

Die geglückte Beziehung

Die optimale Auslegung einer netzgekoppelten PV-Anlage steht vor der Frage, wie viele Module eines gewählten Typs unter konkreten Bedingungen auf den ausgewählten Wechselrichter verschaltet werden können. Es geht um das so genannte Auslegungsverhältnis, also die Leistungsrelation von Modulen und Wechselrichtern. Welches Verhältnis verspricht dauerhaft guten Ertrag?

Solarmodule erzeugen elektrischen Gleichstrom, und der Wechselrichter hat die Aufgabe, ihn möglichst effizient in netzkonformen Wechselstrom umzuwandeln. Vorzugsweise wird der Solarstrom dann in das Verteilnetz eingespeist, seit diesem Jahr aber kann er auch mit Vergütung

direkt vom Anlagenbetreiber verbraucht werden. Die Menge des eingespeisten Solarstroms hängt von vielen standort- und projektspezifischen Faktoren sowie den Komponenteneigenschaften ab.

Die Einstrahlungswerte können sich in Mitteleuropa je nach Wetterlage im Tages-

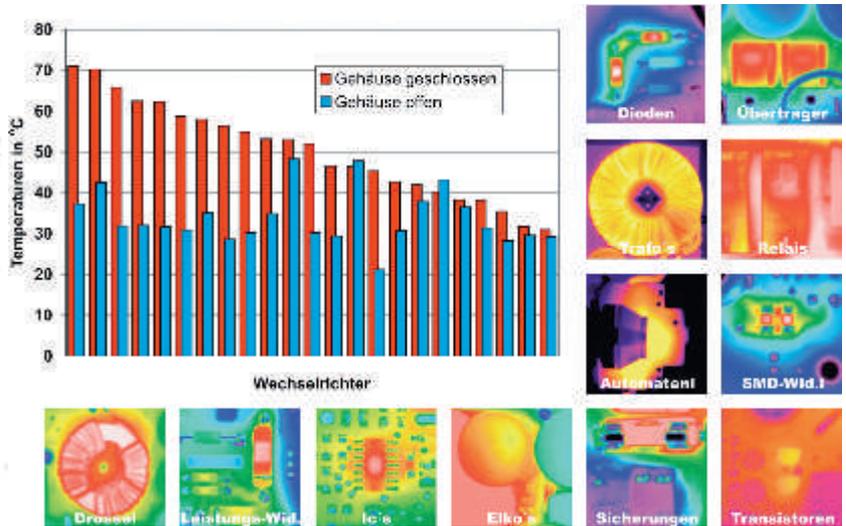
verlauf stark ändern. Mitunter sogar ziemlich plötzlich, wenn beispielsweise Wolken am Himmel vorbeiziehen. Ob schwache Einstrahlungsverhältnisse oder starke, ob konstantes oder wechselhaftes Wetter, die Wechselrichter passen sich jeder Änderung an und weisen je nach Hersteller und Gerät stets einen hohen bis sehr hohen Wirkungsgrad auf. Nur in einer Beziehung ist jedem Wechselrichter eine Grenze gesetzt: Er regelt ab, wenn aufgrund der Einstrahlung und der Größe des Solargenerators die angebotene Leistung das Maximum dessen, was der Wechselrichter übertragen kann, übersteigt. Es gibt also für jeden Wechselrichter eine technische Obergrenze, eine maximale Leistung, die von den Herstellern für jedes Gerät angegeben wird. Auf den Datenblättern finden sich Angaben zur gleichstrom-



auf die der Wechselrichter für den Dauerbetrieb unter normierten Umgebungsbedingungen ausgelegt ist, um die wechselstromseitige Nennleistung ($P_{WR-AC-Nenn}$) ohne Abregelung abzugeben. Normumgebungsbedingungen bedeuten $25\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$) Umgebungstemperatur und Nennspannungsverhältnisse am Wechselrichter. Die maximale AC-Leistung ($P_{WR-AC-max}$) ist wiederum die Leistung, die der Wechselrichter kurzfristig und bei $40\text{ }^\circ\text{C}$ Umgebungstemperatur maximal abgeben kann. Der Begriff 'kurzfristig' ist nicht festgelegt, dürfte aber in Anlehnung an ein VDN-Merkblatt zur VDEW-Richtlinie „Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“ 10 Minuten betragen

lässige PV-Leistung angeschlossen wurde, häufig im Überlastbereich arbeiten und damit auch nennenswerte Anteile der zur Verfügung stehenden Einstrahlung abgeregelt werden müssen.

Bei einigen Wechselrichtern liegen die Nennleistungen etwa 10 % unter den Maximalleistungen. Diese Wechselrichter können, nur unter gewissen Bedingungen, bis zu 10 % mehr Generatorleistung aufnehmen, das heißt mit etwa 10 % mehr Leistung ins Netz einspeisen als im Nennbetrieb. Aus guten Wechselrichterdatenblättern ist ersichtlich, wie lange die Maximalleistung abgegeben werden kann. Auch die Umgebungsbedingungen, unter denen die Maximalleistung



Grafik 1: Thermographiaufnahmen verschiedener Bauteile und Baugruppen von netzgekoppelten Wechselrichtern [2]

seitigen Maximalleistung ($P_{WR-DC-max}$) und zur wechselstromseitigen Maximalleistung ($P_{WR-AC-max}$). Planer brauchen diese und weitere Angaben, um Anlagen richtig zu dimensionieren.

Leistungsdaten bei Wechselrichtern

Die gleichstromseitige Maximalleistung ($P_{WR-DC-max}$) ist die Leistung, die der Generator dem Wechselrichter maximal anbieten darf, bevor eine Leistungsbegrenzung greift. Unter der DC-Nennleistung ($P_{WR-DC-Nenn}$) versteht man die Generatorleistung,

[8]. Damit liegen beim Wechselrichter vier Werte vor, die sein Nenn- und Maximalleistungsverhalten beschreiben: $P_{WR-DC-max}$, $P_{WR-DC-Nenn}$, $P_{WR-AC-max}$ und $P_{WR-AC-Nenn}$.

Auf manchen Datenblättern findet sich noch eine weitere Information – die etwas unglückliche Angabe zur maximal zulässigen PV-Leistung. Es wäre besser, auf diese Aussage zu verzichten, denn die Erfahrung zeigt, dass mitunter sehr hohe Werte angegeben und dann auch entsprechend Anlagen so realisiert werden. Dies führt wiederum dazu (gute Systembedingungen vorausgesetzt), dass Geräte, an die eine maximal zu-

erreicht werden kann, sind in guten Datenblättern explizit genannt. Im Nennbetrieb kann ein Wechselrichter so lange dauerhaft betrieben werden, wie die Umgebungstemperatur nicht über $40\text{ }^\circ\text{C}$ steigt. Die Verlustwärme im Wechselrichter führt man unter normalen Betriebsbedingungen mit einem entsprechenden Kühlkonzept ab (Grafik 1). Im Maximalbetrieb reicht das nicht mehr. Ein maximal ausgelasteter Wechselrichter erzeugt mehr Wärme als bei der Auslegung des Kühlkonzeptes für den Nennbetrieb vorgesehen. Aufgrund der Masse der Bauteile des Wechselrichters herrscht im Gerät eine entsprechende thermische Trägheit. Die

Leistung oder Ertrag der PV-Anlage zu gering?

Lösung: Kontrolle und Fehlersuche mit professionellen Messgeräten.

- Prüfung von Strings wie auch von Einzelmodulen – vor Ort!
- Peakleistung, Widerstand und Kennlinie mit nur einer Messung
- Automatische Umrechnung auf STC (patentierte Methode)
- Schnelle Fehlererkennung
- Einfache Anwendung und hoher Nutzen

Patentiertes System

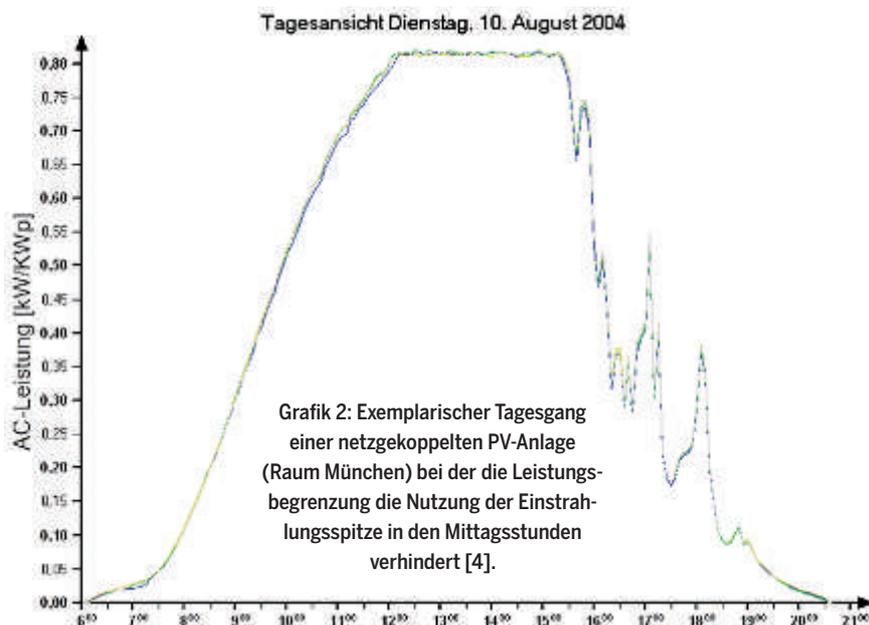


...mehr als nur Kennlinien



PV-Engineering GmbH · Augustastr. 24 · 58644 Iserlohn · Tel. +49 (0) 23 71 15 95 347 · Fax +49 (0) 23 71 15 95 348 · www.pv-e.de





Leistungsbegrenzung

Wenn ein Wechselrichter oberhalb seiner Nennleistung (AC-Nennleistung) belastet wird, sind die elektronischen Bauteile aufgrund der internen Verluste stärker thermisch belastet. Das Kühlkonzept, das für den Nennbetrieb konzipiert ist, kann die Verlustwärme nicht mehr ausreichend abführen. Die Umgebungstemperatur spielt hierbei eine wichtige Rolle. Meist wird eine kurzzeitige Überlastung bis hin zur Maximalleistung (AC-Max-Leistung) ohne Schädigung des Gerätes vertragen. Sobald jedoch eine kritische Temperatur im Gerät erreicht ist, wird die Leistung gesenkt und die Abregelung setzt ein. Die Leistungsverminderung wird oft durch eine Arbeitspunktverschiebung auf der (I(U)-Kennlinie des PV-Generators erreicht. Der Wechselrichter arbeitet dann nicht mehr im Punkt maximaler Leistung (MPP) und die aufgrund der Einstrahlung mögliche Eingangsleistung des Solargenerators wird nicht mehr vollständig genutzt. Der Ertrag und damit verbunden auch die Einnahmen aus der Einspeisevergütung werden beschnitten. Hinzu kommt, dass die höheren Temperaturen und die Auslastung der elektrischen Bauteile und Baugruppen des Wechselrichters zu einer schnelleren Bauteilalterung im Gerät führen können. Die damit einhergehende verkürzte Lebensdauer des Wechselrichters geht zu Lasten der Betriebskosten. Analog zur thermischen Begrenzung führt eine Überschreitung des Wechselrichterbetriebsfensters zu weiteren Einbußen.

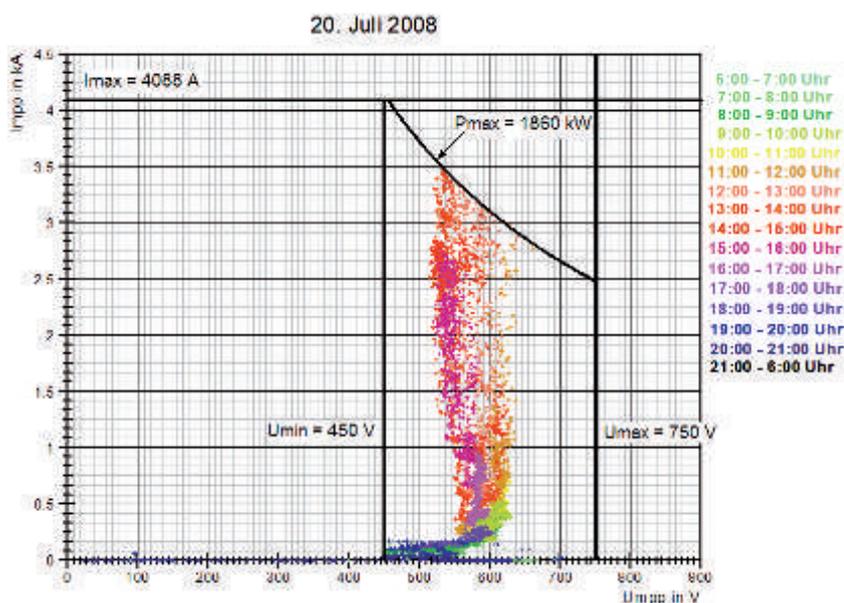
Temperatur steigt nicht sprunghaft an. Eine im Datenblatt nicht festgelegte Zeit lang heizt sich der Wechselrichter im Maximalbetrieb also immer weiter auf. Ist die zulässige Obergrenze erreicht, regelt er die Stromumrichtung und entsprechende Leistungsübertragung ab und arbeitet am Limit weiter [1].

Bei anderen Geräten hingegen entspricht die Nennleistung der Maximalleistung. Werden solche Geräte mit ihrer Nennleistung betrieben, befinden Sie sich schon an der thermischen Belastungsgrenze. Sie wurden für diesen Betrieb konzipiert. Sie sind allerdings nicht in der Lage höhere DC-Leistungen als die DC-Nennleistung zu verarbeiten und gehen sofort nach der Nennleistung in die Leistungsbegrenzung.

Abstimmung der Betriebsbereiche

Wechselrichter haben typische Betriebsfenster, deren Grenzen durch die Spannungswerte (U_{min} , U_{MPPmin} , U_{MPPmax} und U_{max}), die Strombegrenzung I_{max} und die Leistungsbegrenzung (Hyperbel der Maximalleistung) gesetzt werden. Diese Kenngrößen, die das Wechselrichterbetriebsfenster definieren, sind gerätespezifisch und müssen bei jedem Hersteller abgefragt werden. Bei der Auslegung und Optimierung von PV-Anlagen kommt es darauf an, die charakteristischen Betriebsbereiche von Modul und Wechselrichter aufeinander abzustimmen. Die Anlage muss dazu so geplant werden, dass der Modulbetrieb optimal in dieses Wechselrichterbetriebsfenster passt. Es sollten nicht nur keine Grenzwerte überschritten werden, sondern auch die höheren Wirkungsgradbereiche entsprechend oft genutzt werden. Wird die Anlage schlecht geplant, dann kann es zu unterschiedlichem Anlagenverhalten und entsprechenden Einschränkungen im Anlagenbetrieb (Strom-, Leistungsbegrenzung) kommen. Zu diesen Begrenzungen durch das Wechselrichterbetriebsfenster kann als weitere Einschränkung die geschilderte thermische Leistungsbegrenzung kommen.

Wie wirkt sich das nun im Anlagenverhalten aus, wenn man an die Grenzen des Betriebsfensters eines Wechselrichters stößt, besser gesagt PV-Generator und Wechselrichter nicht optimal aufeinander abgestimmt sind? Grafik 2 zeigt einen exemplarischen Tagesgang der AC-Leistung einer netzgekoppelten PV-Anlage aus dem Raum



Grafik 3: Darstellung eines exemplarischen Tagesgangs der 1,8-MW-Anlage Hösllwang in Form einer Punktwolke um anhand des Bildes das Betriebsverhalten zu verstehen [7].

DEUTSCHLANDS DÄCHER BRAUCHEN SIE!

Besuchen Sie uns auf der
INTERSOLAR 2009
27. – 29. Mai / München
Q-CELLS/HALLE A1/STAND A1.280

Wir überzeugen immer mehr Kunden in Deutschland von Solar-
modulen mit Qualitätszellen von Q-Cells. Sind Sie dabei,
wenn die Zukunft beginnt? Treffen Sie uns auf der Intersolar.
www.q-cells.com

Q.CELLS



Was nützt dir das schönste Modul,
wenn die Qualität nicht stimmt.

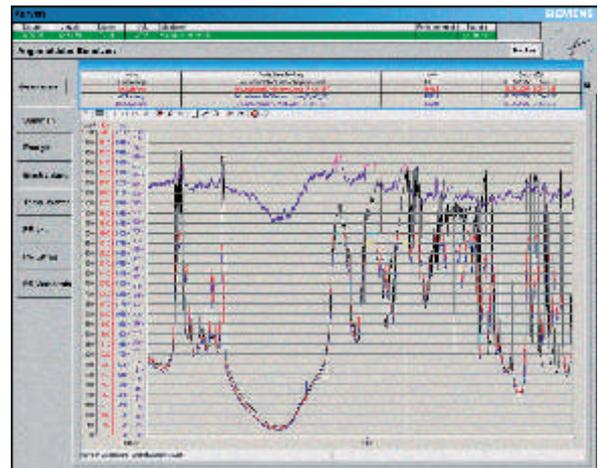
Rusol – der Vertragsdistributor von
Qualitätsherstellern.

Rusol ist europaweit einer der führenden Systemanbieter von Photovoltaik-Anlagen. Als offizieller Vertriebspartner namhafter Hersteller garantieren wir einen großen Lagerbestand, hohe Verfügbarkeit, direkten Herstellerzugriff und schnelle Lieferung.

Bestellen Sie jetzt unter +49 (0) 7934 9940-0



Your energy for tomorrow | www.rusol.com



Graphik 4: Darstellung der Megawattanlage in Höslwang. Energiemeteorologisch interessant: an einem exemplarischen Tag im Mai sind etliche Einstrahlungsspitzen über 1.000 W/m^2 zu beobachten. Trotz konservativer Auslegung sind bei etwa 1.800 kW Abregelungen vorhanden [4].

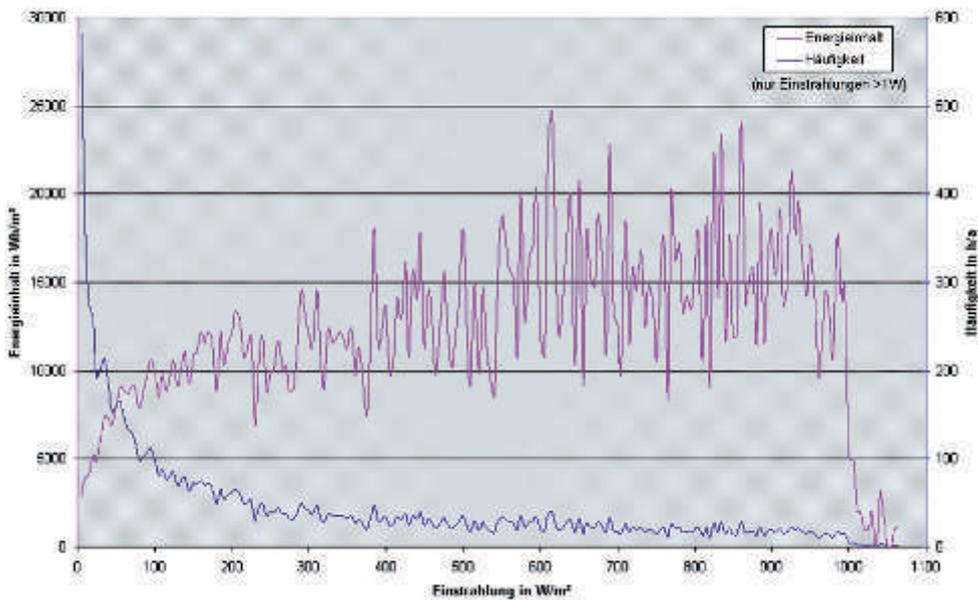
München. Die typische Einstrahlungsglockenkurve eines schönen Sommertages wird anfänglich wunderbar übertragen. Kurz nach 12 Uhr wirkt offenbar die Leistungsbegrenzung. Die Einstrahlungsspitze der Mittagsstunden kann bei dieser Anlage nicht genutzt werden.

Ebenso anschaulich ist die grafische Leistungsbeschreibung über Punktwolken in einem Flächendiagramm ([5] und [6]). Dargestellt werden die MPP-Punkte des PV-Generators in möglichst hoher zeitlicher Auflösung und das typische Wechselrichterbetriebsfenster. Das Fehlerbild bei Anlagen mit schlecht gewähltem Auslegungsverhältnis zeigt ein ‚hartes‘ Verschwinden der Leistungspunkte an der Leistungshyperbel des Wechselrichters auf. Der PV-Generator könnte eine höhere Leistung liefern. Aber weil der unterdimensionierte Wechselrichter diese Leistung nicht aufnehmen kann, zwingt er die Leistungspunkte, die über der Hyperbel liegen würden, auf sein Leistungsmaximum herunter. Das Leistungspotential der Anlage wird also nicht vollständig genutzt. Graphik 3 zeigt die exemplarische Punktwolke einer Megawattanlage, bei der trotz eines konservativ gewählten Auslegungsverhältnisses von $1,03:1$ (P_{PV} zu $P_{WR-DC-Nenn}$) noch die Leistungsbegrenzung auftritt [7].

Energiemeteorologie und Modulleistung

Die Angabe einer maximalen Modulleistung ist nicht so eindeutig durch eine technische Obergrenze festgelegt wie beim Wechselrichter. Die definierte Leistung der Module, die STC-Nennleistung (Standard Test Conditions) ist unter Bedingungen definiert, die einer Spitzenleistung nahe kommen. Vorausgesetzt werden eine Einstrahlung auf der horizontalen Fläche von 1.000 W/m^2 und eine Zelltemperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Es gibt aber Wettersituationen, in denen die Leistung noch höher liegt.

Wenn beispielsweise die Einstrahlung bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ Zelltemperatur über 1.000 W/m^2 liegt, was gar nicht



Grafik 5: Die Häufigkeitsverteilung der Einstrahlungswerte (dunkelblau) bei der Neuen Messe München und der Verlauf der Energieinhalte (rosa) der einzelnen Einstrahlungsklassen [4].

so selten vorkommt, steigt die Leistung eines Moduls schon über den Nennwert. Durch die Temperaturkoeffizienten wird ausgedrückt, wie sich die Zellen (Zelltyp) oder das Modul in Abhängigkeit der Temperatur verhalten. Bei kühlen Umgebungstemperaturen, hohen und auch durch Reflexion weiter begünstigten Einstrahlungswerten liegen die maximalen Leistungsspitzen des Generators vor. Um zu wissen, wie hoch nun diese Leistungsspitzen sind und wie lange sie andauern, wie viel Energie also jeweils in ihnen steckt, muss man die Einstrahlung genau und zeitlich hoch aufgelöst messen.

In der 1,8-MW-Freiflächenanlage Hösliwang wurde ein Überwachungssystem auf Kraftwerksstandard eingesetzt (WinCC). Basierend auf den aufgezeichneten, sehr hoch aufgelösten Messdatensätzen dieser PV-Anlage konnten verschiedenste Beobachtungen gemacht werden (Grafik 4). Es sind immer wieder Tagesgänge der Globalstrahlung mit Einstrahlungswerten über 1.000 W/m² zu beobachten. Dies führt trotz des erwähnt großzügigen Auslegungsverhältnisses zu Begrenzungsvorgängen. Ein ähnliches Monitoringsystem wurde in der 1,016-MW-Aufdachanlage ‚Neue Messe München‘ verbaut. Die in Grafik 5 gezeigten Spitzen in den Strahlungsleistungen konnten auch aufgezeichnet werden. Auf Basis dieser hoch aufgelösten Messdaten wurde nun eine Häufigkeitsverteilung für die Einstrahlungsleistung im Jahresverlauf erstellt (dunkelblaue Linie). Aus diesen Werten lassen sich schnell die Energieinhalte der einzelnen Einstrahlungsklassen berechnen und darstellen (rosafarbene Linie). Es zeigt sich, dass in dem berechneten Jahr in dem Einstrahlungsbereich über 900 W/m² mehr als 8 % des Jahresenergieeintrags zu finden war. Diese Infor-

mation sollte bei der Suche nach der optimalen Abstimmung zwischen Generator und Wechselrichter Berücksichtigung finden. Aktuellere Häufigkeitsverteilungen zu Einstrahlungswerten zeigen noch höhere Anteile der

Jahresenergie in den großen Einstrahlungsklassen.

Nicht nur für die Betriebsanalyse von PV-Anlagen liefern hoch aufgelöste Messdatensätze wichtige Informationen. Auch bei der



Was steckt dahinter?

Tyco Electronics
Our commitment. Your advantage.

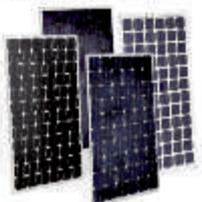


Trinasolar
The power behind the panel.

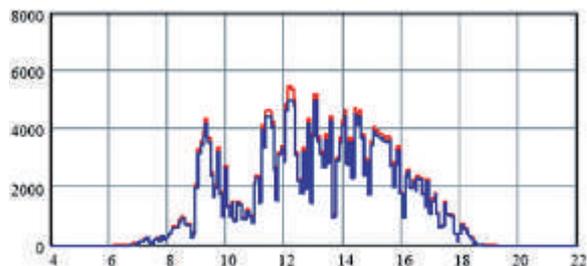
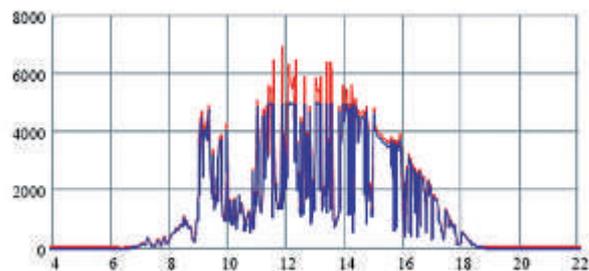
Alternative Energiequellen sind heute wichtiger als je zuvor, wenn wir den Fortschritt nicht aufhalten, aber auch unseren Planeten nicht zerstören wollen. Wir bei Trina Solar haben uns vollkommen der Entwicklung von Produkten verschrieben, die den Energiebedarf der Zukunft auf verantwortliche Weise decken sollen. Um uns die sauberste, reichhaltigste und zugänglichste Energiequelle der Welt nutzbar zu machen, brauchen wir bloß nach oben zu schauen.

Was wirklich hinter unseren Sonnenkollektoren steckt, ist die Kraft der Natur.

Weitere Informationen finden Sie unter www.trinasolar.com.



ANLAGENAUSLEGUNG



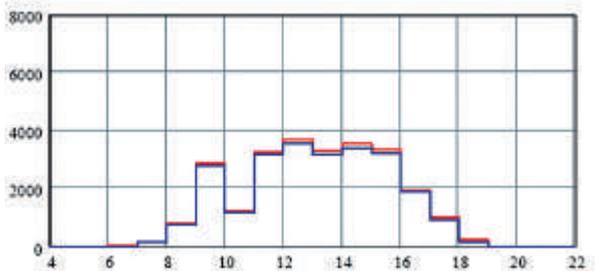
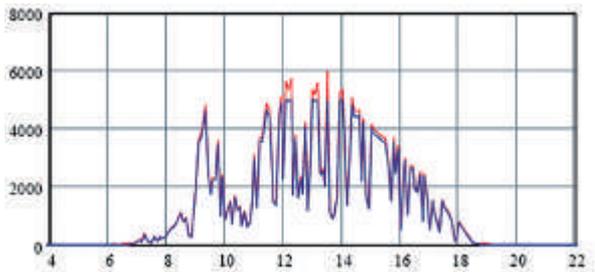
Grafik 6: Darstellung der DC- und AC-Leistung eines exemplarischen Tagesgangs in verschiedenen Auflösungen (Momentan-,

elektrischen Auslegung der PV-Anlagen sind sie elementar. Es geht darum, auf Basis hoch aufgelöster energiemeteorologischer Datensätze zur optimalen Abstimmung zwischen Generator und Wechselrichter zu kommen. Dieses Wissen ist bei der Auswahl und Anwendung von Auslegungsprogrammen wichtig.

Überlegungen zu Zeitschrittweiten

Überlegungen zur Zeitschrittweite wurden von Bruno Burger vom Fraunhofer ISE aus Freiburg auf dem PV-Symposium in Bad Staffelstein vorgestellt [1]. Grafik 6 zeigt grundsätzlich die DC- und AC-Leistung einer PV-Anlage an einem exemplarischen Tag. Dieser Tagesgang wird nun in vier verschiedenen Grafiken jeweils auf Basis von Momentanwerten, Minutenmittelwerten, 5-Minuten-Mittelwerten und Stundenmittelwerten dargestellt. Es ist deutlich sichtbar, wie sich der Informationsgehalt zum Tagesgang mit zunehmend größerer Auflösung vermindert. Die Grafik mit den Stundenmittelwerten bildet das tatsächlich stattgefundenene Anlagenverhalten nur unzureichend ab. Ebenso ist es mit den energiemeteorologischen Daten, auf deren Basis bei der Auslegung gerechnet werden soll. Durch die Mittelwertbildung über eine Stunde werden die kurzzeitigen Einstrahlungsveränderungen bei der Momentanwerterfassung, beispielsweise bei vorbeiziehenden Wolken, geglättet und gehen für die Berechnung der exakten und ertragsoptimierten Auslegung verloren.

Das Wetter liefert also, wenn man es mit Momentanwerten betrachtet, nicht nur mehr Einstrahlung im Bereich über 1.000 W/m^2 als bisher angenommen. Es weist zudem viel ausgeprägtere, zeitlich begrenzte Spitzen auf. Wenn man diese Umstände berücksichtigt, stellt sich die Frage, wie man den Wechselrichter nun in Hinsicht auf seine maximale Leistung und seine Nennleistung dimensionieren soll, um möglichst viel Strahlungsenergie auch wirklich umzuwandeln



1-Minuten-, 5-Minuten-, 1 Stunden-Mittelwerte; in rot dargestellt ist die DC-Leistung, in blau die AC-Leistung) [1].

und einzuspeisen. Kurz: Welches Auslegungsverhältnis sollte man nun also wählen?

Das Auslegungsverhältnis: ein weites Feld

Das Auslegungsverhältnis beschreibt die Relation der Generatorleistung zur Wechselrichterleistung. Dabei ist genauer zu definieren, was man unter Generatorleistung, und was man unter Wechselrichterleistung verstehen will. Die Fachwelt ist sich hier alles andere als einig. Im Planungsordner 'Photovoltaische Anlagen' der DGS heißt das Auslegungsverhältnis Auslegungsfaktor C_{WR} , und bezeichnet das Verhältnis von Generatorleistung unter STC (P_{PV}) zur Nennausgangsleistung des Wechselrichters, also seiner AC-Nenn-Leistung ($P_{WR-AC-Nenn}$). Im Buch „Photovoltaik für Profis“ rechnet man mit P_{PV} zu $P_{WR-AC-Nenn}$ und benennt diese Relation „Leistungsverhältnis“. Die Software PVScout greift auf P_{PV} zu $P_{WR-AC-Nenn}$ zurück, auch hier nennt man es „Leistungsverhältnis“. Bei der Software PV*Sol heißt dieser Quotient „Dimensionierungsfaktor“. Beim Wechselrichterhersteller SMA wird aus der Perspektive des Umrichters gerechnet. Hier verwendet man den Begriff „Nennleistungsverhältnis“, und meint den Quotienten aus maximaler Wechselrichtereingangsleistung ($P_{WR-DC-max}$) zur PV-Generatorleistung unter STC (P_{PV}). Beim RAL Güteschutz Solarenergieanlagen, dem RAL-GZ 966, heißt es in den Güte- und Prüfbestimmungen für die Planung photovoltaischer Anlagen (P2) „WR/PV-Verhältnis“. Gemeint ist hier das Verhältnis der Wechselrichter DC-Nennleistung $P_{WR-DC-Nenn}$ zur Generatorleistung P_{PV} . Bruno Burger vom Fraunhofer ISE führte in seinen umfangreichen Arbeiten zum Thema Auslegung von PV-Anlagen das Verhältnis P_{PV} zu $P_{WR-AC-max}$ ein.

Heinrich Häberlin (Berner Fachhochschule, Burgdorf, Schweiz) wählt in seinem Standardwerk die STC-



Automatisches Belüftungssystem – stoppt Feuchtigkeit und Geruch!



Abb. zeigt SolarVenti 14 als Wandmontage.

Mit Sonnenenergie!
Ideal für
- Wochenendhaus und Eigenheim
- Kleingarten
- Werkstatt, Garage und Lager!
Vollautomatisch und wartungsfrei!
Ohne laufende Betriebskosten!



Besuchen Sie uns auf der Intersolar in München vom 27.05.09 bis 29.05.09. Halle 2, Stand 670



VEH Solar- und Energiesysteme GmbH & Co KG
Heidweg 16 | 21255 Tostedt
Telefon 0 41 82 / 29 37 99 | Fax 0 41 82 / 29 31 69
solarventi@veh-solar.de
www.veh-waermluftkollektoren.de



SOLARLOK Das Steckverbinder-System

- Gewährleistet die einfache und zuverlässige Verschaltung einzelner Solarmodule bis hin zum Wechselrichter
- Reduziert die Installationskosten der PV-Anlage durch modulare Systemkomponenten
- Zuverlässig – sicher – effizient

Info-Hotline: 149-(0)6251-133-1999
www.tycoelectronics.com/solar



Our commitment. Your advantage.

Leistung des PV-Generators im Verhältnis zu der Gleichstromnennleistung des Wechselrichters. Als Empfehlungen werden bei Anlagen mit schlechter Ausrichtung bis zu 120 % und bei Fassadenanlagen sogar bis zu 130 % genannt. Bei gut gekühlten Freiflächenanlagen mit guter Ausrichtung und gutem Wechselrichterteilastverhalten sind es hingegen 100 % bis 105 %, für Anlagen in alpinen Umgebungen wird hier sogar ein Faktor von 90% vorgeschlagen.

Für die Verwendung des Quotienten P_{PV} zu $P_{WR-AC-max}$ als Auslegungsverhältnis spricht einiges. Beide Kenngrößen sind gut und technisch einwandfrei definiert, und sie sind auf allen Wechselrichterdatenblättern zu finden. Auch wird mit diesem Quotienten dem Umstand Rechnung getragen, dass es Wechselrichter mit oder ohne Überlastkapazität gibt. Denn wenn man die Frage beantworten will, welchen Wert des Auslegungsverhältnisses man wählen muss, um nur bestimmte Verlustprozentpunkte, beispielsweise 1,5 %, durch Leistungsbegrenzung hinnehmen zu müssen, so kann man folgende Überlegung anstellen:

Die Leistungsspitzen der Einstrahlung, die zu einer Wechselrichter-Ausgangsleistung gleich oder größer der Nennausgangsleistung führen, sind zeitlich begrenzt. Treten sie auf, beginnt ein Temperaturanstieg im Wechselrichter. Die thermische Masse des Gerätes verzögert das Überhitzen. Die Umgebungstemperaturen werden nur in Ausnahmefällen um die oder über 40 °C liegen, denn bei einer gut geplanten Anlage kann der Wechselrichter seine Abwärme in die kühlere Umgebung abgeben. Man kann also davon ausgehen, dass ein Wechselrichter, wenn eine Einstrahlungsspitze ansteht, im erlaubten Überlastbereich arbeitet, sofern

ein solcher vorhanden ist. Und noch bevor nach ca. 10 Minuten die thermisch bedingte Abregelung einsetzt, ist die Einstrahlungsspitze vorbei und der Wechselrichter kann sich wieder etwas abkühlen. Bei einem Wechselrichter ohne Überlastkapazität wird diese Einstrahlungsspitze viel früher abgeregelt, denn dieser erreicht mit der Grenze der Nennleistung auch gleichzeitig die Grenze der Maximalleistung. Um in beiden Fällen gleich oft oder gleich selten in die Leistungsbegrenzung zu gehen, kann der Planer also einen Wechselrichter mit Überlastkapazität bezogen auf die Nennleistung etwas kleiner dimensionieren als einen Wechselrichter ohne Überlastkapazität. Wählt man als Auslegungsverhältnis P_{PV} zu $P_{WR-AC-Nenn}$ müsste man demnach für gleiches Abregelverhalten zwei Werte angeben: einen für den Wechselrichter mit und einen für den Wechselrichter ohne Überlastkapazität.

Wählt man das Auslegungsverhältnis P_{PV} zu $P_{WR-AC-max}$, dann genügt die Angabe eines Wertes. Diese Überlegungen setzen voraus, dass die Einstrahlungsspitzen respektive DC-Leistungsspitzen auch wirklich vom Wechselrichter genutzt werden können und auch nicht zu häufig auftreten. Im Folgenden wird unter dem Auslegungsverhältnis der Quotient aus P_{PV} und $P_{WR-AC-max}$ verstanden.

Noch komplexer ist die Frage, welche sinnvollen Grenzen man bei der Wahl des von den verschiedenen Autoren so unterschiedlich gehandhabten Auslegungsverhältnisses einhalten soll. Wenn man versucht, alle Angaben auf ein einheitliches Verhältnis umzurechnen, stößt man schnell an Grenzen und muss Annahmen treffen. Zusammengefasst sehen die Autoren die Unter- bzw. Obergrenze in folgendem Fenster:

$0,87 \text{ bis } 1,10 < P_{PV} / P_{WR-AC-max} < 1,06 \text{ bis } 1,38$.

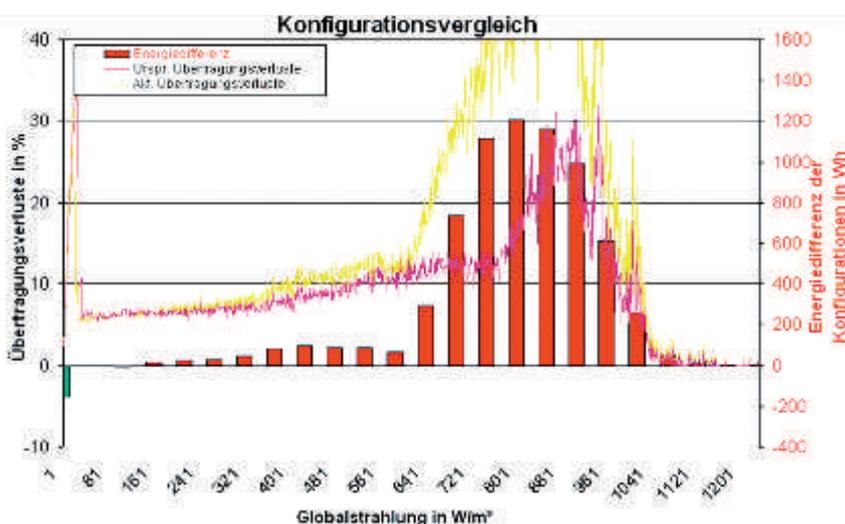
Wer mit unterschiedlichen Programmen Anlagen plant und berechnet, ist einer der Auswirkungen dieser Bandbreite sicher schon einmal begegnet: In dem einen Programm ist eine bestimmte Anlagenauslegung im Sinne des Verhältnisses Generatorleistung zur Wechselrichterleistung zulässig, im anderen Programm bekommt man für genau dieselbe Konfiguration einen Warnhinweis und soll sie noch einmal überprüfen!

Auslegungsverhältnis und Ertrag

Mehrere Faktoren haben Einfluss auf die optimale systemtechnische Abstimmung von Solargenerator und Wechselrichter: die geografische Lage mit den standortspezifischen Wetterprofilen und den Gegebenheiten vor Ort, die Ausrichtung der Generatorebene (Himmelsrichtung und Höhenwinkel), die Montageart und natürlich die charakteristischen Betriebsbereiche von Modul und Wechselrichter.

Neben der Optimierung dieser systemtechnischen Gesichtspunkte sind auch betriebswirtschaftliche Aspekte wichtig. Teil der Auslegungsberechnung sind demnach auch die Investitionskosten, die Betriebskosten sowie die Finanzierung. Für Anlagen mit guter Rendite sind eine gute Anlagenwartung und ein entsprechendes Monitoring unverzichtbar. Es ist nun keineswegs trivial, mit all diesen Parametervariationen zu einer optimalen Auslegung zu finden. Offensichtlich hat man hier das Gebiet der Faustformeln und Nomogramme verlassen. Eine Auslegung der Anlagen „von Hand“ durch den Planer und Installateur ist nicht zielführend und eher unprofessionell. Im Gegenteil: Viele Vorteile sprechen für eine Anwendung von Computerprogrammen. Der Anlagenplaner kann bei der Berechnung und Optimierung der Systemkonfigurationen inzwischen eine ganze Reihe verschiedener Auslegungsprogramme nutzen. Diese Programme wird *Sonne Wind & Wärme* in einem späteren Artikel vorstellen.

Welchen Einfluss aber hat nun das Auslegungsverhältnis auf den Ertrag? Aus der Branche und von unterschiedlichen Firmen hört man sehr verschiedene Vorgaben und Empfehlungen. Im Verkauf von PV-Anlagen ist es grundsätzlich hilfreich, möglichst viele Module auf einen Wechselrichter zu verschalten. Viel Modulleistung auf einen Wechselrichter bedeutet, dass sich bei der Berechnung der spezifischen Investitionskosten die höheren Anlagenkosten durch mehr



Grafik 7: Exemplarischer Vergleich eines konservativ ausgelegten Systems mit einer Anlage, die mit hoher Modulanzahl an die Auslegungsgrenzen gefahren wurde.



Wie die Symbiose in der Natur...



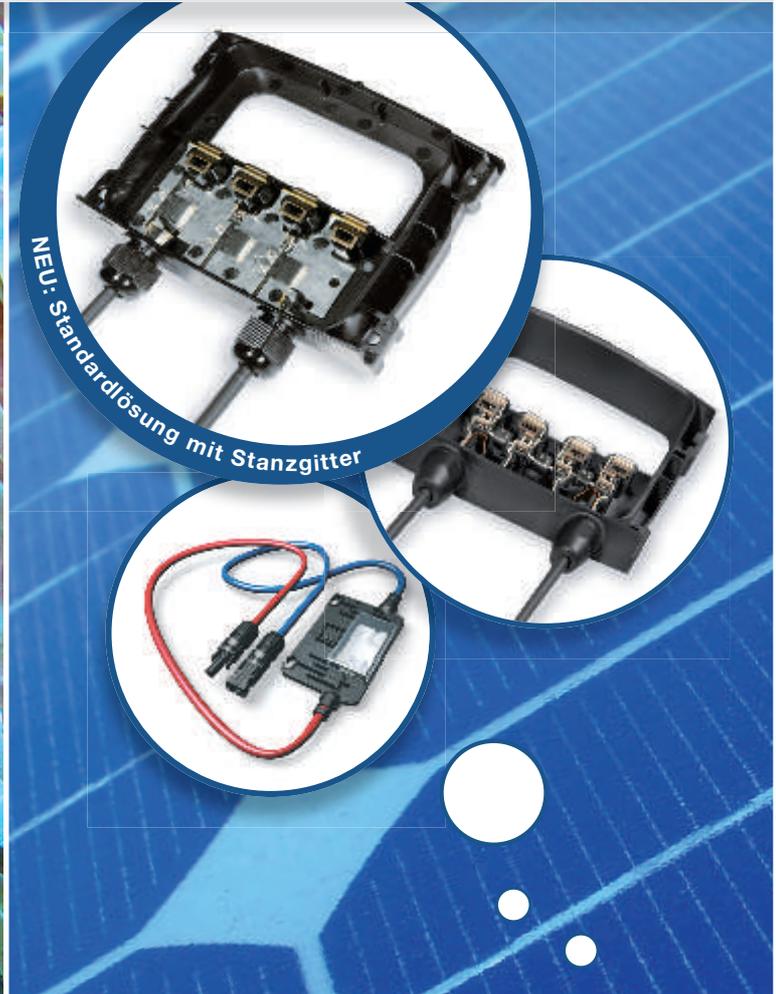
...passt unsere Anschlussstechnik zu Ihrem Solarmodul



Besuchen Sie uns auf der



vom 27. - 29. Mai
in München
Halle B4/Stand 310



Solarmodul-Anschlussstechnik von KOSTAL

Wir haben uns die Natur zum Vorbild genommen. Angepasst an Ihre Bedürfnisse erhalten Sie die passende Anschlussdose für Ihre Solarmodule von uns.

Kundenspezifisch

- ▶ individuell angepasst
- ▶ maßgeschneiderter Kundennutzen
- ▶ Reduzierung von Systemkosten

oder

Universell

- ▶ einfache Kontaktierung
- ▶ Dioden / Leitungen auswechselbar
- ▶ Leitungen / Steckverbindungen frei wählbar

Immer eine perfekte Symbiose!

www.kostal.com/industrie

KOSTAL Industrie Elektrik GmbH, Lange Eck 11, 58099 Hagen
Tel.: +49 2331 8040 - 4831, E-mail: info-industrie@kostal.com

KOSTAL
Industrie Elektrik

Modulleistung dividieren und sich damit geringere spezifische Investitionskosten erzielen lassen. Es kann also mehr verkauft, und zusätzlich ein geringerer spezifischer Preis genannt werden. Doch was bedeutet dies für den Anlagenbetrieb und für den Investor? Grundsätzlich steuert man mit einer solchen Auslegungsphilosophie auf ein höheres Auslegungsverhältnis hinaus. In der Branche wird argumentiert, dass man so die Anlagen auf unsere Wettersituation besser anpasst und durch ein mehr an Modulen die Anlage hauptsächlich im Bereich der höheren Teillastwirkungsgrade der Wechselrichter betreibt. Gegebenenfalls ungenutzte hohe Einstrahlungsspitzen könnten im Bereich der höheren Teillastwirkungsgrade wettgemacht werden.

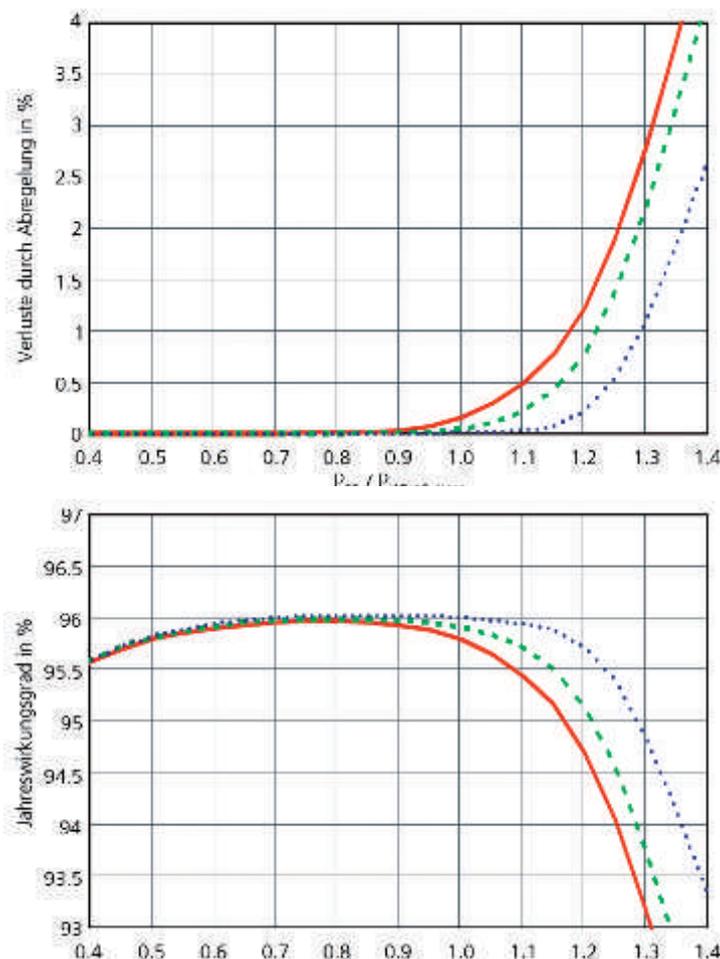
In Kenntnis der sehr hoch aufgelösten Messdatensätze und der Energieinhalte der hohen Einstrahlungsklassen stellt sich der Sachverhalt jedoch anders dar. Auch ist bei aktuellen Wechselrichtern am Markt das Betriebsverhalten der Geräte über den gesamten Betriebsbereich so gut, dass es zu hinterfragen ist, ob der Fokus auf die Wirkungsgradmaxima im Teillastbereich, mit den einhergehenden Konsequenzen, wirklich richtig gesetzt ist. In der Solarschmiede in München laufen hierzu zusammen mit der Hochschule München seit Jahren verschiedene Arbeiten. Grafik 7 zeigt einen exemplarischen Konfigurationsvergleich. Ein konservativ ausgelegtes System (1:1) wird mit einer Anlage verglichen, die mit hoher Modulanzahl an die technisch realisierbaren Auslegungsgrenzen gefahren wurde. Die verlorene Energie in den höheren Einstrahlungsbereichen wird keineswegs durch einen Energiezugewinn in den niedrigeren Einstrahlungsklassen kompensiert. Natürlich ist jede Anlagenkonfiguration unter den eigenen Betriebsbedingungen und den obigen Gesichtspunkten gesondert zu untersuchen. Als Erfahrungswert aus der Messdatenanalyse und Auslegungsar-

beit [3], [5] ist, gute Betriebsbedingungen vorausgesetzt, für den süddeutschen Raum sicher ein konservatives Auslegungsverhältnis von 1:1 optimal und empfehlenswert.

Bruno Burger hat hierzu in seinen Arbeiten ein umfassenderes Beispiel zur Auslegung gerechnet: Für einen nach Süden ausgerichteten Solargenerator mit einer Neigung von 30° zeigen sich die in Grafik 8 dargestellten Verluste aufgrund der Leistungsbegrenzung des Wechselrichters. Bei angenommenen 0,5 % Verlust durch Leistungsbegrenzung erhält man mit Momentanwerten ein resultierendes Leistungsverhältnis $P_{PV} / P_{WR-AC-max}$ von 1,11. Bei derselben Anlage, berechnet mit Minutenmittelwerten ergibt sich 1,14 und bei Stundenmittelwerten sogar 1,26. Dies zeigt, dass die Ergebnisse erheblich davon abhängen, ob man mit Momentan-, Minuten- oder Stundenmittelwerten rechnet. Es zeigt auch, dass die Faustformel, die Generatornennleistung bis zu 30 % größer zu wählen als die Wechselrichterleistung, veraltet ist. Sie stammt

aus der Zeit, als man mit Stundenmittelwerten rechnete, weil nichts anderes verfügbar war. Doch noch immer begegnet man Dimensionierungen für Anlagen an guten Standorten, bei denen nach heutigen Erkenntnissen die Wechselrichter stark unterdimensioniert sind.

Bei optimaler Auslegung, besser gesagt einem optimalen Auslegungsverhältnis sind schnell 2 % und mehr an Ertrag gewonnen – oder eben verloren, je nachdem, wie der Planer die Anlage dimensioniert.



Grafik 8: Verluste durch Leistungsbegrenzung und Jahreswirkungsgrad als Funktion des Auslegungsverhältnisses bei der Berechnung mit Momentanwerten (rot, durchgezogen), Minutenmittelwerten (grün, gestrichelt) und Stundenmittelwerten (blau, gepunktet) [1].

Auslegung und Wirtschaftlichkeit

Für die meisten Anlagenbetreiber ist neben einem guten Ertrag vor allem die Wirtschaftlichkeit der Investition eine wichtige Größe. In diesem Bereich gibt es noch keine wissenschaftliche Untersuchung. Die Zusammenhänge liegen aber auf der Hand: Die Nennleistung des Solargenerators sei fest. Ein viel zu kleiner Wechselrichter, also ein viel zu großes Auslegungsverhältnis bedeutet nennenswerte Ertragseinbußen durch Leistungsbegrenzung.

Verbunden mit dem Ertragverlust sind Einbußen bei den Einnahmen. Dazu kommt, dass häufiger überlastete elektrische und elektronische Bauteile schneller altern. Die Lebenserwartung der Wechselrichter sinkt, die Reparaturkosten steigen. Dies alles führt dazu, dass bei steigendem Leistungsverhältnis sicherlich eine abnehmende Wirtschaftlichkeit zu beobachten sein wird.

Die folgende Betrachtung beginnt bei einem Auslegungsverhältnis von 1,4 und richtet sich auf abnehmende Werte: Ein kleiner Wechselrichter, also ein großes Auslegungsverhältnis bedeutet etwas geringere, aber immer noch deutliche Ertragseinbußen durch Leistungsbegrenzung, gleichzeitig sinkt die Lebenserwartung des Wechselrichters. Beginnend von hohen Werten (Auslegungsverhältnis > 1,4) wird sich die Wirtschaftlichkeit hin zu niedrigeren Werten ($1,2 < \text{Auslegungsverhältnis} < 1,4$) etwas verbessern. Bei der nächst größeren Stufe des Wechselrichters (also einem noch etwas

LORENZ[®] — Das Rückgrat.



Besuchen Sie uns auf der
inter solar 2009 **B3.110**

Wie die Wirbelsäule für den menschlichen Körper ist das Montagesystem das zentrale Konstruktionselement einer PV-Anlage. Daher haben wir nicht nur besonderen Wert auf die Stabilität und Stärke aller Bauteile gelegt, sondern diese systemisch miteinander verbunden. Durch eine Reduzierung der Komponentenanzahl und montagefreundliche Arbeitsschritte bieten wir eine noch schnellere, sicherere und kosteneffizientere Bauweise. Unverändert bleibt: **LORENZ[®]** gewährleistet lange Haltbarkeit und ermöglicht eine ein- und zweilagige Montage auf allen Dachtypen.

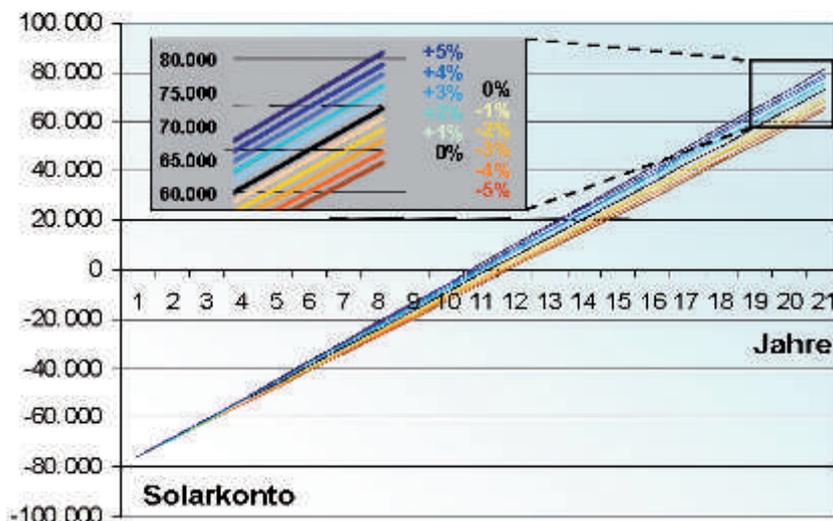
Die neue **LORENZ[®]**-Generation:
sicher, schnell, professionell.

www.energiebau.de

Heinrich-Rohlmann-Straße 17 | 50829 Köln | Tel.: 0221 98966-0 | info@energiebau.de



Stand Solarkonto über die Jahre bei +/- 5% Abweichung des Ertrags um einen Mittelwert von 950 kWh/kWp



Grafik 9: Solarkontoverlauf einer 20 kW-Beispielanlage in Süddeutschland: Dargestellt wird die betriebswirtschaftliche Auswirkung bei unterschiedlicher Anlagenperformance.

kleineren Auslegungsverhältnis) sind die vermeidbaren Ertragsverluste im kleinen Prozentbereich immer noch vorhanden. Der Wechselrichter kostet jetzt in der Anschaffung vermutlich etwas mehr als in der Stufe davor, was jeder Kunde im Angebot sehen wird.

In der täglichen Praxis der Beratung im solid-Zentrum kennt Solarfachberater Oskar Wolf diesen Fall gut: „Wir sehen häufig Angebote mit Wechselrichtern, die wir gern etwas größer gehabt hätten. Dem Ertrag und der Lebensdauer täte es sicherlich gut, die Investition wird kaum teurer. Wir sind der Überzeugung, dass es sich lohnen würde. Ohne fundierte Beratung sehen viele Leute leider unterm Strich nur auf den Preis. Und das dürfte auch einer der Gründe dafür sein, dass Planer und Handwerker die Wechselrichter etwas kleiner, die Anlagenpreise etwas billiger und die Mitbewerber damit etwas weiter weg halten.“ In diesem Bereich wird die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit am spannendsten. Das Auslegungsverhältnis dürfte sich jetzt um Werte zwischen 1,0 und 1,2 bewegen. Wenn das Auslegungsverhältnis weiter sinkt und dann im Bereich zwischen 0,8 bis 1,0 liegt, wird der Wechselrichter wieder eine Spur größer und damit teurer. Dafür geht er nicht mehr oder nur noch selten in die Leistungsbegrenzung. Wo technisch und wirtschaftlich gesehen das Optimum der Auslegung liegt, wird gerade an der Hochschule München untersucht.

Als Beispiel sei das „Solarkonto“ einer 20 kW-Anlage mit folgenden Eckdaten genannt:

Standort in Süddeutschland, Ausrichtung Süd, Neigung 30°, verschattungsfreie Position, geplante Inbetriebnahme im Juni 2009, Netto-Investitionskosten von 3.800 €/kW (schlüsselfertig, inklusive Betriebskosten, ohne Finanzierungskosten und ohne steuerliche Effekte), keine Eigenstromnutzung, dynamische Berechnung mit PVProfit 2.2.

Wie in Grafik 9 dargestellt, wurde in der Beispielrechnung die Entwicklung eines fiktiven Kontostandes über den EEG-Vergütungszeitraum bei einem spezifischen Jahresertrag von 950 kWh/kW und einer Abweichung von diesem Ertrag von -5 % bis +5 % in Prozentstufen berechnet. In der Vergrößerung ist die Auswirkung einer Ertragssteigerung / -verminderung, wie sie beispielsweise durch verbesserte oder verschlechterte Performance erreicht werden könnte, deutlich zu erkennen. Bei dieser 20 kW-Beispielanlage macht der maximale Unterschied immerhin etwa 16.400 € aus. Und diese Summe ist in Relation zu den Mehrkosten einer günstigeren Anlagenauslegung mit mehr Wechselrichterleistung zu sehen.

Zusammenfassung

Das Auslegungsverhältnis ist die Beziehung der Moduleistung zur Wechselrichterleistung. In welchem Verhältnis diese beiden Leistungen zueinander stehen sollten und welche Leistungen gemeint sind, wird in der Branche nicht einheitlich betrachtet. Bei der DKE hat sich eine neue Arbeitsgruppe zum Thema Auslegung formiert. Ziel ist es, zu

einheitlichen Definitionen zu finden.

Beiträge wie dieser und allgemeine Angaben zu einem sinnvollen Auslegungsverhältnis ersetzen allerdings keine individuelle Planung durch den Fachmann. Das sollen Sie auch nicht. Sie führen aber dem interessierten Laien die Zusammenhänge und die Komplexität der PV-Anlagenplanung vor Augen. Und sie helfen dem Profi, sich in die Zusammenhänge so einzuarbeiten, dass er die richtige Anlagenauslegung für jeden konkreten Fall zu finden im Stande ist.

Führt man die systemtechnischen und betriebswirtschaftlichen Optimierungsschwerpunkte zusammen, hat man den Zusammenhang zwischen Auslegungsverhältnis, Systemperformance und Wirtschaftlichkeit hergestellt. Gerade wurde an der Hochschule München im Labor Solartechnik eine erneute und noch umfangreichere Untersuchung zu diesem Thema gestartet.

Björn Hemmann, Mike Zehner, Georg Wirth

Die Autoren

Björn Hemmann ist seit 2001 beim gemeinnützigen solid beschäftigt. Sein Aufgabengebiet umfasst Projektentwicklung, Qualitätssicherung, Weiterbildung und Kundenberatung. Er ist Mitglied des Güteausschusses im RAL-Solar und Vorsitzender des Arbeitskreises Ausführung (P3).

Mike Zehner leitet die Arbeitsgruppe des Labors für Solartechnik im Studiengang Regenerative Energien der Hochschule München (Auslegung, Simulation, Systemoptimierung) und ist Geschäftsführer der Solarschmiede GmbH (Entwicklung von PV-Auslegungsprogrammen und PV-Engineeringaufgaben).

Georg Wirth ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe an der Hochschule München.

Referenzen und Quellen

- [1] Bruno Burger, Auslegung und Dimensionierung von Wechselrichter für netzgekoppelte PV-Anlagen, Staffelstein 20. PV-Symposium 2005;
- [2] Peter Funtan, Wechselrichter Workshop am ISET Kassel: Thermische Bauteilbelastung bei PV-Wechselrichtern, Kassel 2001;
- [3] Steve Ransome, Peter Funtan, Why Hourly Averaged Measurement Data is Insufficient to Model PV System Performance Accurately, EPVSEC, Barcelona 2005;
- [4] Mike Zehner, Bodo Giesler, Markus Maier, Gerit Erbeck, et al., verschiedene Studien zu Auslegung und Optimierung netzgekoppelter PV-Anlagen, 2003 bis 2009;
- [5] Mike Zehner, Toni Weigl, Punkt für Punkt – grafische Analyse des Systemverhaltens netzgekoppelter PV-Anlagen auf Basis hoch aufgelöster Messdatensätze und Simulationsergebnisse, Sonne Wind & Wärme, BVA Heft 2/2009;
- [6] Heinrich Hufnagel, Mike Zehner, Illustration der Auslegung netzgekoppelter PV-Anlagen und die Suche nach der optimalen Abstimmung zwischen Generator und Wechselrichter, Staffelstein 21. PV-Symposium 2006;
- [7] Bodo Giesler, Mike Zehner, Toni Weigl, Auslegungs- und Betriebserfahrungen bei Megawattanlagen, Staffelstein 24. PV-Symposium 2009;
- [8] VDN Merkblatt 03/2004 zur VDEW Richtlinie Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, VDN, Berlin, März 2004;



Die Sonne schenkt uns Energie

Die Sonne liefert uns Licht, Wärme und Energie

Mithilfe innovativer Lösungen für Solar-Anlagen verwandelt Ingeteam diese unerschöpfliche Energiequelle in elektrischen Strom. Zur optimalen Ausnutzung der Sonnenenergie entwickeln und fertigen wir eine breite Palette hochzuverlässiger und leicht zu installierender Wechselrichter für den Netzanschluss.

Wir machen Sonnenenergie nutzbar.

Besuchen Sie uns auf der:

Lyon Salon des Energies Renouvelables	25-28 Feb
Bad Staffelstein OTI Symposium	4-6 März
Verona Solar Expo	7-9 Mai
Madrid Genera	12-14 Mai
Munich Intersola	27-29 Mai



Ingeteam

solar.energy@ingeteam.com

www.ingeteam.com

Avda. Ciudad de la Innovación, 13 - E-31621 Sarriguren Spain - Tel. +34 948 288 000