



## **Netzwerk Zentralschweiz der Academia Engelberg Solartechnologien – Referat vom 19. März 2009**

### **Vorwort (Oskar G. Loewe)**

#### **Ausgangssituation**

Seit mehr als 100 Jahren steigt der weltweite Energieverbrauch exponentiell an. Das heißt konkret, dass ein Anstieg um 5% eine Verdopplung des Verbrauchs alle 14 Jahre bewirkt. Zwei Gründe sprechen dafür, dass der Energieverbrauch auch in Zukunft stark steigen wird. Einerseits nimmt die Industrialisierung weltweit stetig zu (z. B. China), was zu höherem Energieverbrauch führt.

Andererseits wächst die Weltbevölkerung exponentiell, die Wachstumsrate zeigt steigende Tendenz (die Bevölkerung verdoppelt sich in immer kürzeren Abständen). Daher ist auch mit einem drastischen Anstieg des globalen Energieverbrauchs zu rechnen, mit dem auch, bei Einsatz von fossilen Energieträgern, ein massiver Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre verbunden sein wird.

Selbst wenn heute ein Energiesparprogramm starten würde, welches zu einer Verbrauchsmin- derung von 50% führen würde, wird dieser Effekt durch das exponentielle Wachstum des Verbrauchs innerhalb von 20 Jahren aufgehoben. Zusammengefasst bedeutet dies, dass der globale Energieverbrauch stetig wächst, die derzeit genutzten Ressourcen (fossile Brennstoffe) jedoch nur mehr sehr beschränkt zur Verfügung stehen (Szenarien sprechen von 30 – 90 weite- ren Jahren). Unter diesen Umständen werden in den kommenden Jahren große Änderungen in der gesamten Energieversorgung der Menschheit passieren müssen.

#### **Energie direkt von der Sonne**

Mit Solarenergie bezeichnet man Wärme und Strom, die durch Sonnenlicht erzeugt werden. Die Sonne ist eine dauerhafte und sichere Energiequelle mit einem riesigen Energiepotential, wel- ches den bundesweiten Energiebedarf gewaltig übersteigt. Erneuerbare Energie aus der Sonne ist kostenlos, umweltschonend und beinahe unerschöpflich. Dagegen sind klassische Energie- quellen aus fossilen Brennstoffen wie Erdöl, Kohle und Erdgas nur begrenzt und gering vorhan- den, unwirtschaftlich und zum Teil umweltschädigend. Infolgedessen steigt die Bedeutung der Solarenergie im Bereich der Energieversorgung, insbesondere wegen der Klimadiskussion, immer mehr. Solarenergie ist im Trend, die Branche boomt, die Aktienkurse der Solarunterneh-



men lassen überdurchschnittliche Performances verzeichnen. In Deutschland sind insgesamt etwa 800.000 Solaranlagen installiert.

### **Potential der Solarnutzung im Alpenraum**

Das Potential für den Einsatz von Solartechnologien im Alpenraum ist überragend: Für die Schweiz gilt, dass an einem einzigen wolkenlosen Tag von der Sonne etwa die Energiemenge auf die Fläche der Schweiz gestrahlt wird, die das ganze Land in einem Jahr verbraucht. In Zahlen ausgedrückt heißt das: Die jährliche Einstrahlung auf die horizontale Fläche in der Schweiz beträgt etwa 1300 kWh/m<sup>2</sup>, in Nordafrika etwa 1700-1900 kWh/m<sup>2</sup>.

Das Maximum an Sonneneinstrahlung von 2200 kWh/m<sup>2</sup> wird in Teilen Australiens, Süd- und Zentralafrikas aber auch im Hochalpinen Raum der Schweiz erreicht. Die Schweiz hat durch ihre alpine Lage Vorteile in der Sonnenenergienutzung, da mit zunehmender Höhenlage die Einstrahlungssumme ansteigt. Dazu steigt die Leistungsausbeute kristalliner Solarzellen bei sinkenden Temperaturen von etwa 0,5% pro °C, sowie die reinere Luft und mögliche Schneereflektionen bringen in Alpinen Höhenlagen äußerst günstige Werte, die fast beim doppelten Ertrags liegen, der in der mitteleuropäischen Ebene erzielt wird. Die negativen Umweltauswirkungen der Photovoltaik sind relativ gering. Dies gilt besonders im Vergleich zum Ressourcenverbrauch und zur Emissionsbilanz anderer Energietechnologien. Zusätzliche positive Effekte in der Schweiz sind:

- Hohe gesellschaftliche Akzeptanz (besonders im Vergleich zu Systemen mit fossilen oder nuklearen Energieträgern)
- Dezentrale Erzeugung mit hoher Versorgungssicherheit
- Nutzung eines Energieträgers mit regionaler Wertschöpfung
- Verminderung der wirtschaftlichen Abhängigkeit von Energieimporten und Weltmarktpreisen
- Unterstützung des Umbaus der Wirtschaft und der Beschäftigung im Sinne der Nachhaltigkeit



## **Solartechnologien (Harald F. Hartmann)**

### **Solarthermie**

Als Sonnenkollektoren werden thermische Energiewandler bezeichnet, die die einfallende Sonnenstrahlung in Wärme umwandeln und diese an ein Trägermedium (meist Wasser-Frostschutzgemisch) weiterleiten. Sonnenkollektoren werden zur Brauchwassererwärmung und zur Raumheizung genutzt. Diese Form der Solartechnologie wird nur deshalb erwähnt, weil sie immer wieder mit der Photovoltaik verwechselt wird.

### **Stromerzeugung mit der Kraft der Sonne**

Als Photovoltaik bezeichnet man die **direkte Umwandlung von Licht in elektrische Energie**. Diese sehr umweltfreundliche Art der Energieumwandlung steht unbegrenzt zur Verfügung, denn die Energiequelle ist Sonnenlicht. Darüber hinaus treten im Betrieb weder Lärm- noch Schadstoffemissionen auf und durch die kombinierte Nutzung von Dächern und Fassaden (zur Stromproduktion) wird auch zusätzlicher Platzbedarf vermieden. Aus physikalischer Sicht ist die in Strom umgewandelte Sonnenenergie eine äußerst hochwertige Energieform mit hoher Energie. Das heißt, dass ein hoher Anteil von dieser in jede andere Energieform (mechanisch, chemisch, thermisch) umgewandelt werden kann.

### **Solarstrahlung**

Ein wichtiger Begriff, wenn man von Strahlung spricht, ist die Globalstrahlung. Damit wird die Summe aus direkter Sonnenstrahlung (Strahlung aus der Richtung der Sonnenscheibe) und der diffusen Strahlungsanteile bezeichnet, die durch Reflexion und Streuung in der Atmosphäre auftreten. Bei bedecktem Himmel gibt es keine direkte Einstrahlung. Bei wolkenlosem Himmel beträgt der diffuse Anteil abhängig vom Ort und der Höhenlage mindestens 10-20 %. Der diffuse Strahlungsanteil wird bei der photovoltaischen Stromproduktion genutzt. Bei dicht bedecktem Himmel ergibt sich aber eine starke Leistungsreduktion auf etwa 10% des Maximalwertes, wobei dieser Wert stark anlagenabhängig ist.

### **Grundlagen**

Der photovoltaische Effekt wurde bereits 1839 vom Franzosen E. A. Becquerel entdeckt. Dabei werden in einem mit Fremdatomen versehenen Halbleitermaterial (Grundmaterial Silizium) durch die auftreffenden Photonen des Sonnenlichtes Energiezustände im Halbleitermaterial geschaffen, die eine elektrische Spannung hervorrufen. Werden die beiden Enden der Metallkontakte auf der dünnen Halbleiterscheibe geschlossen, so fließt Strom. Diese Vorgänge werden im folgenden noch detaillierter beschrieben. Die erste wesentliche Voraussetzung für diese Technologie ist der sogenannte Photoeffekt. Lichteinstrahlung (in Form von Photonen) kann



Elektronen aus ihren atomaren Bindungen "herausschlagen". Beim so genannten äußeren Photoeffekt treten Elektronen aus dem Material aus, beim so genannten inneren Photoeffekt, der in Halbleitermaterialien auftritt, entstehen dadurch freie Ladungsträger.

Alle Feststoffe lassen sich nach der Menge und der freien Beweglichkeit der Ladungsträger in drei Gruppen einteilen. Bei den Isolatoren sind alle Elektronen fest an die zugehörigen Atome gebunden – es existiert keine Leitfähigkeit. Bei Metallen sind die Elektronen frei im Kristallverband beweglich – die Leitfähigkeit ist dadurch sehr hoch. Bei Halbleitern hingegen sind die Elektronen im Kristallverband an die Atome schwach gebunden, Energiezufuhr kann sie jedoch freisetzen.

Betrachten wir ein ideales Siliziumgitter: Von den 14 Elektronen, die den 14-fach positiv geladenen Atomkern umgeben, sitzen vier in der äußersten Hülle. Diese Valenzelektronen stellen die Bindungen zu den Nachbaratomen her (paarweise mit den Elektronen der Nachbaratome). Durch Energiezufuhr können Bindungen aufgebrochen werden, an der Stelle eines freigesetzten Elektrons (negativer Ladungsträger) entsteht ein so genanntes Loch (oder Defektelektron, positiver Ladungsträger). Werden in das Siliziumgitter Fremdatome mit 5 Valenzelektronen eingebaut entsteht ein freier Ladungsträger, da ein Elektron für die Bindung im Gitter nicht benötigt wird. Es entsteht ein so genannter n – Leiter, die in der Überzahl vorhandenen Ladungsträger sind Elektronen (negative Ladungsträger). Fügt man in das Siliziumgitter Atome der 3. Gruppe ein (3 Valenzelektronen) entstehen freie positive Ladungsträger (Defektelektronen), man spricht von einem p – Leiter.

Ein für die Halbleitertechnik und für die Funktionsweise von Solarzellen grundlegendes Element ist ein so genannter p – n Übergang. Dabei grenzen ein p- und ein n- Halbleiter aneinander. Die freien positiven Ladungsträger des p- Leiters diffundieren in die n – Schicht, die freien negativen Ladungsträger des n – Leiters diffundieren in die p – Schicht. Dieser Diffusionsprozess wird rasch gestoppt. Denn die Atome der n – Schicht sind durch Abgabe der Elektronen in die p – Schicht positiv geladen, die Atome der p – Schicht sind durch Abgabe der Defektelektronen negativ geladen. Eine so genannte Verarmungszone (an freien Ladungsträgern) entsteht am p – n Übergang durch die aufgebaute Sperrspannung. Wird der p – Übergang mit einem äußeren Stromkreis verbunden so fließt zunächst kein Strom, wenn aber durch den oben erwähnten inneren photoelektrischen Effekt (in der Nähe der Raumladungszone) zusätzliche Ladungsträgerpaare erzeugt werden, steigt die Spannung und Strom fließt, da das System bestrebt ist, wieder seinen Gleichgewichtszustand herzustellen.

In der technischen Anwendung kommt es zu einer Zusammenschaltung vieler solcher Einzelzellen, wodurch entsprechend hohe Spannungen realisiert werden können. Der Grundstoff für die



heute am weitesten verbreiteten Solarzellen ist Silizium, eines der häufigsten Elemente der Erde. Es muss aber für die Halbleitertechnik in sehr reiner Form vorliegen. Der Durchbruch in der Entwicklung der Solarzellen wurde Mitte der Fünfzigerjahre geschafft, als es galt, die Energieversorgung der Raumfahrt zu gewährleisten. Für diesen Anwendungszweck war neben dem geringen Gewicht die hohe Zuverlässigkeit von solarer Stromversorgung entscheidend.

### **Solarzellen (Typen)**

#### **Monokristalline Zellen**

Grundelement für die Solarzellenproduktion ist Silizium. Der Herstellungsvorgang des äußerst reinen **monokristallinen Siliziums** ist extrem aufwendig: Silizium-Einkristalle werden aus einer gereinigten Siliziumschmelze gezogen, wobei für den geordneten Kristallaufbau eine Ziehgeschwindigkeit von maximal 30 cm pro Stunde möglich ist (Czochralski-Verfahren). Die Folge davon ist, dass das Endprodukt sehr teuer ist. Mit monokristallinem Silizium wird der beste Wirkungsgrad aller Silizium-Solarzellen erzielt (bis ca.18%).

#### **Polykristalline Zellen**

enthalten in der Gitterstruktur Fremdatome (Verunreinigungen), die Herstellung ist aber entsprechend einfacher, was sich in einem geringeren Zeitaufwand und damit natürlich auch in geringeren Kosten niederschlägt. Die gereinigte Siliziumschmelze wird in Blöcke gegossen und anschließend wie auch die monokristalline mit einer Säge in Scheiben von 0,25 bis 0,4 mm Dicke zersägt. Beim Zersägen entsteht viel Abfall, der besonders bei der monokristallinen Technik die Kosten in der Produktion wieder steigert. Der erreichte Wirkungsgrad von polykristallinen Zellen beträgt etwa 15%.

#### **Amorphe Zellen**

Weisen keine regelmäßige Kristallstruktur auf; Eine Schicht aus amorphem Silizium (amorph = gestaltlos) wird auf eine Trägerplatte (Glas, Kunststoff) aufgebracht. Zur Erreichung des photovoltaischen Effektes sind nur sehr dünne Schichten notwendig (ca.0,01 mm, so genannte Dünnschichtzellen). Amorphe Zellen sind die billigsten Zellen. Vor allem in der Herstellung ist wesentlich weniger Energie notwendig, die "energetische Amortisationszeit" daher entsprechend geringer. Der Wirkungsgrad liegt bei kommerziell verfügbaren Zellen deutlich unter 10%, Häufig begegnen uns amorphe Solarzellen in elektronischen Kleingeräten wie Uhren und Taschenrechnern.

#### **Andere Solarzellentypen (Konzentrator)**

Neuerdings gibt es die Möglichkeit mit Linsen oder anderen Konzentratoren die Leistung einer Solarzelle zu erhöhen. Konzentratormodule müssen der Einstrahlungsrichtung der Sonne nach-



geführt werden. Das Problem dabei ist jedoch, dass man nur die direkte Sonnenstrahlung konzentrieren kann, was in sonnenreichen Gegenden einfach möglich ist. In gemäßigteren Breiten, wie in denen Mitteleuropas aber wird - über das Jahr betrachtet - ein großer Teil der Sonnenenergie durch diffuse Sonnenstrahlung auf die Erde gestrahlt. Da konzentrierende Systeme, wie bereits erwähnt, diffuse Strahlung aber nicht bündeln können, wird auf deren Einsatz in Gebieten mittlerer Einstrahlung meistens verzichtet. Mit Konzentratoren werden im Labor bereits Wirkungsgrade von bis zu 35% erzielt. In größerem Maßstab findet jedoch noch keine Produktion statt.

### **Materialeinsatz**

Während mono- und multikristalline Solarzellen mit einem gewissen Einsatz an Aluminium verbunden sind, ist bei amorphen Zellen der Bedarf an Kupfer erwähnenswert. Amorphe Solarzellen mit ihrem geringen Bedarf an Silizium zeigen jedoch, bedingt durch den kleineren Wirkungsgrad und dem damit verbundenen erhöhten Zement-, Stahl- und Glasbedarf für die Gesamtanlage, eine höhere Materialbindung als Anlagen mit mono- oder multikristallinen Zellen. Bei Dachanlagen fällt der Ressourcenverbrauch für Zement und Stahl, wie er bei großen Photovoltaik-Kraftwerken auftritt, großteils weg.

### **Emissionsbilanz**

Die Emissionen, die unmittelbar mit der Anlage verbunden sind, können grob in produktionstechnische und energetische für die Herstellung der Anlagenkomponenten und für die Errichtung und Entsorgung sowie für die Materialbereitstellung unterschieden werden. In der heutigen Zeit sind die mit der Photovoltaik verbundenen Emissionen (Beginnend mit deren Herstellung) bis zu Faktor 3 geringer als die für die gleiche Energiemenge anfallenden Emissionen in Kraftwerken mit fossilen Energieträgern oder Atomkraftwerken. Die Lobby der Energiekonzerne vergleicht oft die Emissionen der Erneuerbaren Energien (Einschliesslich deren Herstellung) mit dem Betrieb konventioneller Kraftwerke oder Atomkraftwerke, ohne deren gigantische Emissionen zu bewerten, die bei der Erstellung oder durch Unterhalt und Modernisierung anfallen.

### **Wirkungsweise von Solarzellen**

Die Rückseite der Solarzelle besteht aus einem ganzflächigen metallischen Kontakt, während die der Sonnenstrahlung zugewandte Seite mit einem metallischen fingerförmigen Kontaktsystem versehen ist. Zur Vermeidung von Reflexionen an der Oberfläche wird eine Antireflexionschicht aufgebracht, wodurch es zum bläulichen Glanz der Solarzelle kommt. Ein spezielles Hartglas und ein stabiler Rahmen sorgen für die mechanische Festigkeit. Kristalline Solarzellen haben eine Leerlaufspannung von etwa 0,6 Volt und einen maximalen Kurzschlussstrom bei einer Fläche von 10 x 10 cm von etwa 3 Ampere. Aufgrund dieser geringen Spannung einer einzelnen Zelle werden viele Zellen hintereinander geschaltet ("in Serie"), um eine für den



Verbraucher sinnvoll verwendbare Spannung zur Verfügung zu haben. Häufig werden Spannungen von etwa 15 Volt realisiert, was eine maximal erzielbare Gesamtleistung von etwa 40-60 Watt ergibt. Die so erzeugten Einheiten werden als Photovoltaik-Module bezeichnet.

### **Elektrische Eigenschaften von Solarzellen**

Bei kristallinen Solarzellen ändert sich mit der Zelltemperatur der Wirkungsgrad in der Weise, dass bei niederen Temperaturen eine höhere Leistung erzielt wird. Man erkennt bei den Kennlinien einen Punkt wo die abgegebene Leistung maximal ist, nämlich dort, wo das Produkt aus Spannung und Strom maximal wird (MPP, Maximal Power Point). Für den Betrieb einer Photovoltaikanlage gilt es, sie stets in diesem Punkt zu betreiben. Bei Betrieb mit einem Solarwechsellrichter (wird weiter unten im Text beschrieben) übernimmt dieser die Aufgabe der Leistungsmaximierung.

Für eine Einstrahlungsintensität von  $1000 \text{ Wm}^2$ , für ein Sonnenspektrum entsprechend AM 1.5, für senkrechten Strahlungseinfall auf die Solarzellen und für eine Modultemperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  kann für ein bestimmtes Modul oder alle Module einer Anlage im MPP ein standardisierter Leistungswert angegeben werden. Dabei fügt man der Einheit Watt das Wort (peak) hinzu. Oft schreibt man einfach nur Wp. Bei den Standardbedingungen für die Ermittlung des Wertes durch eine Prüfstelle für das Modul steht Air Mass (AM) 1,5 für einen Strahlungsweg durch die Erdatmosphäre mit 1,5-facher Luftmasse im Vergleich zum senkrechten Weg durch die Atmosphäre.

### **Alterung der Solarzelle**

Wie jeder Werkstoff verändert sich auch die Solarzelle und deren Leistung unter dem Einfluss der Alterung. Für handelsübliche mono- oder polykristalline Silizium-Solarzellen ist das Problem der Alterung sekundär. Solarzellen, die fachgerecht verkapselt werden, halten Jahrzehnte und verkleinern ihre Leistung nur unwesentlich. Bei amorphem Silizium spielt die Alterung hingegen eine grössere Rolle. Allgemein bezeichnend für Solarzellen ist ihre hohe Zuverlässigkeit und ein nahezu wartungsfreier Betrieb. Als äußerst gut kann auch die mechanische Beanspruchbarkeit bezeichnet werden: Beim alpinen Einsatz der Solarmodule am Loser/Altaussee ist von den 601 montierten Modulen in den ersten 4 Betriebsjahren nur ein einziges durch Glasbruch ausgefallen, bei den amorphen Zellen an der HTBLA-Leonding wurde (was für die amorphe Technik kennzeichnend ist) nach einem anfänglichen Leistungsrückgang eine Stabilisierung des Wirkungsgrades festgestellt (Staebler-Wronski-Effekt)

### **Energetische Amortisationszeit**

Eine Energiealternative ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn die Energie, die zu ihrer Erzeugung benötigt wird, entsprechend geringer ist, als die Energiemenge, die sie im Lauf ihrer Lebensdauer umwandelt. Für den Bereich der Photovoltaik gilt folgendes: Der Zeitraum für die Rückliefe-



Die Erzeugungs-Energiemenge ("pay back-time") liegt etwa bei 6 Jahren. Bei einer Einstrahlung von 1900 kWh/m<sup>2</sup> die sonnigen Gebieten in den Schweizer Bergen entspricht, reduziert sich diese Zeit auf 3 Jahre. Für amorphe Silizium-Zellen, für deren Herstellung entsprechend weniger Energie notwendig ist, liegen die Vergleichswerte bei 2 Jahren. Vorausgesetzt wurde dabei der Gesamtenergieaufwand bei kommerzieller Erzeugung (Jahresproduktion > 1,5 MW), polykristalline Zellen mit einem Wirkungsgrad von > 12%, sowie eine Sonneneinstrahlung von 1900 kWh pro Quadratmeter und Jahr.

### **Flächenbindung**

Wirkungsgradbedingt ist der Flächenbedarf von Anlagen mit amorphen Solarzellen am größten. Bei Photovoltaikanlagen auf ebenen Flächen ist aus meteorologischen Gründen in Mitteleuropa ein gewisser Abstand zwischen den Paneelen mit energetisch optimaler Neigung notwendig. Daraus ergibt sich in diesem Fall ein Flächenbedarf, der etwa der dreifachen Modulfläche entspricht. Bei der Gebäudeintegration der Photovoltaik mit ihrem enormen Potential erfolgt überhaupt keine Flächenbindung im eigentlichen Sinn, da es sich um eine Sekundärnutzung handelt.

### **Photovoltaik-Anlagen**

Für größere Leistungen werden die Solar-Module parallel und seriell verschaltet; dadurch können verschiedene Spannungs- und Stromzustände hergestellt werden. Bei der Parallelschaltung addieren sich die Ströme, bei der Serienschaltung die Spannungen. Im Falle der Serienschaltung bestimmt die schwächste Zelle den Strom. Es werden daher in einem Modul nur Zellen mit möglichst gleichem Strom (im Punkt maximaler Leistung) zusammengeschaltet. Ebenso sollte darauf - in der nächsten Stufe – beim Zusammenschalten von Modulen geachtet werden. Schutzdioden (sie erlauben Stromfluss nur in einer Richtung) werden verwendet, um bei Abschattung einer Zelle oder eines Moduls zu verhindern, dass dieses als Verbraucher wirkt. Beim Betrieb einer Photovoltaikanlage unterscheidet man zwei Arten: den Inselbetrieb, wenn keine Kopplung des Stromkreises mit der öffentlichen Stromversorgung vorliegt, sowie netzgekoppelte Anlagen, wenn die Anlage direkt in das öffentliche Netz einspeisen kann. Dazu muss der erzeugte Gleichstrom in Wechselstrom umgeformt werden, was mittels Wechselrichter durchgeführt wird.

### **Inselanlagen**

Photovoltaik-Modul, Batterie und Laderegler sind die Grundelemente für eine Stromversorgung auch abseits jeder Zivilisation. Auf alpinen Schutzhütten, Jagd- und Ferienhäusern, sind sie darüber hinaus auch relativ kostengünstig und jedenfalls problemloser als ein geräusch- und emissionsreicher Dieselgenerator. Die Systemspannung einer Inselanlage ist üblicherweise 12 Volt Gleichspannung, bei größeren Anlagen aber auch 24 oder 48 Volt. Für die 12 Volt Span-



nung, aber auch für die anderen Spannungsebenen sind eine Vielzahl von Geräten erwerbbar (Beleuchtung, Radio, Kühlschrank, Staubsauger, Fernsehgerät, Pumpen,...).

Wenn Verbraucher mit anderen Betriebsspannungen verwendet werden müssen, ist der Einsatz eines Gleichspannungswandlers notwendig. Will man Geräte verwenden, die für den Anschluss an 220 Volt Wechselstrom (übliche Haushalt-Stromversorgung) vorgesehen sind, so ist der Einsatz eines Wechselrichters unumgänglich. Er verschlechtert durch seine betriebsbedingten Verluste den Wirkungsgrad der Anlage etwas, kann aber in Inselanlagen auch nur zeitweise - bei Verwendung eines Wechselstromgerätes - zwischengeschaltet werden. Viele Wechselstromgeräte aus dem Gebiet der Unterhaltungselektronik werden intern mit Gleichstrom betrieben, und können meist einfach auf Gleichstrombetrieb umgebaut werden. Dabei arbeiten diese Geräte auch noch wirtschaftlicher, weil die Verluste des eingebauten Transformators entfallen.

Bei größeren Insel-Anlagen ist es sinnvoll, einen sogenannter "Maximum Power Tracker" (MPT) - einen elektronischen Anpassungswandler - einzusetzen. Der MPT bringt oft eine nicht unwesentliche Steigerung des Energieertrages der Anlage. Das Einsatzgebiet von inselbetriebenen Anlagen ist sehr groß. Beginnend bei den bereits erwähnten Berghütten, über Wochenend- und Ferienhäuser, über Wohnmobile bis hin zur Unterstützung oder Alleinversorgung auf Ferienbooten sind im Freizeitbereich viele Anwendungsmöglichkeiten denkbar.

Ein weiterer großer Einsatzbereich liegt im Verkehr (Beleuchtung, Notrufsäulen, Parkuhren, Baustellenbeleuchtung etc.). Auch für die Beleuchtung netzfern installierter Werbetafeln sind Solarmodule häufig im Einsatz. Im Bereich der Sicherheitstechnik gibt es nahezu wartungsfreie Systeme am Markt, ein Infrarotmelder ist mit einem Scheinwerfer oder einer Sirene gekoppelt – da die Leistungen von Hupen und Sirenen gering sind genügt eine Anlage mit einem 10 W (peak) Modul. Spezielle Infrarot Bewegungsmelder für 12 V werden auch angeboten. Im Bereich der Landwirtschaft werden Photovoltaik-Module für den Betrieb von Weidezäunen oder für Bewässerungsaufgaben eingesetzt. Auch in der Fischzucht werden PV-Systeme zur Anreicherung von Wasser mit Sauerstoff verwendet. Weit verbreitet ist auch der Einsatzbereich bei netzfernen Messstationen. Und darüber hinaus sollen die zahlreichen Kleinanwendungen vom Taschenrechner bis zur Uhr und verschiedenen Spielzeugen nicht vergessen werden. Diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, soll jedoch einen Eindruck von der Vielfalt der Anwendungsbereiche geben.

### **Netzparallelbetrieb**

Die Photovoltaik-Anlage für Netzparallelbetrieb besteht aus folgenden Komponenten: Photovoltaikgenerator, Generatoranschlusskasten, Gleichstromfreischaltstelle, Wechselrichter, Stromkreisverteiler, Einspeisungs- und Bezugszähler, Hausanschlusskasten. Wie die meisten Solar-



techniken ist auch die Photovoltaik für dezentralen Einsatz prädestiniert, das heißt Verbrauch am Ort des Entstehens, doch besteht auch die Möglichkeit, eine direkte Verbindung zum öffentlichen Versorgungsnetz herzustellen; das setzt einen Wechselrichter voraus, der die von den Zellen erzeugte Gleichspannung in eine Wechselspannung wandelt. Die Qualität dieser Umwandlung und andere Vorschriften für die Netzeinspeisung sind exakt festgelegt und beschrieben.

Die Inbetriebnahme der Anlage muss durch einen konzessionierten Elektriker erfolgen, wobei auch Aspekte des Blitzschutzes und der Erdung beachtet werden müssen. Ein Gebäude erfordert aufgrund des Einbaues einer Photovoltaik-Anlage keine Blitzschutzanlage. Ist aber eine solche vorhanden, so sind die Richtlinien nach ÖVE E 49 und ÖNORM E 2980 zu beachten.

Vor allem für die Planung großer PV-Anlagen ist es sinnvoll **Computerprogramme** einzusetzen und damit die Auslegungen der Anlagen zu optimieren. Wichtige Eingabedaten dabei sind z.B. der Modultyp, die Art der Verschaltung, Orientierung und Neigung der Module, Klimadaten des Aufstellungsortes (Globalstrahlungsverteilung und Lufttemperaturen im Jahreslauf) und die Wechselrichterspezifikation. Im Zusammenhang mit Photovoltaik-Modulen auf Ein- und Mehrfamilienhäusern stellt sich die Frage nach optimaler Gebäudeintegration. In letzter Zeit wurden Photovoltaik Module auch vermehrt in Fassaden integriert, oder als gesamte Dachfläche eingebaut. Der gestalterische Spielraum für den Architekten wächst durch neue Entwicklungen bei den Abdeckgläsern, die in unterschiedlichen Farben und Mustern produziert werden können.

### **Wechselrichter**

Wechselrichter - wie oben erwähnt – werden nur für den Fall benötigt, dass man handelsübliche 220 V Wechselstromgeräte betreiben möchte. Für netzparallele Anlagen ist ein Wechselrichter aber eine unumgängliche Notwendigkeit. Von den Photovoltaik-Modulen wird ein Gleichstrom erzeugt, der in einen Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hertz umgeformt werden soll.

Aufgaben des Wechselrichters:

- Absolut synchroner Betrieb mit dem Verbundnetz
- sofortige Abschaltung bei Netzausfall
- keine Leistungsaufnahme aus dem Netz
- Schutz gegen Überspannungen (Blitzeinkopplung)
- Einhaltung der maximalen Oberschwingungswerte
- keine Erzeugung hochfrequenter Störspannungen
- meist übernehmen sie auch die Funktion des "Maximum Power Trackings", das heißt sie sorgen dafür, dass die Solarzellen im Punkt maximaler Leistung arbeiten.



### **Ausrichtung der Photovoltaik-Module**

Folgende Grundsatzregel für die Ausrichtung der Module bei nicht nachgeführten Anlagen sollte zur Anwendung gelangen: Orientierung möglichst in Südrichtung. Der Neigungswinkel bei fix installierten Modulen ist abhängig davon, wann eine optimale Leistungsausbeute erzielt werden soll. Für Leistungsmaximierung über das Jahr kann ein Wert zwischen 25° und 45° als guter Kompromiss bezeichnet werden. In Gegenden mit hohem Anteil an diffuser Strahlung (städtische Bereiche), gelten 30°-35° als ideal. Bei Aufstellung im alpinen Bereich ist eine etwas stärkere Neigung (auch über 45°) sinnvoll, was erhöhte Produktion im Winter (v. a. durch Schneereflection) und leichteres Abrutschen des Schnees zur Folge hat. Neigungen unter 20° sollten nach Möglichkeit vermieden werden, da neben der schlechteren Ausbeute auch der Selbst-Reinigungseffekt durch den Regen bei diesen Anordnungen geringer, und ein Abrutschen von Schnee nahezu verhindert wird.

### **Nachführung der Photovoltaik-Module**

Die Sonne wandert im Lauf des Tages aus östlicher Richtung kommend über Süden nach Westen. Da die Solarmodule ihre maximale Leistung dann abgeben, wenn die Sonne möglichst direkt auf sie trifft, erhöht eine nachgeführte Anlage die Energieausbeute über den Tag. Auch steht im Winter die Sonne tiefer als im Sommer, was eine saisonale Nachführung überlegenswert macht. Aus diesen beiden Gründen gibt es ein- und zweiachsig nachgeführte Photovoltaik-Anlagen. Der Energiegewinn aus nachgeführten Anlagen ist vom Standort abhängig, und kann bei zweiachsiger Nachführung in unseren Regionen bis zu 25% betragen (bis 50% bei Standort Sahara). Die Nachführung, die die Tageseinstrahlung optimieren soll, muss automatisiert werden (z.B. mittels elektronisch gesteuerter Stellmotoren); eine saisonale Nachführung kann von Hand aus erfolgen. Bei zu aufwendiger Ausführung der Nachführung stellt sich stets die Frage, ob der dadurch erzielte Mehrertrag nicht ebenso durch zusätzliche Solarmodule zu erreichen ist. Eine einfache aber effektive Nachführung ist hydraulischer Art: Dabei wird durch eine - abhängig vom Sonnenstand - unterschiedlich erwärmte Flüssigkeit eine Bewegung der Module erreicht.

### **Leistungsausbeute einer Photovoltaikanlage**

Die von einer Solarzelle abgegebene Leistung ist abhängig von der Sonnenstrahlung; an einem klaren Sommertag werden in unseren Breitengraden etwa 1100 Watt pro Quadratmeter auf die Solarzellen gestrahlt. Mit einem Systemwirkungsgrad von 10% entspricht das einer elektrischen Leistung von 110 Watt pro Quadratmeter Solarzellenfläche. Da in den Leitungen, beim Wechselrichter, bzw. beim Laderegler und bei der Speicherung (Batterie) Verluste auftreten, kann als grober Richtwert 100 Watt (0,1 kW) pro Quadratmeter installierter Zellenfläche angenommen werden.



Die Leistung ist im wesentlichen abhängig von:

- Modulfläche, bzw. aktive Solarzellenfläche
- Leistungscharakteristik der Zellen (Wirkungsgrad)
- Standort (meteorologische Daten, Sonnenscheindauer, geographische Breite, Höhenlage, Reflexionen, Abschattung)
- Ausrichtung (Abweichung von Südorientierung, Neigung)
- eventuelle Nachführung der Module
- Temperatur am Aufstellungsort
- eventuelle Wechselrichterverluste oder Verluste durch Laderegler und Speicherung
- Verwendung und Qualität des Maximum Power Trackers

### **Speicher**

Vor allem bei Inselanlagen sind Speichersysteme notwendig, um auch bei geringer Strahlungsintensität elektrische Energie zur Verfügung zu haben. Prinzipiell muss man zwischen Kurzzeitspeicherung (Stunden bis Tage, zur Überbrückung von Schlechtwetterperioden) und Langzeitspeicherung (zur Überbrückung von jahreszeitlichen Schwankungen der Strahlungsintensität) unterscheiden. Letztere sind sehr aufwendig, daher werden die PV-Generatoren so groß ausgelegt, dass sie auch im Winter ausreichend Strom liefern. Eine andere Möglichkeit besteht darin, zusätzliche Generatoren (Wind oder Diesel) einzusetzen.

Für die Speicherung elektrischer Energie über kurze und mittlere Zeiträume verwendet man elektrochemische Elemente – also Akkumulatoren (oder auch Batterien genannt). Am meisten verbreitet ist der sogenannte Bleiakku, der Aufbau des Akkus für eine Solaranlage unterscheidet sich nur geringfügig von einer herkömmlichen Kfz-Batterie. Es ist wichtig den Akku vor Überladung und Tiefentladung zu schützen. Bei Tiefentladung entsteht Bleisulfat in kristalliner Form, das beim Aufladen nur unvollständig rückgewandelt wird. Der Akku leidet also dauerhaft. Beim Laden des Akkus beginnt er ab einer Spannung von 14,4 V zu gasen (Wasser wird durch Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt). Deshalb muss auch immer wieder Wasser nachgefüllt werden. Häufiges und längeres Gasen schadet dem Akku.

### **Andere Akkumulatortypen**

Außer Bleiakkus werden NiCd (Nickel – Cadmium) oder NiMH (Nickel – Metall – Hydrid) Akkus verwendet. Sie haben gegenüber dem herkömmlichen Bleiakku einige Vorteile, wie längere Lebensdauer, höherer Betriebstemperaturbereich, höhere zulässige Lade- und Entladeströme und geringere Probleme mit der Tiefentladung. Nachteile sind jedenfalls die höheren Kosten und die Tatsache, dass die Kapazität eines NiCd Akkus sinkt, wenn er nur selten aufgeladen wird.



### **Kosten**

Ein kWp installierter Leistung kostet, je nach Aufwand, zwischen 5'000.-- und 7'000.-- EUR.

### **PV-Förderung in der Schweiz**

Seit Inkrafttreten des KEV in der Schweiz mit 1. Mai 2008 gelten einheitliche Fördertarife, die der private Anlagenbetreiber erhält. Derzeit ist in der Schweiz der Maximalbetrag noch gedeckelt, doch ist mit einem Wegfall des Deckels in max. einem Jahr zu rechnen. Darüber hinaus arbeiten einige Kantone an der Möglichkeit einer zusätzlichen Förderung, für Anlagen, für die derzeit im KEV kein Kontingent mehr zur Verfügung steht. Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Anlage gem. „Nature-Made“ zertifizieren zu lassen. Die Energieversorger kaufen dann den Strom zu gleichen Bedingungen ein, wie das EEG sie bezuschusst. Alle Förderungen beziehen sich auf eine Vertragslaufzeit von 25 Jahren.

### **Photovoltaik im Verbundnetz**

Für die zentrale öffentliche Energieversorgung gilt bei photovoltaischer Netzeinspeisung in großem Rahmen folgendes: Den Lastfluss betreffend ähnelt im jahreszeitlichen Verlauf die Photovoltaik der Wasserkraft (Sommerspitze, Wintertief) im Tagesgang hat die Photovoltaik den Vorteil, dass die mittägliche Verbrauchsspitze im Netz mit der Erzeugungsspitze der Solarzellen zusammenfällt. Ein Netzbetrieb ohne Photovoltaik muss sichergestellt sein (Schlechtwetterperiode), der photovoltaische Anteil ist wie die Wasserkraft-Speicher als Spitzenkapazität zu betrachten, die fehlende Winterkapazität könnte in einem ökologisch durchdachten Energiekonzept durch kalorische Ergänzung auf Basis von Biomasse erfolgen.

### **Entwicklung der Photovoltaik**

Die heute erhältlichen Photovoltaik-Module sind nach derzeitigem technischen Stand ausgereift und zuverlässig, wie bei jeder technischen Entwicklung werden aber auch bei der Photovoltaik durch einen größeren Markt Weiterentwicklungen verstärkt gefördert. Besondere Chancen werden auch der amorphen Silizium-Technologie eingeräumt; aufgrund der einfachen Herstellung. Doch auch bei den kristallinen Silizium-Zellen ist eine Effizienzsteigerung bei der Herstellung, sowie eine weitere Erhöhung der Wirkungsgrade zu erwarten. Laufend bauen Solarzellenproduzenten ihre Produktionskapazitäten aus, auch werden Solarzellenfabriken komplett neu geplant und errichtet. Damit ist mit einer weiteren wesentlichen Reduktion bei Investitionskosten zu rechnen.