Photovoltaik-Anlagen an Gebäuden

W. Knaupp, Stuttgart

Die Zahl der Photovoltaik-Anlagen im Gebäudebereich verzeichnet stetig hohe Zuwachsraten. Hier stellt die Nutzung von Dächern, Fassaden, Fenstern aufgrund der möglichen Doppelfunktion und geringeren zusätzlichen Aufstellungskosten eine attraktive Lösung sowohl im Privat- als auch im Gewerbebereich dar. Der nachstehende Beitrag knüpft an EP-Veröffentlichungen an [1] und zeigt exemplarisch mögliche Realisierungen von Dach- und Fassadenanlagen mit ihren systemtechnischen Besonderheiten und den zu erwartenden Energieerträgen.

1 Einleitung

Die Einbeziehung von Photovoltaik-(PV-)-Anlagen in den Gebäudebereich hat viele Vorteile. Die Nutzung von Gebäuden und anderer Infrastruktur zum Aufbau von PV-Anlagen vermeidet im Gegensatz zur Aufstellung im freien Feld weiteren Landschaftsverbrauch. Auf geeigneten Dachflächen könnten in Deutschland PV-Anlagen mit einer Nennleistung von 30 GW_p [1)] ohne zusätzlichen Netzspeicherbedarf und bei voller Ausschöpfung der geeigneten Dachflächen bis zu 90 GW_p installiert werden [2]. Die Distanzen von der Energieumwandlung bis zum Verbraucher sind sehr kurz, die Generatorgröße kann in Grenzen variabel dem Verbrauch angepaßt werden. Damit sinken Leitungs- und Energieverteilungsverluste.

Bei Integration der Photovoltaik-Anlagen in die Gebäude, z. B. als Fenster-, Wand- oder Fassadenelement, können darüber hinaus z. T. beträchtliche Kosten für die dadurch nicht notwendigen konventionellen Bau- und Konstruktionsteile (Ziegel, Fenster etc.) eingespart werden. Photovoltaik-Module finden durch ihre kommerziell verfügbaren Ausführungsformen (semitransparent, farbige Solarzellen) auch als architektonisches Gestaltungselement zunehmend Interesse.

In einem vorhergehenden Beitrag [1] wurde bereits die Errichtung von netzgekoppelten PV-Anlagen erläutert. Die nachfolgenden Ausführungen zeigen Möglichkeiten und Besonderheiten bei der Einbeziehung von Photovoltaik-Anlagen in den Gebäudebereich.

Autor

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

2 Photovoltaik-Anlagen im Dachbereich

Die zur Zeit noch häufigste Form des Aufbaus von Photovoltaik-Anlagen stellt die nachträgliche Aufdachmontage dar. Dazu sind am Markt viele Lösungen verfügbar: Sie reichen von entsprechend gestalteten Dachhaken bis zu Ziegeln mit integrierten Halterungen (Bild ❶), an denen eine Unterkonstruktion befestigt wird. Bild ❷ zeigt ein ausgeführtes Beispiel einer Hausanlage in Aufdachmontage.

Es ist ebenfalls möglich, mit rahmenlosen Modulen (sog. Laminaten) und einem zusätzlichen Profilsystem zu arbeiten. Bei geschlossenen, großen Generatorflächen sollte noch auf eine ausreichende Hinterlüftung zur Erzielung einer hohen Energieausbeute geachtet werden (siehe Abschnitt 4).

Elegante Lösungen lassen sich bei der Integration der PV-Module in die Dachhaut erzielen. Auf das typische Ziegelrastermaß abgestimmte kommerzielle Ausführungen von sogenannten „PV-Ziegeln" bieten mehrere Dachziegelhersteller an. Die Varianten reichen dabei von kleinen Teilmodulen, die in entsprechend vorbereitete Tonziegel eingeklinkt werden, über Faserzementplatten mit integrierten Solarzellen bis hin zu großflächigen Einheiten.

Für die elektrische Verkabelung von PV-Modulen ohne separate Anschlußdose haben sich die Ausführungen mit „Multi-Contact"-Steckern dabei als Quasistandard etabliert.

Besonders vorteilhaft erfolgt die Integration der Photovoltaik bei Sheddächern von Gewerbegebäuden. Sheddächer sind in der Regel nach Süden orientiert und verschattungsfrei. Durch Variation des Abstandes der Solarzellen im Modul und Integration von ggf. streuenden Folien kann die durchgelassene Helligkeit beeinflußt werden. Bild ❸ zeigt eine Sheddachausführung mit PV-Modulen in der Innenansicht.



❶ **Solarträger-System: Eigengewicht, Winddruck und Sogkräfte werden durch direkte Verschraubung mit der Lattung auf das Dach übertragen**
Foto: Klöber GmbH &Co KG Ennepetal



❷ **Aufdachmontage von PV-Modulen auf einem Ziegeldach** Foto: Archiv ZSW

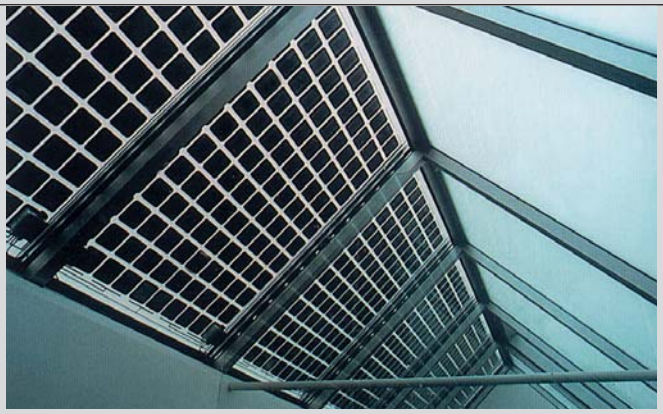
3 Photovoltaik im Fassadenbereich

Fassaden stellen bei Gebäuden das Bindeglied zwischen dem Innenbereich und der äußeren Umgebung dar. Sie haben dadurch eine Reihe von Aufgaben zu erfüllen, die die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der Photovoltaik verdeutlichen. Einige wesentliche Anforderungen an Fassaden sind:

- Schutz gegen Feuchtigkeit, Regen, Schnee, Eis und Hagel
- Verhinderung schneller Auskühlung und Überhitzung
- Regelung und Kontrolle des einfallenden Lichtes
- Stabilität und Fähigkeit, Lasten aufzunehmen
- Verringerung mechanischer oder chemischer Beschädigungen
- Schutz gegen Lärm und Staub
- Feuerschutz und Sicherheit gegen Vandalismus
- Wartungsfreiheit und Langlebigkeit
- Gestaltungsmöglichkeiten der Form, Farbe und Oberflächenbeschaffenheit.

Man erkennt an der obigen Aufzählung, daß Photovoltaik-Module in ihrer Aus-

1) Der Index „p" (peak) verweist darauf, daß die Nennleistung sich auf folgende Meßbedingungen bezieht: 1000 W/m² Bestrahlungsstärke in der Modulebene (klarer, sonniger Tag), 25°C Modultemperatur und eine Spektralverteilung des Sonnenlichtes entsprechend der Norm EN 60904-3.



❸ **Sheddach mit PV-Modulen (Innenansicht)**
Foto: TNC Consulting AG, Männedorf



❹ **PV-Fassadenelemente als Brüstungselemente**
Foto: *W. Knaupp*



❺ **Vorkonfektionierte Photovoltaik-Fassadenelemente in Isolierglasbauweise als Außenwand** Foto: TFM S.A., Barcelona

führung, z. B. als Glas-Glas-Konstruktion, bereits einige Bedingungen erfüllen. Der Einsatz als Warmfassadenelement bedarf jedoch zur Einhaltung der Wärmeschutzverordnung der Kombination mit einem Isolierglas, um entsprechend niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Werte) zu erreichen. Standard-Glas-Glas-Module haben nämlich nur einen k-Wert im Bereich von 5 W/(K·m^2).
Für Fassadenanwendungen werden PV-Module bis zu einer Fläche von etwa 4 m^2 gefertigt. Die Module lassen sich in Einscheiben-Sicherheitsglas-(ESG)-, Verbund-Sicherheitsglas-(VSG)- und Isolierglasverbundausführungen z. B. gut in Pfosten-Riegel-Konstruktionen integrieren. Die Kabelführung erfolgt entweder direkt am Gebäude oder in speziellen Pfosten-Riegel-Profilen. Generell kommen für PV-Fassadenelemente alle im Zusammenhang mit der Befestigung von konventionellen Glasfassaden erprobten Befestigungssysteme zum Einsatz.

Beim Einsatz von Photovoltaik-Modulen in Fassaden gelten die bei Glasfassaden üblichen Vorschriften. Statische Mindestanforderungen müssen durch entsprechend DIN 18056 errechnete Glasdicken gewährleistet werden. Für die Lastannahmen werden in Deutschland die Werte nach DIN 1055 zugrunde gelegt. Für Überkopfverglasungen sehen die jeweiligen Landesbauordnungen besondere spezifische Anforderungen vor. Die Einordnung von Fassadenelementen in Brandschutzklassen und Feuerwiderstandsklassen ist in den Landesbauordnungen geregelt. Da Photovoltaik-Fassadenelemente in der Regel auch brennbare Substanzen wie Kunststoffe und Harze enthalten, ist eine generelle Einordnung in die Baustoffklasse „nicht brennbar" nicht möglich. Eine Einzelzulassung der PV-Fassade durch das zuständige Bauamt ist ggf. notwendig. Dabei ist auch das gesamte Befestigungssystem mit statischen Nachweisen einzubeziehen.
Beim Einsatz der Photovoltaik in hinterlüfteten Kaltfassaden (siehe Beispiel Brüstungselement im Bild ❹) sind die PV-Module und das dahinterliegende Gebäude thermisch entkoppelt. Die Hinterlüftung führt dabei die von den PV-Modulen absorbierte überschüssige Wärme ab, was zu einer Erhöhung der elektrischen Energieausbeute führt. Bei entsprechender Vorplanung kann diese Wärme z. B. zusätzlich zur Raumluftvorerwärmung genutzt werden. Die Anwendung in Warmfassadenelementen benötigt dagegen keine zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen, da die PV-Module in der Regel als äußerste Schicht in einem Isolierglas eingebettet sind. Dies hat jedoch höhere mittlere Betriebstemperaturen zur Folge. Hier ist zu prüfen, ob alle Komponenten des PV-Moduls (Randversiegelung, Einbettmaterial usw.) für die ggf. auftretenden Spitzentemperaturen von bis zu 90 °C spezifiziert sind.
Für die Gestaltung der Photovoltaik-Fassadenelemente sind in gewissen Grenzen die Farben sowohl der eingesetzten Solarzellen als auch der zusätzlich eingebrachten rückseitigen Folien wählbar. Mit dem Markteintritt der Dünnschichtsolarzellen wird langfristig auch die geometrische Form der Einzelelemente kundenspezifisch realisierbar sein.
Im Bild ❺ ist ein Teil einer multifunktionalen Fassade dargestellt. Großflächige Photovoltaik-Module in Isolierglasbauweise wurden hier am Boden als komplettes Wandelement vorkonfektioniert und anschließend mit dem Kran eingehängt. Die Elemente erfüllen dabei vorteilhaft die Funktionen Außenwand, kontrollierter Durchlaß der Diffusstrahlung und Stromerzeugung durch die Photovoltaik.

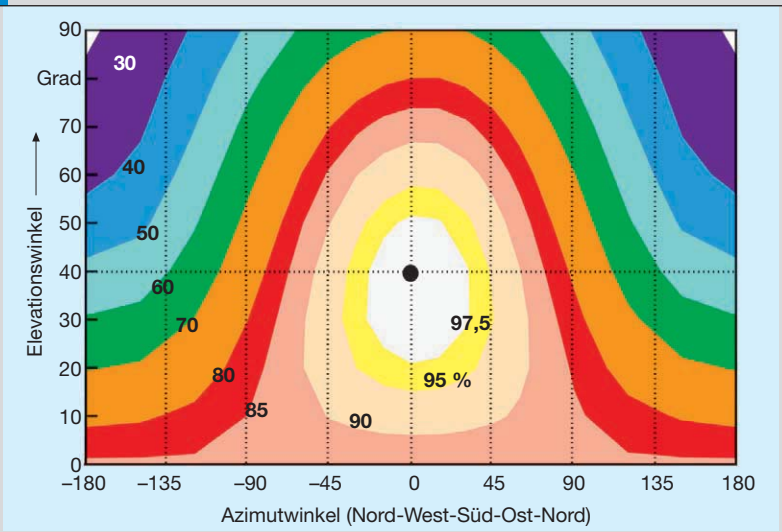
4 Einflußfaktoren auf den Energieertrag bei PV-Anlagen

Es gibt eine Reihe von Faktoren, die den elektrischen Energieertrag von Photovoltaik-Anlagen erheblich beeinflussen können. Zu nennen sind:

- **Auftreffende Bestrahlungsstärke in der Generatorebene**
  Lage und Ausrichtung des Gebäudes
  Orientierung des Generators am Gebäude
  Benachbarte Bebauung und Bepflanzung (Teilabschattung!)
- **Mittlere Betriebstemperatur des Photovoltaik-Generators**
  Montage (Dach, Fassade, Balkon, ...)
  Einbauart (hinterlüftet, Rückseite voll isoliert, ...)
- **Fehlanpassung der einzelnen PV-Module im Strang**
  Streuung der Strom-/Spannungswerte
- **Elektrische Verluste an Kabeln, Sicherungen, Freischaltstellen usw.**
- **Verschmutzung.**

4.1 Orientierung der Generatorfläche

Die Ausrichtung des Gebäudes und die Dachneigung haben Auswirkungen auf die elektrische Energieausbeute. Akzeptiert man einen Minderertrag von 5 % gegenüber der optimalen Jahresenergieausbeute, so sollte die Ausrichtung der Fläche im wesentlichen zwischen Südosten und Südwe-

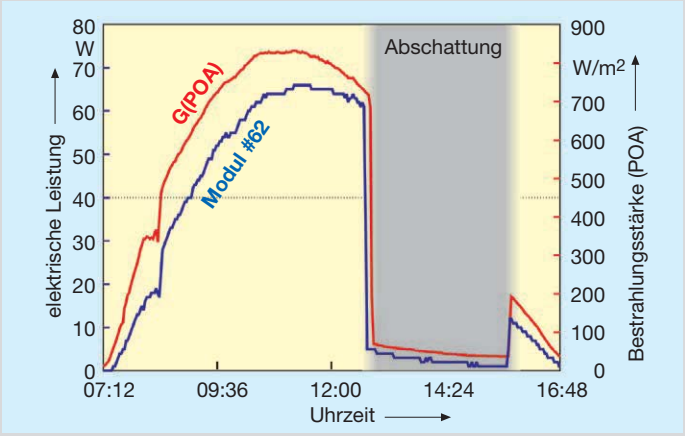


❻ **Verminderter prozentualer Jahresertrag der auftreffenden Strahlungsenergie bei nicht idealer Orientierung**

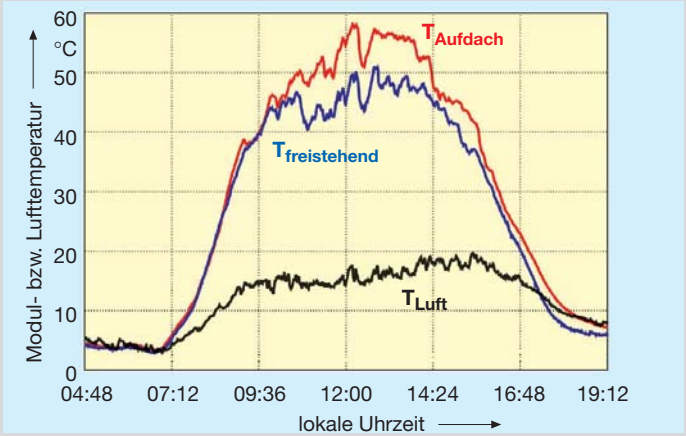


❼ **PV-Fassade mit Wechselstrommodulen**

Foto: *I. Voigtländer*, Chemnitz



❽ **Bestrahlungsstärke- und Leistungsprofil in einer teilabgeschatteten PV-Fassade mit Wechselstrommodulen**



❾ **Verlauf der Modultemperaturen bei freier Aufstellung und bei Aufdachmontage, gleicher Modultyp (Dachstuhl nicht isoliert) [3]**

sten und die Neigung zwischen 15 und 50 Grad sein. Jedoch ist abhängig von der geographischen Lage weiterhin zu bedenken, daß wegen möglicher Verschmutzung und Schneefall die Neigung meist nicht unter 25 Grad gewählt werden sollte.

Der verminderte Jahresertrag der auftreffenden Strahlungsenergie bei nicht idealer Orientierung ist im Bild ❻ abzulesen. Die Grafik ist auf der Basis von gemessenen stündlichen Werten der Global- und Diffusstrahlung (Standort Widderstall, 48. Breitengrad) erstellt. Die Unsymmetrien beruhen auf einem nicht gleichmäßigen Horizontverlauf. Es ist zu beachten, daß die Ausrichtung für maximale Energieausbeute vom Breitengrad abhängt. Sie ist jährlichen Schwankungen unterworfen, je nach der Verteilung der Strahlungsenergie in den einzelnen Monaten (sonniges Frühjahr, verregneter Sommer etc.). In Deutschland liegt der Winkelbereich des in diesem Sinne idealen Anstellwinkels im Bereich von 30 bis 42 Grad.

Der Grafik im Bild ❻ können z. B. Einbußen auf Jahresbasis bei nicht idealer Orientierung (in dieser Grafik 40 Grad Anstellwinkel und südorientiert) entnommen werden:

Orientierung	Einbuße
waagerechte Orientierung *)	≈ 15 %
südorientierte Fassade	≈ 30 %
südwest-/südostorientierte Fassade	≈ 35 %
west- /ostorientierte Fassade	≈ 45 … 50 %

*) ohne Berücksichtigung der ggf. deutlich erhöhten Verschmutzung

4.2 Teilabschattung der Generatorfläche

Teilabschattungen der Generatorfläche durch benachbarte Gebäudeteile oder Bewuchs können abhängig von der gewählten Anlagenkonfiguration (siehe [1]) unterschiedliche Auswirkungen haben. Bei Generatorsträngen mit einer großen Zahl seriell verschalteter Module wirken sich einzelne abgeschattete Solarzellen sehr stark aus. Ohne Schutzdioden (sogenannte Bypass-Dioden) wird der komplette Strang nahezu auf das Niveau der abgeschatteten Solarzelle heruntergezogen. Mit Schutzdioden kann dieser Effekt abgemildert werden; die resultierende Ausbeute hängt von der Art der Arbeitspunkteinstellung des nachfolgenden Wechselrichters ab.

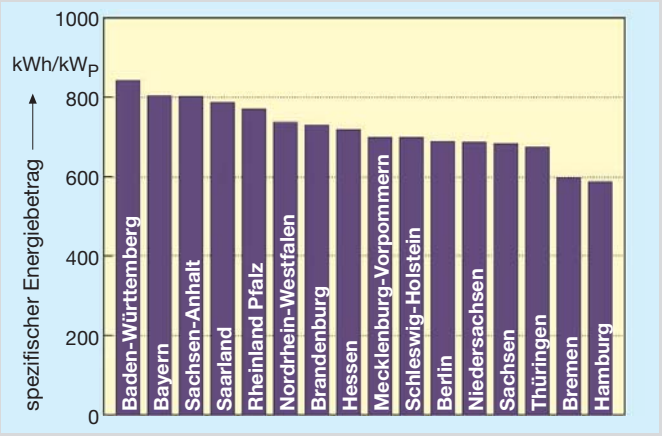
Der Einfluß von Teilabschattungen auf die Leistungsabgabe von PV-Modulen läßt sich an einem Beispiel zeigen. Im Bild ❼ ist die durch ein Nachbargebäude im Winter kurzzeitig abgeschattete Photovoltaik-Fassade mit Wechselstrommodulen zu sehen. Bild ❽ zeigt dazu die Verläufe der Bestrahlungsstärke in der Generatorebene (GPOA) und der elektrischen Leistung eines einzelnen Wechselstrommoduls. Um etwa 12:45 Uhr ist das in diesem Beispiel dargestellte PV-AC-Modul von der Teilabschattung betroffen. Die elektrische Modulleistung sinkt sofort auf etwa 10 % der vorherigen Leistung. In der hier gewählten Anlagenkonfiguration mit AC-Modulen ist der Verlust noch weitgehend minimiert, da sich die Auswirkung der Teilabschattung nur auf die jeweils betroffenen Module beschränkt.

Generell ist zu betonen, daß Teilabschattungen nach Möglichkeit vermieden werden sollten. Hierzu sind bei der Planung nicht nur saisonale Aspekte zu berücksichtigen, sondern vor allem auch, daß z. B. mancher „schattenspendende" Bewuchs von Jahr zu Jahr größer wird. Wenn sich aus übergeordneten baulichen Gründen eine Teilabschattung nicht vermeiden läßt, sollte dann insbesondere eine sorgfältige Aus-



⓫ Abtauender Schnee bei einem dachintegrierten PV-Generator Foto: *W. Knaupp*

⓫ **Spezifische Energieausbeute von 950 dachmontierten netzgekoppelten PV-Anlagen im Jahr 1997 (nach [4])**



arbeitung des Anlagenkonzepts und der elektrischen Verschaltung erfolgen.

4.3 Betriebstemperatur des Photovoltaik-Generators

Die mittlere Betriebstemperatur des installierten Photovoltaik-Generators hängt sehr stark ab von der Einbauart (z. B. hinterlüftet, Rückseite voll isoliert) und der Montageart (Dach, Fassade, Brüstung etc.). Meist weicht sie deutlich von der Typenschildbezugsgröße von 25 °C ab. Als grobe Faustregel gilt bei kristallinen Silicium-Solarzellen: Die Leistung verringert sich gegenüber der Typenschildangabe bei 25 °C um etwa 0,5 % pro 1 K Temperaturerhöhung und erhöht sich bei Temperaturen unter 25 °C um den gleichen Betrag.

Die Bestimmung der auftretenden Spitzentemperaturen ist für die elektrische Systemtechnik wichtig. Bei unzureichender Berücksichtigung dieses Sachverhaltes kann es z. B. geschehen, daß die Generatorspannung bei hohen Temperaturen (und damit zu Zeiten hoher Sonneneinstrahlung) aus dem DC-Spannungsbereich des Wechselrichters herauswandert. Der Wechselrichter kann dann nur noch einen Teil der zur Verfügung stehenden Energie umsetzen. Eine schlechte Jahresenergieausbeute wäre die Folge.

Die Kenntnis der auftretenden Betriebstemperaturen ist weiterhin für die Bestimmung der Wechselrichternennleistung im Verhältnis zur Generatornennleistung notwendig, um neben einer energetischen vor allem auch eine ökonomische Optimierung zu realisieren. Der PV-Generator erreicht aufgrund hoher Betriebstemperaturen in der Regel nicht seine Nennleistung. Damit kann die Wechselrichternennleistung sinnvoll im Bereich zwischen 80 und 100 % von der Generatornennleistung gewählt werden. Bei Fassadenanlagen kann je nach Standort (Breitengrad!) die Wechselrichternennleistung teilweise noch geringer gewählt werden.

Die gleichzeitig gemessene Verläufe frei aufgestellter und aufdachmontierter PV-Generatoren (nicht isolierter Dachstuhl) an einem klaren Herbsttag sind im Bild ❾ dargestellt [3]. Die maximale Übertemperatur (Differenz Modultemperatur minus Lufttemperatur) liegt im Bereich von 40 K. Bei dachintegrierten Anlagen mit rückseitiger Vollisolierung erreicht die Übertemperatur Werte über 50 K.

4.4 Fehlanpassung der einzelnen PV-Module im Strang

Bei einer Anlagenkonfiguration mit einem zentralen Wechselrichter (siehe [1]) stellt dieser den Arbeitspunkt für den Gesamtgenerator ein. Diese Einstellung entspricht nur dann einem optimalen Arbeitspunkt für das jeweilige Einzelmodul, wenn die Stromwerte der Module in Serienschaltung und die Spannungswerte der Module bzw. Stränge in Parallelschaltung möglichst wenig streuen. Dies ist bei Modulen aus einer einzigen Fertigungscharge häufig gegeben. Wenn vom Hersteller keine Aussage zu erhalten ist, sollte ggf. entweder eine Sortierung der Module vor dem Einbau erfolgen oder eine Anlagenkonzeption mit AC-Modulen gewählt werden.

4.5 Verschmutzung

Die Verschmutzung des Photovoltaik-Generators oder die unerwünschte Bedeckung mit Schnee stellt aus energetischer Sicht in Mitteleuropa im Prinzip kein gravierendes Problem dar. Die Beeinträchtigung durch Schnee hängt jedoch sehr stark von der Einbauart und den Rahmen- bzw. Profilhöhen bei der Verwendung von Laminaten ab (Bild ❿).

Der Schnee rutscht bei Sonne relativ schnell auf den planen Glasflächen nach unten und staut sich jedoch an der Modulunterseite. In schneereichen Gebieten sollten deshalb sehr niedrige Rahmen- bzw. Profilhöhen zum Einsatz kommen, die ein schnelles Abrutschen des Schnees ermöglichen. Etwas anders stellen sich die Verhältnisse bei Verschmutzung dar. In Mitteleuropa regnet es in der Regel häufig genug, um eine gewisse Selbstreinigung der Generatorflächen zu erreichen. In regenarmen und sehr heißen Regionen stellt sich das Problem bei schräg aufgestellten Flächen mit Staub- und Sandablagerungen auf den Modulen und Energieeinbußen von 10 % und mehr in besonderer Weise. Hier sollte ein Reinigungsplan in die Anlagenbetreuung integriert werden.

5 Energieausbeute

Aus Auswertungen vieler PV-Dachanlagen in Deutschland liegen viele Ergebnisse vor (z. B. [4]). Bild ⓫ zeigt für 950 Anlagen im Jahr 1997 die durchschnittliche jährliche spezifische Energieausbeute, aufgegliedert nach einzelnen Bundesländern. Den maximalen Ertrag lieferten im Mittel die PV-Anlagen in Baden-Württemberg mit 842 kWh/kW$_p$ (Spitzenwerte lagen über 1000 kWh/kW$_p$). Die Unterschiede in der Energieausbeute beruhen im wesentlichen auf den jeweiligen Einstrahlungsverhältnissen, Teilabschattungen (ggf. Horizontverschattungen) und Systemausfällen (Wechselrichter).

Im Mittel zeichnet sich für die gesamte BRD eine Energieausbeute von etwa 725 kWh/(kW$_p$·a) ab. Die solare Deckungsrate (Verhältnis des erzeugten Solarstromes zum Gesamtstromverbrauch) betrug bei den untersuchten Anlagen im Mittel etwa 50 %. In der BRD kann mit einer PV-Anlage von 5 kW$_p$ der durchschnittliche Jahresstromverbrauch der in diesem Meßprogramm beteiligten Haushalte gedeckt werden.

Die Investitionskosten für kleine netzgekoppelte aufdachmontierte Photovoltaik-Anlagen liegen im Bereich von 13.000 bis 18.000,– DM pro installiertes Kilowatt. Zur Kosteneinsparung sind deshalb Anwendungen mit einem Doppelnutzen sehr wichtig, um eingesparte konventionelle Bauelemente (Dachziegel, Fassade, Fenster) anrechnen zu können oder um zusätzliche Systemkosten für z. B. Tragstrukturen zu vermeiden. Es sind jedoch darüber hinaus weitere Anstrengungen zur Kostenreduzierung und zur Steigerung der spezifischen Energieausbeute notwendig.

Literatur

[1] *Knaupp, W.*: Errichtung von netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen. Elektropraktiker, Berlin 53(1999)2, S. 132-138.

[2] *Staiß, F.*: Photovoltaik, Technik – Potentiale – Perspektiven. Wiesbaden: Vieweg-Verlag 1996.

[3] *Knaupp, W.*: Analyse und Optimierung von Photovoltaik-Modulen. Aachen: Shaker-Verlag 1997 (ISBN 3-8265-2501-9).

[4] Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme: 1000-Dächer-Meß- und Auswerteprogramm – Jahresjournal 1997.