wodurch das Leistungsangebot zueinander zeitlich versetzt ist. Hier gäbe es bei Anwendung eines Wechselrichters mit gemeinsamem „Paralleleingang“ viel zu große Energieverluste. String-Wechselrichter sind wahlweise auch als modulintegrierte Wechselrichter erhältlich.

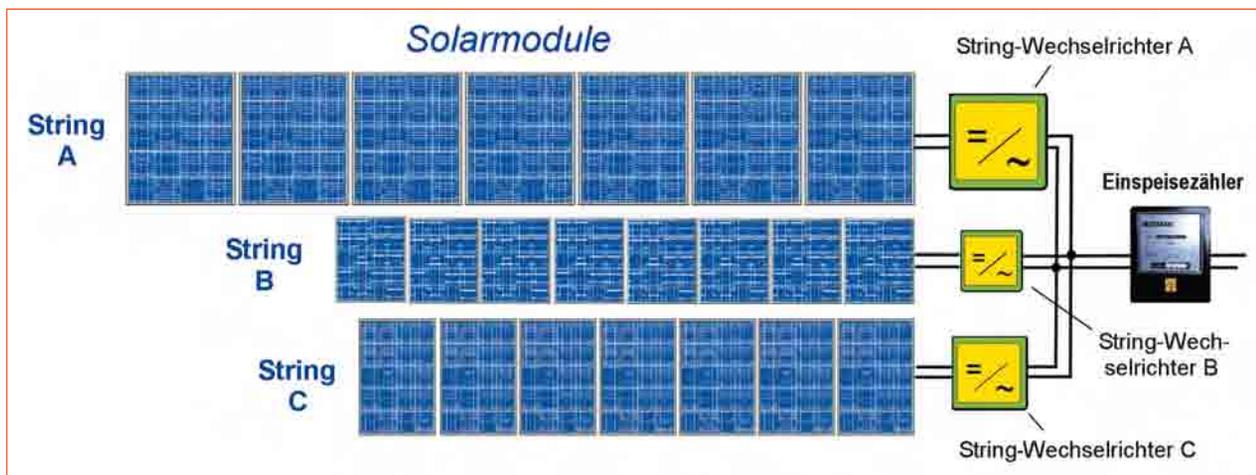


Abb. 8.5 – Eine Photovoltaik-Anlage kann sich bei Bedarf aus einer beliebigen Anzahl von unterschiedlich großen bzw. langen Solar-Strängen (Strings) sowie auch unterschiedlich großen String-Wechselrichtern zusammensetzen. Die angewendeten Wechselrichter müssen jedoch auf ihre „Strings“ exakt abgestimmt sein.

8.3 Multi-String-Wechselrichter

Wie Abb. 8.6 zeigt, verfügt ein Multi-String-Wechselrichter eingangsseitig über separate Eingänge, in denen die jedem Modulstrang gelieferte Solarenergie separat aufbereitet wird, damit Fehlanpassungen vermieden werden. Ein gemeinsamer „Leistungsteil“, der aus Brücke und Signalaufbereitung besteht, fügt dann die ihm gelieferten Solarenergien zusammen und speist sie ins öffentliche Netz ein.

Nach außen wirkt ein Multi-String-Wechselrichter ähnlich wie mehrere einzelne String-Wechselrichter und ist, durch den gemeinsamen Leistungsteil, eine kostengünstigere Alternative in der String-Technik. Die Anzahl der separaten Eingänge liegt oft zwischen zwei

und vier, kann jedoch bei einigen dieser Geräte auch nach Abb. 8.6 aus einer Kombination von „echten“ Multistring-Eingängen und parallelen Eingängen bestehen, die als gemeinsame Eingänge eines *Zentralwechselrichters* ausgelegt sind. An den in Abb. 8.6 unten eingezeichneten Doppelanschluss dürfen nur zwei völlig identische Modulstränge über Schottky-Dioden angeschlossen werden. Schottky-Dioden sind Spezialdioden, an denen (typenbezogen) nur ein geringer Spannungsverlust (von ca. 0,28 bis 0,3 Volt) entsteht. Dadurch verringert sich auch der Leistungsverlust, der an diesen Dioden als Solarstrom \times Verlustspannung an der Diode entsteht.

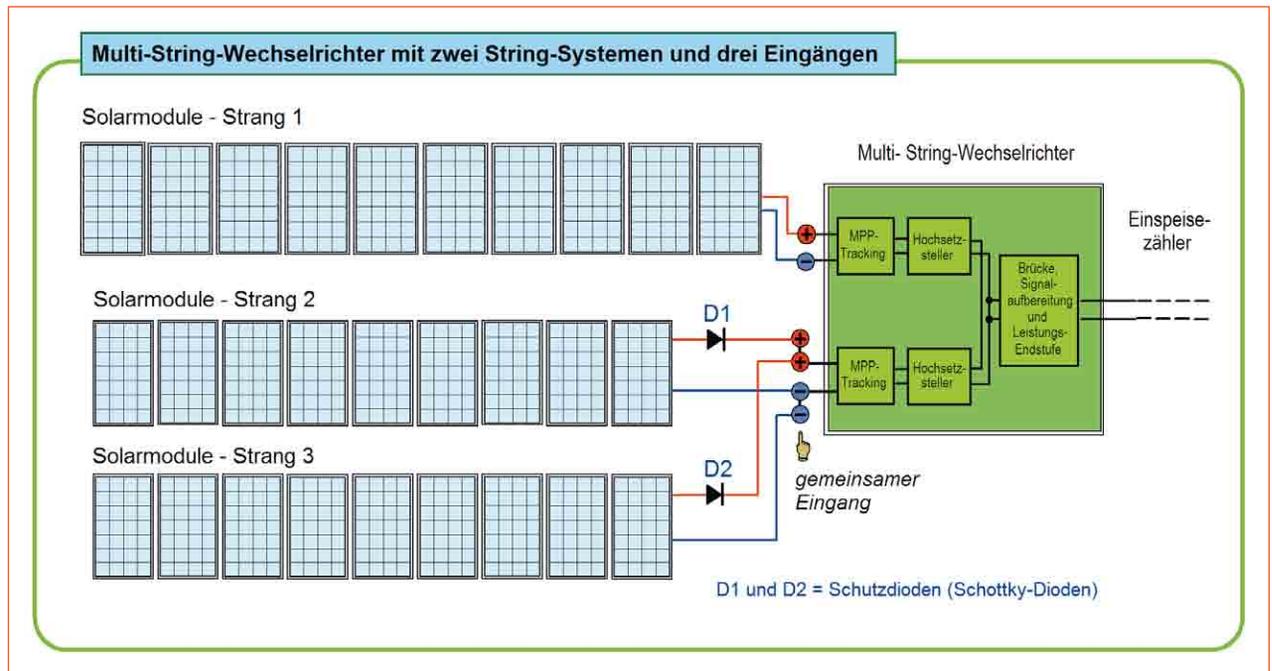


Abb. 8.6 – Anschlussbeispiel eines Multi-String-Wechselrichters, bei dem einer seiner drei Photovoltaikeingänge nur als ein Parallelanschluss ausgelegt ist.

8.4 Modulintegrierte Wechselrichter

Modulintegrierte Wechselrichter unterscheiden sich von String-Wechselrichtern nur dadurch, dass sie für einzelne Wechselrichter ausgelegt sind. Jedes Solarmodul erhält nach Abb. 8.7 einen eigenen Wechselrichter. Auf diese Weise wird verhindert, dass Anpassungsverluste auftreten, die z. B. bei Solarmodulen mit einer Toleranz von $\pm 10\%$ unvermeidbar sind – und bei denen theoretisch auch tatsächlich Anpassungsverluste von bis zu etwa 10% entstehen können. Wenn jedes Solarmodul über einen eigenen modulintegrierten Wechselrichter verfügt, verringern sich die Anpassungsverluste, wie das Beispiel in Abb. 8.7 verdeutlicht: Die maximal erzielbare Solarleistung beträgt bei dem oberen Beispiel rein rechnerisch nur 952 Watt , bei dem unten aufgeführten Beispiel eines Konzeptes mit sieben selbstständigen Modulwechselrichtern beträgt die maximal erzielbare Solarleistung immerhin ca. 1011 Watt (exakt $1011,5\text{ W}$). Das sind ca. 6% mehr!

Der Nachteil dieser Wechselrichter besteht darin, dass sie an einer solarelektrischen Dachanlage meistens sehr schwer zugänglich sind, wodurch eventuelle Reparaturen zu einem ziemlich kostspieligen Anliegen werden. Zudem sind die Preise der handelsüblichen modulintegrierten Wechselrichter noch viel zu hoch und der Wirkungsgrad ist nicht gerade umwerfend. Das könnte sich jedoch ändern, wenn z. B. die Herstellung in Ländern mit günstigen Löhnen, niedrigen Lebenshaltungskosten und vorteilhafter Währung stattfinden würde.

Ausgehend von der extrem kostengünstigen Entwicklung und Herstellung von z. B. Fernsehern, PCs oder Solar-Taschenrechnern könnte z. B. ein 200-Watt kristallines Solarmodul mit einem perfekt funktionie-

renden „modulintegrierten“ Wechselrichter weniger als ca. 15% dessen Kosten, was momentan noch ein „kahles“ 200-Watt -Solarmodul derselben Ausführung „made in Germany“ kostet. Vorausgesetzt, die Importeure und Zwischenhändler würden sich dabei mit denselben Rabatten zufrieden geben, wie z. B. bei den Solar-Taschenrechnern, die bei uns die „Endkunden“ schon ab etwa 2 Euro kaufen können. Würde ein solcher Taschenrechner samt allem Zubehör (Tastatur, Display, integrierte Schaltung, Solarzelle, Gehäuse usw.) in Westeuropa entwickelt und hergestellt, wäre es kaum machbar, seinen Ladenpreis unterhalb von etwa 40 Euro zu drücken. Aus dieser Sicht ist es daher denkbar, dass in Zukunft die Preisentwicklung der solarelektrischen Bausteine einen ähnlichen Verlauf nimmt, wie wir es z. B. von den Radio- und Fernsehgeräten, PCs, Waschmaschinen und diversen anderen Gütern kennen, die in Asien oder Indien etwas „eher an der Reihe“ waren.

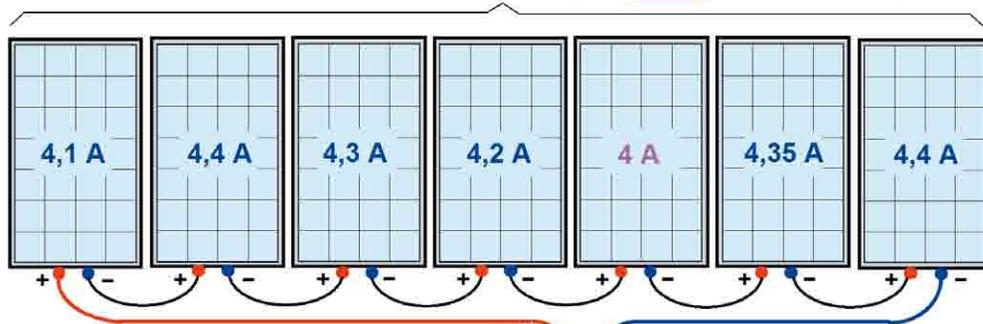
Der große Vorteil der modulintegrierten Wechselrichter besteht darin, dass dann die einzelnen Solarmodule auch von unerfahrenen Anwendern im Prinzip ähnlich einfach installiert werden könnten wie z. B. eine Reihe von nebeneinanderstehenden Kühlschränken. Der Anwender müsste sich dabei mit keiner Anpassung der Parameter auseinandersetzen, sondern nur die Kabel anschließen. Es wäre auch technisch leicht machbar, die modulintegrierten Wechselrichter so zu konzipieren, dass die Stromeinspeisung ins öffentliche Netz schon dann stattfindet, sobald die Solarspannung etwa $5\text{ bis }10\%$ des maximalen Wertes erreicht. Das ist momentan nur noch eine ähnliche „Utopie“, wie es z. B. vor 10 Jahren eine PC-Taktfrequenz von mehr als 1 GHz war.

Module an einem gemeinsamen Wechselrichter

Solarmodule à 34 V / 4,4 A / 150 W, Toleranz $\pm 10\%$

Nennspannung des Stranges: 238 V (34 V x 7 Module)

Theoretische max. Nennleistung des Stranges: 1050 W (150 W x 7 Module)

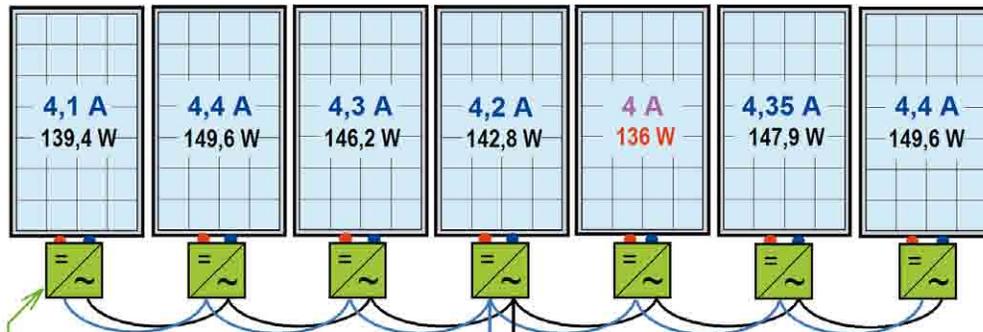


Max. Ausgangs-Solarstrom - nach dem Prinzip
des schwächsten Gliedes einer Kette: 4 A
Tatsächlich erzielbare max. Leistung
aller Solarmodule: 952 W (238 V x 4 A)

Wechselrichter

230 V ~
zum Einspeisezähler

Dieselben Module mit modulintegrierten Wechselrichtern



modulintegrierte
Wechselrichter

Tatsächlich erzielbare max. Leistung
aller Solarmodule: 1011 W

230 V ~
zum Einspeisezähler

Abb. 8.7 – Vergleichsbeispiel zwischen einer Photovoltaikanlage mit einem gemeinsamen Wechselrichter und einer Anlage mit (sieben) modulintegrierten Wechselrichtern.

8.5 Welcher Wechselrichter ist der beste?

Ein guter Wechselrichter müsste imstande sein, auch geringste Solarleistungen ins öffentliche Netz einzuspeisen. Sein Eigenverbrauch sollte dabei gering sein (er müsste einen hohen Wirkungsgrad haben). Solche Wechselrichter gibt es aber noch nicht – zumindest nicht in wünschenswerter Qualität.

Die meisten Wechselrichter (und damit die noch stromerzeugende Photovoltaikanlage) schalten sich viel zu spät ans Netz ein und viel zu früh vom Netz ab. Hier wird die weiterhin erzeugte Energie „verschenkt“. Von dem erzeugten solarelektrischen Strom wird vom Wechselrichter einfach ein Teil ignoriert und nicht verkauft.

Bei Wechselrichtern handelt es sich nicht um Massenware, sondern um Erzeugnisse, die in kleineren Serien hergestellt werden – was hohe Herstellungs- und Verkaufskosten mit sich bringt. Dem Kunden bleibt daher vorerst nichts anderes übrig, als einfach Ausschau nach dem bestmöglichen Wechselrichter zu halten und dabei Kompromisse in Kauf zu nehmen, die nach seinem Ermessen die optimale Schnittstelle zwischen folgenden Eigenschaften bilden:

- Möglichst breiter Eingangsspannungsbereich (PV-Spannungsbereich)
- Hoher Wirkungsgrad (bezogen auf einen breiteren Spannungsbereich)
- Selektive Anpassungsmöglichkeit pro Modulstrang
- Niedriger Stand-by-Verbrauch
- Ausreichende Kühlung (damit sich der Wechselrichter nicht an heißen Sommertagen automatisch vom Netz abschaltet)
- Angemessene maximale Leistung (eine um mehr als ca. 1/3 überhöhte Leistung verteuert unter Umständen unnötig das Gerät)
- Angemessener maximaler Eingangsstrom (auch hier reicht eine Reserve von ca. 1/3 aus Kostengründen aus)
- Zumutbarer Preis

Bei einigen Wechselrichtern ist noch darauf zu achten, ob die untere Schwelle des im Prospekt angegebenen Eingangsspannungsbereichs auch tatsächlich mit der Einschaltschwelle konform ist oder ob sie sich nur auf die Abschaltchwelle bezieht.

Darunter ist Folgendes zu verstehen: Es gibt Wechselrichter, deren *PV-Spannungsbereich* z. B. als 80 bis 250 Volt angegeben ist, die aber erst dann anfangen, ins Netz einzuspeisen, wenn die Solarspannung auf 110 Volt gestiegen ist, und erst dann abschalten, wenn die Solarspannung auf 80 Volt sinkt. Eine solche Eigenschaft kann sich vor allem während der Wintermonate aus folgenden Gründen als nachteilig erweisen: Wenn die Solarmodule leicht verschneit oder mit einer dünnen Eisschicht bedeckt sind, die Sonne dann scheint und der Wechselrichter dabei von den Solarmodulen eine Spannung erhält, die er ins öffentliche Netz einspeist, erwärmen sich die Solarzellen und Schnee oder Eis tauen ab. Die Module erhalten dadurch mehr Sonnenlicht (oder auch nur mehr diffuses Licht) und erzeugen auch unter solchen ungünstigeren Umständen Strom, der ins öffentliche Netz eingespeist wird.

Ist dagegen der Wechselrichter nicht fähig, auch relativ niedrige Solarspannungen ins Netz einzuspeisen, hält er unter den erwähnten Umständen weiterhin seinen „Winterschlaf“. Auch wenn tagsüber die Sonne einige Stunden lang kräftig scheint, erzeugen die vom Schnee bedeckten (beschatteten) Solarzellen nur eine zu geringe Spannung, um den Wechselrichter aktivieren zu können, und die Anlage hält als Ganzes ihren Winterschlaf.

8.6 Konzeptlösungen bei aufwendigeren Anlagen

Unter den Begriff „aufwendigere Anlage“ dürfte eine jede Photovoltaikanlage fallen, die aus mehreren Solarmodulsträngen besteht. Wird so eine Anlage gleich beim ersten Planungsschritt entworfen, ist es zwar sinnvoll, aber keinesfalls technisch erforderlich, dass eine einheitliche Konzeptlösung angestrebt wird. In der Praxis werden manche Photovoltaikanlagen erst etwas kleiner konzipiert und einige Jahre später noch erweitert: Es kommen neue Solarmodule oder Modulstränge dazu, und wenn es erforderlich wird, ist auch ein weiterer Wechselrichter fällig.

Das Wichtigste bei der Planung einer aufwendigeren Anlage ist, dass die einzelnen Solarmodul-Stränge möglichst perfekt an die verwendeten Wechselrichter angepasst werden. Obwohl diese technisch begründete Bedingung als eine Selbstverständlichkeit betrachtet werden müsste, wird in der Praxis gerade bei dieser so wichtigen Anpassung schwer gesündigt. Ein Teil der Schuld dürfte dabei den Wechselrichter-Herstellern zugewiesen werden, die es bis heute nicht fertig gebracht haben, ihre Geräte so zu konzipieren, dass sie die von den Solarmodulen gelieferte Solarenergie in einem soliden Umfang ins öffentliche Netz einspeisen. Es ist zwar nur eine Frage der Zeit, wann dies gelingt. Aus technischer Sicht steht dem aber nichts im Wege, denn machbar war es schon vor etlichen Jahrzehnten und die Techniken stehen zur Verfügung.

Bei der Planung einer Photovoltaik-Anlage ist es gegenwärtig immer noch sehr schwer, einigermaßen passende Wechselrichter aufzuspüren, die die vorgesehene Aufgabe wenigstens „dürftig“ bewältigen. Gerade bei aufwendigeren Photovoltaikanlagen geht zu viel Solar-

energie dadurch verloren, dass bei einem etwas schwächeren Tageslicht der Solargenerator zwar Solarspannung und Solarleistung an den Wechselrichter-Eingang liefert, aber dieser speist sie nicht ins öffentliche Netz ein.

Der Planer einer Photovoltaikanlage hat es dann wirklich schwer, unter dem zur Verfügung stehenden Angebot an Wechselrichtern ein wirklich passendes Gerät ausfindig zu machen: Neben dem optimal passenden Eingangsspannungs-Bereich müssen auch der Eingangsstrom, die Leistung und der Wirkungsgrad des Wechselrichters mitberücksichtigt werden. Dies geht leider nur selten ohne Zugeständnisse. Vorerst.

Es bleibt im persönlichen Ermessen des Errichters, wie er ein solches Projekt gestaltet und welche Komponenten er dazu verwendet. Ein praktisches Beispiel zeigt Abb. 8.8: Ursprünglich wurde eine kleinere Solarzellenfläche (Foto rechts oben) installiert, die aus zwei Modulsträngen und zwei String-Wechselrichtern besteht. Einige Jahre später ist noch eine größere Solarzellenfläche dazugekommen (Foto links oben), die aus acht Modulsträngen besteht und von zwei Zentralwechselrichtern mit je vier Eingängen Gebrauch macht. Alle vier Wechselrichter sind ausgangsseitig parallel verschaltet und an den Einspeisestromzähler angeschlossen.

In technischen Zeichnungen werden Photovoltaikanlagen nach dem Beispiel aus Abb. 8.8 mithilfe von Schaltzeichen schematisch dargestellt. Das erleichtert vor allem bei aufwendigeren Anlagen die Übersicht und verdeutlicht auch die Anordnung der Solarmodulstränge (PV-Strings) oder einzelner Solarmodule (PV-Module).

8.6 Konzeptlösungen bei aufwendigeren Anlagen

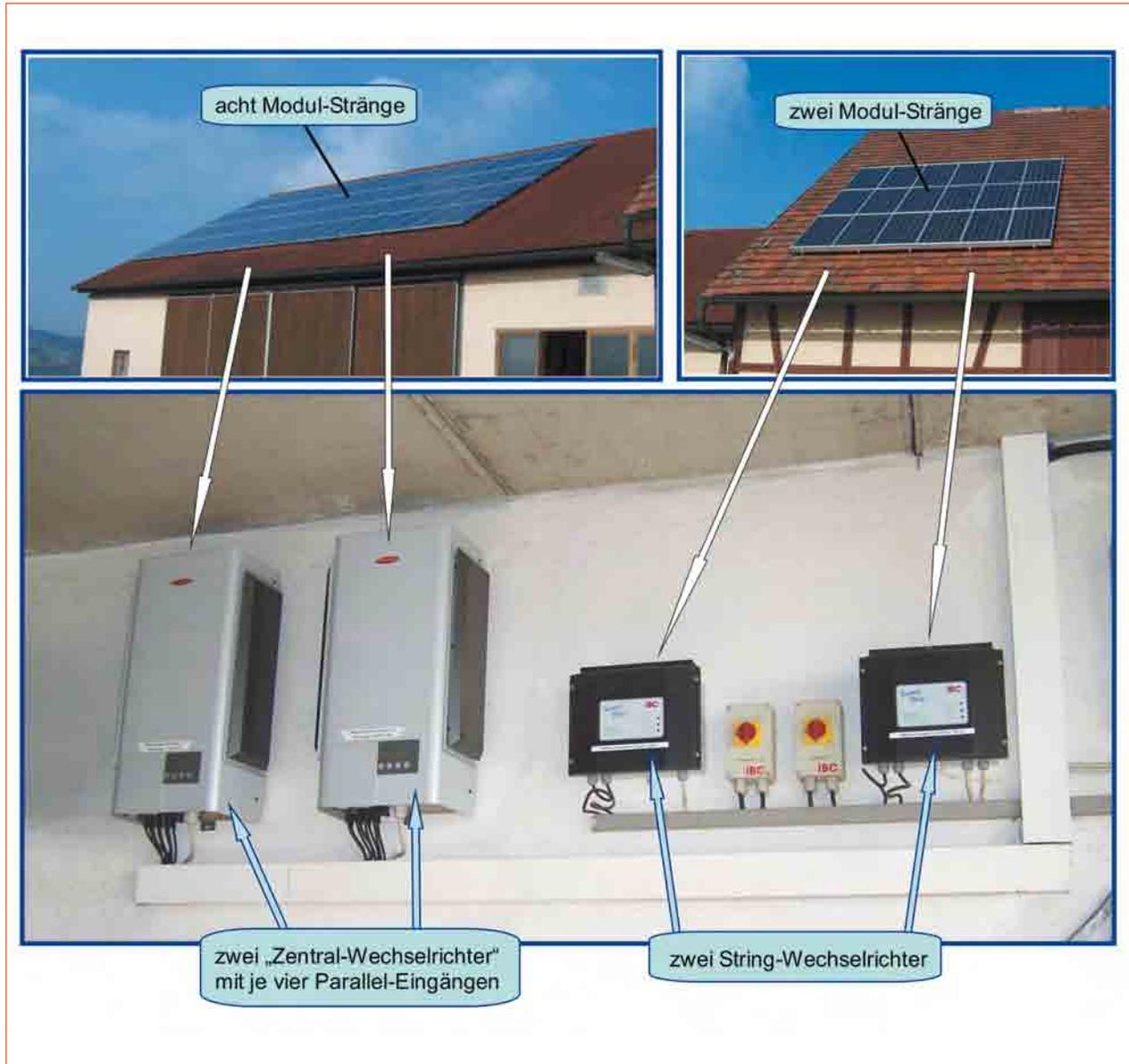
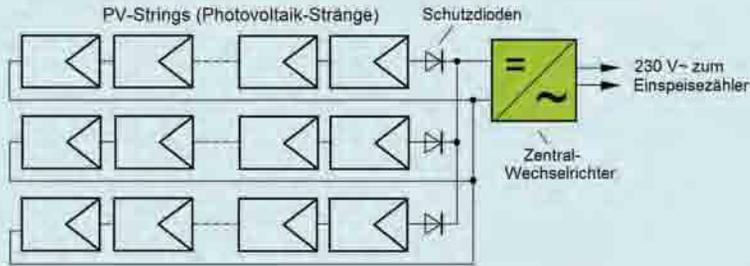
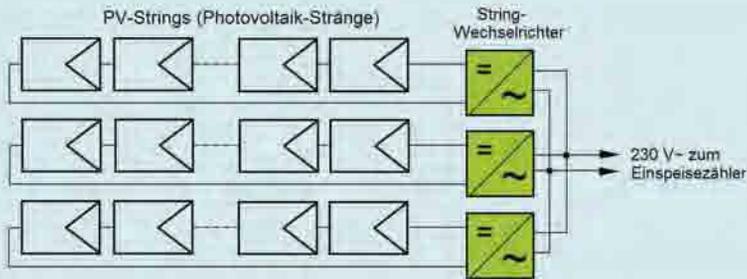


Abb. 8.8 – Beispiel einer aufwendigeren Photovoltaikanlage, die mit zehn Modulsträngen ausgelegt ist (Anlagen-Betreiber/Errichter: Reiner Wiegner, Rothenburg o. d. Tauber).

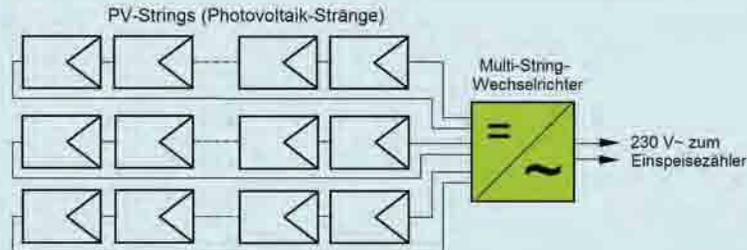
Solarmodule an einem gemeinsamen Wechselrichter



Solarmodule mit String-Wechselrichtern



Solarmodule mit einem Multi-String-Wechselrichter



Solarmodule mit Modul-Wechselrichtern

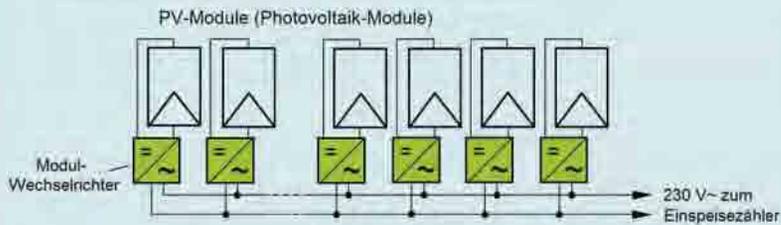


Abb. 8.9 – Schematische Darstellung von Photovoltaikanlagen, die nach den Prinzipien aus den Kapiteln 8.2 bis 8.4 ausgelegt sind.

Bo Hanus

Photovoltaikanlagen optimieren

30% mehr Gewinn

Arbeitet Ihre Photovoltaikanlage optimal? Erzielen Sie mit Ihrer Solaranlage den vollen Ertrag? Worauf müssen Sie bei Planung und Installation achten? Wie finden Sie Fehler und Defekte?

In diesem Buch beantworten wir Ihnen diese Fragen und steigern somit den Ertrag Ihrer Solaranlage. Sie finden Schwachstellen an Solarmodulen und Wechselrichtern und erfahren, wie Sie einen „Check-up“ Ihrer Anlage selbst durchführen können.

Dieser Praxisratgeber zeigt Ihnen anhand vieler anschaulicher Beispiele, wie Sie Probleme mit Ihrer Solaranlage in den Griff bekommen.

Aus dem Inhalt

- Arbeitet meine Photovoltaikanlage optimal?
- Fehlfunktionen der Solaranlage
- Defekte finden und beheben
- Verluste in den Solarstromleitungen beseitigen
- So erzielen Sie den vollen Ertrag mit Ihrer Photovoltaikanlage

Zum Autor

Bo Hanus zählt zu den erfahrensten Autoren von „DO-IT“-Büchern. Mit seinen über 40 Ratgebern zu den verschiedensten Themen hat er wohl manchem aus der sprichwörtlichen Patsche geholfen.

In diesem Buch erfahren Sie, ob Ihre bereits betriebene Photovoltaikanlage optimal arbeitet und Sie den vollen Ertrag erzielen.

Wie Sie viele der beschriebenen Fehler bereits bei einer fachgerechten Planung und Installation Ihrer Anlage vermeiden können, zeigt Ihnen der Autor anhand diverser Abbildungen und Zeichnungen praxisnah. Wenn Sie bereits im Vorfeld auf die optimale Kombination aus Wechselrichter und Solarmodul achten, bekommen Sie viele der beschriebenen Probleme in den Griff.

Was gibt es zu beachten, wie können Sie einen „Check-up“ an Ihrer Anlage selbst durchführen, und wie gelingt es, gute und sinnvolle Lösungen zu finden?

Nach dem Studium dieses Buchs können Sie viele Fehler an Ihrer Anlage finden und beheben.

Leicht gemacht, Geld und Ärger gespart!

Besuchen Sie uns im Internet: www.franzis.de

EUR 14,95 [D]

ISBN 978-3-7723-4407-7



9 783772 344077