

# Errichtung von netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen

W. Knaupp, Stuttgart

**Eigenerzeugungsanlagen nutzen alternative, erneuerbare Energiequellen wie Wind [1], Wasser, Sonnenstrahlung. Erzeuger kleinerer Leistung speisen direkt in das Niederspannungsnetz der Energieversorgungsunternehmen (EVU) ein. Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen verzeichneten im Gegensatz zu anderen Elektroinstallationen in den beiden letzten Jahren zweistellige Zuwachsraten. Ursache dafür waren vor allem finanzielle Anreize des Staates sowie damit gekoppelte Förderprogramme einzelner Bundesländer und EVU. Mit dem von der Bundesregierung angekündigten 100.000-Dächer-Programm dürfte die Installation einer PV-Anlage künftig für jeden Bauherrn finanzierbar sein. Der nachstehende Beitrag knüpft an einschlägige EP-Veröffentlichungen an und behandelt auch Probleme der Netzanbindung.**

## 1 Prinzipieller Aufbau

Insbesondere kleine dachmontierte Photovoltaik(PV)-Anlagen haben in den letzten Jahren aufgrund ihrer einfachen Struktur sehr an Bedeutung gewonnen. Die Nutzung von Hausdächern zur Aufständerung von PV-Anlagen ist aufgrund der damit möglichen Doppelnutzung und geringen zusätzlichen Aufstellungskosten vor allem für Privatleute eine attraktive Lösung.

Die schematische Struktur einer netzgekoppelten photovoltaischen Kleinanlage ist in Bild 1 dargestellt. Die Leitungen der einzelnen Photovoltaik-Module werden im Generatoranschlußkasten zusammengefaßt, der auch entsprechende Schutzdioden und Überspannungsschutzeinrichtungen enthalten kann. Die Umformung des Gleichstroms in Wechsel- oder Drehstrom erfolgt durch einen Wechselrichter. Die Energie wird dann in das NS-Netz des jeweiligen Energieversorgungsunternehmens (EVU) eingespeist. Dieser Umformer kann zum Überbrücken sonnenschwacher Perioden mit einer Batterie gepuffert werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden verschiedene Aspekte zum Aufbau und zur Errichtung dieser Anlagen erläutert.

## 2 Anforderungen für die Inbetriebnahme von Photovoltaik-Anlagen

### 2.1 Vorschriften

Die netzgekoppelte Photovoltaik-Anlage ist so zu errichten, daß sie für den Parallel-

betrieb mit dem Netz des EVU geeignet ist. Störende Rückwirkungen auf das EVU-Netz oder andere Kundenanlagen müssen ausgeschlossen werden können [2]. Der Anschluß an das Netz ist im einzelnen mit dem EVU abzustimmen. Das EVU kann zudem Änderungen und Ergänzungen an zu errichtenden oder bestehenden Anlagen fordern, soweit dies eine sichere und störungsfreie Versorgung erfordert. Die Einbindung der Photovoltaik-Anlage in das Netz des EVU hat ein eingetragener Installateur – unter Beachtung des nach den „Technischen Anschlußbedingungen“ (TAB) des jeweiligen EVU üblichen Anmeldeverfahrens – vorzunehmen.

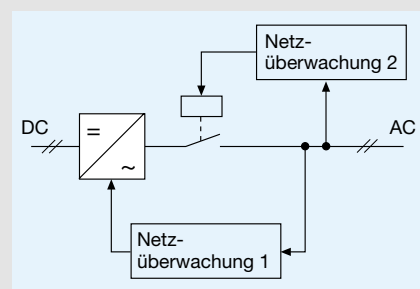
### 2.2 Anlagentechnische Anforderungen

Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen dürfen zur Begrenzung von Spannungssymmetrien nur bis zu einer Summenleistung von 5 kWp ( $p = \text{peak}$ ) an einen Außenleiter angeschlossen werden. Der Anschluß der Anlage erfolgt über eine dem EVU-Personal jederzeit zugängliche Schaltstelle mit Trennfunktion, die in bestimmten Konfigurationen entfallen kann. Bei netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen, die über nicht inselbetriebsfähige Wechselrichter nur in einen Außenleiter

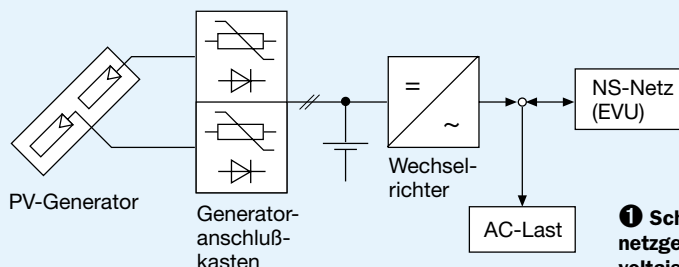
einspeisen und die eine dreiphasige Spannungsüberwachung zwischen den Außenleitern aufweisen, ist die oben genannte Schaltstelle ebenfalls entbehrlich. Art und Anzahl der erforderlichen Meßeinrichtungen (EVU-Zähler) und Steuergeräte (Tarifschaltgeräte) richten sich nach den Vertragsverhältnissen für den Strombezug und die Stromlieferung. Im allgemeinen werden jeweils getrennte Zähler für den Bezug und die Lieferung vorgesehen. Die Zähler sind mit einer Rücklaufsperrung ausgestattet. Sie werden mit unterschiedlicher „Blickrichtung“ in Reihe geschaltet, um eine getrennte Saldierung nach Bezug und Lieferung zu ermöglichen (Bild 2).

Weiterhin ist eine Schalteinrichtung auf der Wechselstromseite des Wechselrichters vorzusehen, die allpolig eine mechanische Netztrennung bewirkt (Kuppelschalter). Bei Unterbringung im Gehäuse des Wechselrichters darf die Schalteinrichtung durch einen Kurzschluß im Wechselrichter nicht unwirksam werden. Der Nachweis für die Kurzschlußfestigkeit der gesamten elektrischen Anlage ist vom Betreiber zu erbringen.

Zum Schutz der eigenen und anderer Kundenanlagen ist in Wechselrichtern eine Spannungsüberwachung erforderlich, die nur ein Spannungsfenster von 0,8 bis 1,1 der Nennspannung zuläßt [1]. Bei nicht inselbetriebsfähigen, einphasigen Wechselrichtern mit einem Netzanschluß ohne jederzeit zugängliche Schaltstelle ist der Spannungs-



2 Schematische Darstellung der einphasigen selbsttätig wirkenden Freischaltstelle mit zwei voneinander unabhängigen Einrichtungen zur Netzüberwachung mit jeweils zugeordnetem Schaltorgan in Reihe (ENS)



1 Schematische Struktur netzgekoppelter photovoltaischer Kleinanlagen

Autor

Dr.-Ing. Werner Knaupp ist Fachgebietsleiter der Photovoltaischen Anlagentechnik am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Stuttgart.



rückgangsschutz dreiphasig auszuführen und zwischen den Außenleitern anzuschließen.

Eine weitere Möglichkeit, auf die ständig durch das EVU zugängliche Schaltstelle zu verzichten, besteht im Einsatz einer einphasigen, selbsttätig wirkenden Freischaltstelle mit zwei voneinander unabhängigen Einrichtungen zur Netzüberwachung mit jeweils zugeordnetem Schaltorgan in Reihe (ENS) (Bild 2).

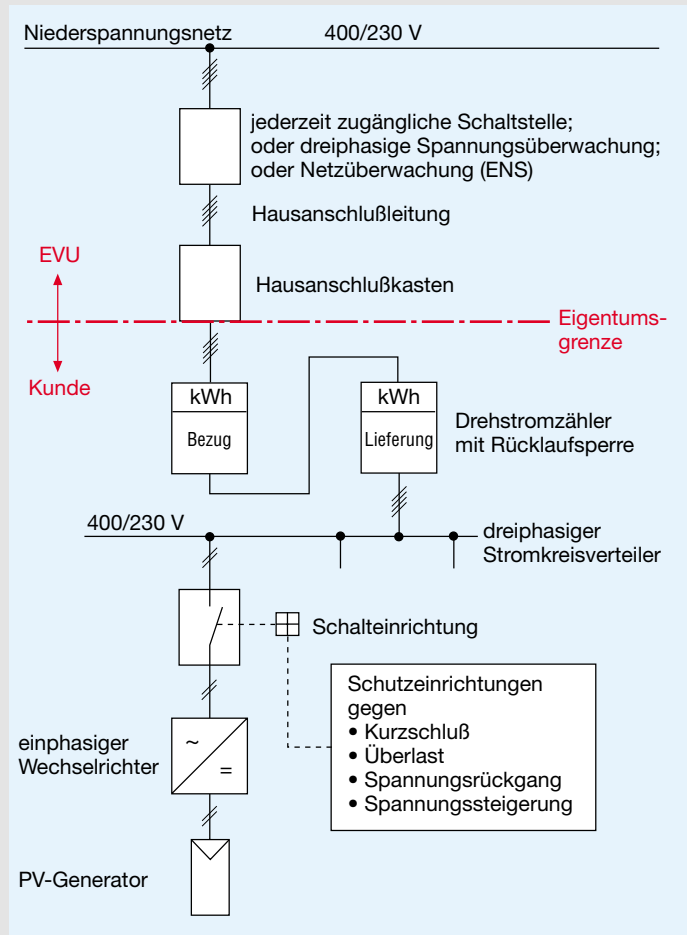
Der Leistungsfaktor einer Kundenanlage mit Eigenerzeugungsanlage soll bei Wirkleistungsbezug und -lieferung im Bereich von 0,9 kapazitiv und 0,8 induktiv liegen. Selbstgeführte Wechselrichter haben im allgemeinen einen geringen Blindleistungsbedarf, so daß eine Blindleistungskompensation nicht erforderlich ist. Netzgeführte Wechselrichter erzeugen dagegen prinzipbedingt Blindleistung. Deshalb ist ggf. eine Kompensation vorzusehen. Häufig wird jedoch in Absprache mit dem EVU auf eine Blindstromkompensation bei solchen Kleinanlagen (< 5 kWp pro Außenleiter) verzichtet.

Um Störungen der Betriebsmittel des EVU und anderer Kundenanlagen zu verhindern, sind Netzurückwirkungen von Wechselrichtern zu begrenzen. Die Verträglichkeitspegel von Störgrößen für Niederspannungsnetze, zulässige Spannungsschwankungen, Flicker und Grenzwerte von Oberschwingungsströmen sind in den DIN VDE bzw. EN-Normen festgehalten. Insbesondere in DIN VDE 0838 (EN 60555) Teil 2 und 3 sowie DIN VDE 0839 teil 1.

Ein wichtiger Punkt sind die Rückwirkungen auf Tonfrequenz-Rundsteueranlagen. Diese arbeiten üblicherweise mit Frequenzen zwischen 100 und 1000 Hz. Die örtlich verwendete Rundsteuerfrequenz kann beim EVU erfragt werden. Der Sendepiegel der Tonfrequenzimpulse liegt bei etwa 1 bis 4 % der Nennspannung. Damit es nicht zu Störungen der Tonfrequenz-Rundsteueranlagen kommt, darf der Wechselrichter die Tonfrequenzspannung am Verknüpfungspunkt um nicht mehr als 15 % absenken und um 50 % anheben. Diese Werte gelten unter der Voraussetzung, daß nicht mehr als zwei Eigenerzeugungsanlagen mit maximal je 10 % der Bemessungsleistung des Ortsnetztransformators im Niederspannungsnetz einer Ortsnetzstation angeschlossen werden.

Auf dem Antrag zur Inbetriebsetzung der netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage ist vom eingetragenen Installateur die Ausführung gemäß den geltenden Vorschriften und Richtlinien zu bestätigen. Bei der Aufnahme des erstmaligen Parallelbetriebs erfolgt neben einer visuellen Überprüfung der Anlage eine Funktionsprüfung der Schutzeinrichtungen unter realen Bedingungen oder durch Simulation mit entsprechenden Prüfgeräten. Ferner werden die

**3 Konfiguration einer netzgekoppelten PV-Anlage mit einphasiger Einspeisung (Parallelbetrieb)**



Schutz-einrichtungen auf die Einhaltung vorgegebener Auslösezeiten für verschiedene Betriebsverhältnisse geprüft.

Der Betreiber einer Eigenerzeugungsanlage ist zu einer ordnungsgemäßen Betriebsführung verpflichtet. Die Anlage ist in einem technisch einwandfreien Zustand zu halten. Sie muß mindestens alle drei Jahre auf Funktionstüchtigkeit der Schalter und Schutz-einrichtungen geprüft werden. Das Ergebnis ist in einem Prüfprotokoll einzutragen. Dieses soll die Möglichkeit der fortschreitenden Prüfung aufweisen. Beim Einsatz einer Netzüberwachungseinheit (ENS) wird aufgrund ihrer redundanten Ausführung auf eine Wiederholungsprüfung verzichtet.

In Bild 3 ist eine mögliche Ausführung einer netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage dargestellt. Die Schutz- und Schalteinrichtungen können auch im Wechselrichter eingebaut sein.

### 3 Netzgekoppelte Wechselrichter

#### 3.1 Sicherheitsanforderungen

Mit dem Eingangsspannungsbereich eines Wechselrichters wird die Systemspannung des Solargenerators festgelegt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß noch nicht alle Photovoltaikmodule in schutzisolierter Ausführung erhältlich sind. Eine einfache Basisisolierung verhindert das direkte Berühren spannungsführender Teile. Trotzdem ist sie nicht in jedem Fall ein ausreichender Schutz bei indirektem Berühren.

Als Schutzmaßnahmen gegen indirektes Berühren ist gemäß DIN VDE 0100 eine der folgenden Maßnahmen zulässig:

- Verwendung von Modulen der Schutzklasse 2 (teilweise verfügbar),
- Begrenzung der PV-Generatorspannung auf Werte unter 120 VDC bei gleichzeitiger sicherer elektrischer Trennung des Solargenerators durch den Wechselrichter vom Netz (Funktionskleinspannung),
- Unterbringung des Generators und aller möglicherweise spannungsführenden Teile innerhalb eines für elektrotechnische Laien nicht zugänglichen Bereichs (elektrischer Betriebsraum).

Bei der Funktionskleinspannung als Schutzmaßnahme ist ein Wechselrichter mit sicherer elektrischer Trennung zwischen Netz und Solargenerator zu wählen. Das bedeutet, daß der Wechselrichter einen Sicherheitstrenntransformator nach DIN VDE 0551 besitzen muß. Der übrige Aufbau des Wechselrichters muß zur sicheren elektrischen Trennung entsprechend DIN VDE 0558 ausgeführt sein. Der Eingangsspannungsbereich muß für einen Solargenerator konzipiert sein, dessen Leerlaufspannung 120 VDC nicht überschreitet.

Sind die Bedingungen für eine Funktionskleinspannung nicht erfüllt, ist die Anlage ausschließlich innerhalb eines elektrischen Betriebsraumes zu betreiben. Funktionskleinspannung ist auch dann nicht gegeben, wenn ein PV-Generatorstrang mit geerdeter Mittelanzapfung verwendet wird, um



die Spannung gegenüber Erde auf max. 120 VDC zu begrenzen. Ein Solargenerator mit z. B.  $\pm 120$  VDC führt auf den Außenleitern eine Spannung von 240 VDC. Dennoch sollte man bei der Wahl der Systemspannung nicht sofort Werte über 120 VDC ausschließen. Bei größeren Leistungen oder langen Kabelstrecken ist eine höhere Systemspannung aufgrund der kleineren Ströme durchaus sinnvoll. Die stromabhängigen Verluste im Wechselrichter oder in der Verkabelung lassen sich dadurch mit vertretbarem Aufwand begrenzen.

### 3.2 Netzkonforme Einspeisung

Um die Anforderungen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen bezüglich einer netzkonformen Einspeisung zu erfüllen, sind bei der Geräteauswahl die folgenden Punkte zu beachten (siehe auch Abschnitt 2.2) [2]:

#### Netzurückwirkungen (DIN VDE 0838, Teil 2 und 3)

Als Nachweis über die Einhaltung der Vorschriften gilt eine entsprechende Konformitätserklärung des Herstellers. Diese Erklärung wird mittlerweile von nahezu jedem Hersteller gegeben. Die Einhaltung kann als Stand der Technik betrachtet werden.

Die Grenzwerte der Oberschwingungen in DIN VDE 0838 lassen zum Teil recht be-

achtliche Anteile der Oberschwingungen im Einspeisestrom zu. Demzufolge variieren die Stromverläufe der einzelnen Geräte vom nahezu sinusförmigen Verlauf mit nur wenigen Prozent Klirrfaktor bis zu eher rechteck- oder trapezförmigen Strömen stark.

#### Schutzeinrichtungen

Die Netzspannung jeder Phase, in die eingespeist wird, muß auf Unter- oder Überspannung überwacht werden. Bei Nichteinhalten definierter Spannungsgrenzen ist der Wechselrichter allpolig galvanisch vom Netz zu trennen. An das Lastschaltvermögen und die Sicherheit der Schaltstelle werden insbesondere die Anforderungen der Kurzschlußfestigkeit gestellt, da die Schaltstelle auch bei Überlast und Kurzschluß des Wechselrichters betätigt werden muß. Ist der Wechselrichter nicht für Inselbetrieb vorgesehen, kann die Schaltstelle im Wechselrichter untergebracht werden. Ein Einbau einer VDEW-gemäßen Schaltstelle durch den Hersteller ist die einfachste Lösung. Sie wird deshalb von vielen Herstellern angeboten. Unter Inselbetrieb wird hier die gewollte Versorgung des Hausnetzes durch den Wechselrichter bei Netzausfall oder Abschaltung verstanden. Die Energie wird entweder direkt aus dem Solargenerator oder aus einer Batterie be-

zogen. Bei dieser Geräteausführung ist die Schaltstelle unabhängig vom Wechselrichter zu installieren.

Ein dreiphasiger Wechselrichter mit dreiphasiger Netzüberwachung sowie ein einphasiger Wechselrichter mit einphasiger Netzüberwachung gelten im Sinne der VDEW-Vorschriften als Inselbetriebsfähig im Sinne einer ungewollten Ausbildung eines Inselnetzes bei Netzabschaltung. Die jederzeit zugängliche Trennstelle oder eine dreiphasige Spannungsüberwachung bei einphasiger Einspeisung oder der Einsatz einer Netzüberwachungseinheit (ENS) ist in diesen Fällen vorgeschrieben.

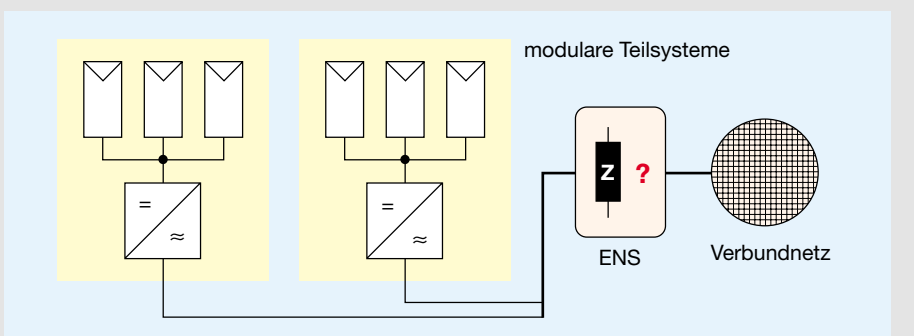
### 3.3 Überlastschutz des Wechselrichters

Ein geregelter Überlastschutz des Wechselrichters hat zunächst die Aufgabe, eine thermische Überbeanspruchung durch Überlastung zu verhindern. Es bietet sich damit zusätzlich die Möglichkeit, einen Solargenerator mit größerer Nennleistung als die Wechselrichternennleistung anzuschließen.

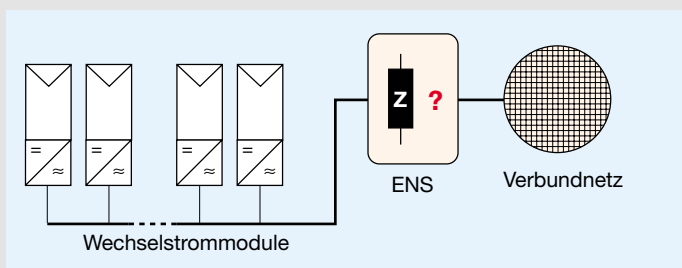
Eine Überdimensionierung des Solargenerators besitzt in der Regel den Vorteil, daß dann der Wechselrichter länger in Teillastbereichen mit höheren Wirkungsgraden betrieben werden kann. Daraus resultiert ein höherer Jahreswirkungsgrad. Der tatsächlich erzielbare Zugewinn hängt ab von den Punkten

- Standort (Verteilung der Bestrahlungsstärke und DC-Leistung),
- Nutzungsgrad des Photovoltaik-Generators und
- Verlauf des Umwandlungswirkungsgrads des jeweiligen Wechselrichters.

Dieses bedarf einer sorgfältigen Abwägung. Der Überlastschutz geschieht i.d.R. durch eine Eingangsleistungsbegrenzung, indem der Arbeitspunkt des Solargenerators aus dem Punkt maximaler Leistung verschoben wird. Die Leistungsreduzierung ist entweder von der Gerätetemperatur oder vom Eingangstrom abhängig.



4 Modulare Teilsysteme mit modularorientierten Wechselrichtern für DC-seitige Parallelschaltung von PV-Modulen (betriebsfähig ab einem PV-Modul)



5 Modularer Anlagenaufbau mit modulintegrierbaren Kleinwechselrichtern (Wechselstrom-Solarmodule)

6 Wechselstrom-Solarmodul: Photovoltaik-Modul mit einem in die Anschlußdose integrierten Wechselrichter (Entwicklung/Foto: ZSW)



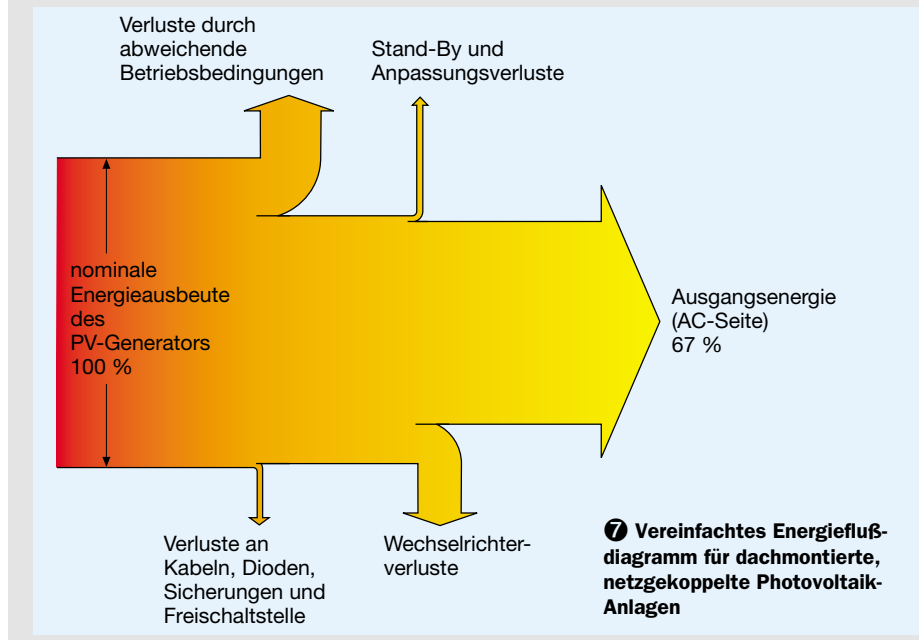


#### 4 Anlagenkonfigurationen

In den vergangenen Jahren wurden Photovoltaik-Generatoren für Kleinanlagen, aber auch zum Erzeugen großer Leistungen in der Regel durch geeignete Serien- und Parallelschaltung von 'Standardmodulen' ( $\approx 0,5$  bis  $1 \text{ m}^2$  Fläche, alle Solarzellen aus kristallinem Silizium in Serie verschaltet, Spitzenleistung 50...110 W) realisiert. In der Zwischenzeit sind sehr viele verschiedene Ausführungsformen (z.B. semitransparent, farbige Solarzellen) von PV-Modulen kommerziell erhältlich (siehe Seite 92). Einzelmodule reichen bis zu einer Spitzenleistung von weit über 200 Watt mit verschiedenen Spannungs- und Stromebenen. Daraus folgen z.T. beträchtliche Einsparungen bei den Kosten für Befestigungen und Verkabelungen. Rahmenlose Ausführungen erlauben zudem eine Integration in vorhandene Befestigungssysteme. Verschiedene Firmen bieten kundenspezifische Ausführungen von PV-Modulen an. Sie eignen sich für Anwendungsbereiche wie Abschattungslamellen, Kalt- und Warmfassadenelemente (siehe auch [3]).

Die Qualität der Einzelkomponenten verbesserte sich in den letzten Jahren kontinuierlich. Die Planung, Dimensionierung und Installation wird vor allem durch Spezialfirmen vorgenommen. Dies hatte seinen guten Grund, da sich z.B. durch ungenügende Berücksichtigung standortspezifischer Randbedingungen, wie Teilabschattung durch Bewuchs oder andere Gebäude, die Energieausbeute drastisch reduziert. Diese Situation führt zu einer zunehmenden Modularisierung der Systemtechnik. Es gibt bereits modulare Konfigurationen netzgekoppelter Anlagen, die schon mit einem einzigen PV-Modul betrieben werden können. Das sind zum einen PV-Systeme mit modulorientierten Wechselrichtern und DC-seitiger Parallelschaltung (Bild 4) und zum anderen mit modulintegrierten Wechselrichtern (Bilder 5 und 6). Durch die elektrische Entkopplung auf der Gleichspannungsseite lassen sich mögliche Verluste durch teilweise Abschattungen minimieren. Der Planer hat damit bezüglich des (elektrischen) Layouts sehr viele Freiheitsgrade. Desweiteren kann die Installation in konventioneller Wechselstromtechnik erfolgen.

Eine Bewertung der unterschiedlichen Konzepte erfordert eine Detailbetrachtung der Anlagenkonfigurationen mit ihren Einzelkomponenten. Insbesondere stehen Fragen des Systemwirkungsgrades, der Empfindlichkeit gegenüber ungleichmäßiger Ausrichtung und teilweisen Abschattungen, der Gesamtkosten und des Wartungsaufwandes im Vordergrund.



#### 5 Ergebnisse und Betriebserfahrungen

In der Zwischenzeit liegen aus einer Vielzahl von netzgekoppelten PV-Anlagen detaillierte Ergebnisse vor.

Die mittlere Energieausbeute beträgt für Deutschland etwa  $700 \text{ kWh}/(\text{kWp} \cdot \text{a})$ . Maximale Erträge von etwa  $800 \text{ kWh}/\text{kWp}$  liefern im Mittel die PV-Anlagen in Baden-Württemberg. Die solare Deckungsrate (Verhältnis des erzeugten Solarstromes zum Gesamtstromverbrauch) betrug bei den untersuchten Anlagen etwa 50 %. Mit einer 5 kWp PV-Anlage kann in der BRD der durchschnittliche Jahresstromverbrauch eines Haushalts gedeckt werden. Das Verhältnis Nennleistung des Wechselrichters zu Nennleistung des PV-Generators liegt abhängig vom Standort und Wechselrichtercharakteristik sinnvoll im Bereich von 0,8 bis 1,0.

Die Statistik bisher registrierter Ausfälle weist überwiegend den Wechselrichter als Ursache aus. Dies ist von besonderer Bedeutung, da bei herkömmlichen Anlagen damit in der Regel ein völliger Ausfall der Anlage einhergeht. Neben den schon guten technischen Kennwerten der Wechselrichter kommt der weiteren Verbesserung der Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle zu. Zu den Ursachen für geringe Anlagenenerträge gehören vor allem die nicht zutreffenden Nennleistungsangaben der PV-Module seitens der Hersteller und die partiellen, saisonalen Abschattungen des PV-Generators durch die Umgebung (Gebäudeteile, Bäume, etc.). Datenblatt- und Typenschildangaben bei PV-Modulen werden durch die Einführung der Vornorm DIN 40025 zukünftig transparenter und praxisgerechter angegeben. Einbußen durch Abschattungen können jedoch nur durch sorgfältige Platzierung und geeignete elektrische Verschaltung der einzelnen Module oder durch Einsatz von modulintegrierten Wechselrichtern minimiert oder vermieden werden.

Zur Beurteilung von Photovoltaikanlagen bewährte sich die errechnete Qualitätsgröße Performance Ratio (PR), da sie in unseren Breiten im wesentlichen standortunabhängig ist (nur die standortabhängige mittlere Luft- bzw. daraus resultierende Modultemperatur beeinflusst, allerdings vernachlässigbar, das Ergebnis). Die Performance Ratio ist das Verhältnis von umgewandelter bzw. genutzter Energie zum nominellen Energiertrag entsprechend der Gleichung:

$$PR = \frac{E_{ges,AC}}{H_{ges,POA} \cdot \eta_{STC}} \cdot 100\%$$

In der Definitionsgleichung stellt  $E_{ges,AC}$  bei netzgekoppelten Anlagen die umgewandelte elektrische Energie auf der Wechselspannungsseite,  $\eta_{STC}$  den Wirkungsgrad bei Standardtestbedingungen und  $H_{ges,POA}$  die in der Generatorebene auftreffende Strahlungsenergie dar.

Das Energieflußdiagramm in Bild 7 bildet damit genau die Definition der Performance Ratio ab. Typische dachmontierte Anlagen erreichen bisher Werte von 65 bis 73 %. Mit einer guten Planung und sorgfältig aufeinander abgestimmten Komponenten sind bei kleinen dachmontierten Anlagen mit hoher Zuverlässigkeit und langer Lebensdauer bereits PR-Werte von über 80 % erreichbar.

#### Literatur

- [1] Doemeland, W.: Windenergieanlagen aus der Sicht der Energieversorgungsunternehmen. Elektropraktiker, Berlin 53(1999) 1, S. 46 - 49.
- [2] Richtlinie für den Parallelbetrieb von Eigenzeugungsanlagen mit dem Niederspannungsnetz des Elektrizitätsunternehmens (EVU). Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke - VDEW - e.V., (Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke, Frankfurt), 3. Auflage, 1991, (Nachdruck 1996).
- [3] Kabisch, H.: Innovationen senken den Energiebedarf. Elektropraktiker, Berlin 53(1999)1, S. 6 - 8