

Technologie Portrait  
Photovoltaik

Photovoltaic  
a Technology Portrait

H. Fechner, M. Heidenreich

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**32/2010**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter  
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Technologie Portrait

Photovoltaik

Photovoltaic

a Technology Portrait

Dipl.-Ing. Hubert Fechner

Dipl.-Ing. Michael Heidenreich

arsenal research - Österreichisches Forschungs- und  
Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H., Geschäftsfeld Erneuerbare Energie

Wien, Dezember 2000

Dieses Projekt wurde für Energytech.at unter Koordination der Energieverwertungsagentur  
(E.V.A) im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
durchgeführt.



## Vorbemerkung

Das vorliegende Technologieportrait wurde im Rahmen von [www.energytech.at](http://www.energytech.at) – eine Internetplattform für innovative Energietechnologien in den Bereichen Erneuerbare Energieträger und Energieeffizienz publiziert.

Die Technologieportraits wurden in den Jahren 2000 bis 2002 für die Bereiche feste Biomasse, Biogas, Photovoltaik, Solarthermie, Kraft-Wärme-Kopplung und Energieeffiziente Gebäude erstellt. Der vorliegende Bericht umfasst eines von sechs Technologieportraits in deutscher bzw. englischer Sprache. Die Technologieportraits beinhalten u.a. allgemeine Grundlagen, eine Beschreibung der unterschiedlichen Technologien, Komponenten und Systeme, Planungsgrundlagen, eine Darstellung des Status der Forschungs- und Technologieentwicklung und der Marktentwicklungen.

Um die Technologieportraits weiterhin einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, wurden sie in die Publikationsreihe aufgenommen und auf der Homepage [www.nachhaltigwirtschaften.at](http://www.nachhaltigwirtschaften.at) veröffentlicht.

Dipl. Ing. Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# PHOTOVOLTAIK - STROM AUS SONNENLICHT

<b>0. EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>1. SOLARSTRAHLUNG</b>	<b>5</b>
<b>2. SOLARZELLEN</b>	<b>6</b>
2.1 Grundlagen	6
2.2 Solarzellentypen	8
2.3 Wirkungsweise von Solarzellen	10
<b>3. PHOTOVOLTAIK-ANLAGEN</b>	<b>13</b>
3.1. Inselanlagen	13
3.2. Netzparallelbetrieb	14
3.3. Wechselrichter	16
3.4. Ausrichtung der Photovoltaik-Module	16
3.5. Nachführung der Photovoltaik-Module	16
3.6. Leistungsausbeute einer Photovoltaikanlage	17
3.7. Speicher	17
3.8. Kosten	18
3.9. Photovoltaik im Verbundnetz	19
<b>4. MARKTDATEN</b>	<b>20</b>
<b>5. DIE ZUKUNFT DER PHOTOVOLTAIK</b>	<b>22</b>
<b>6. LITERATUR</b>	<b>24</b>

## 0. EINLEITUNG

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 Exergie. Das heißt, daß ein hoher Anteil von dieser in jede andere Energieform (mechanisch, chemisch, thermisch) umgewandelt werden kann. Dagegen ist die Umwandlung von Wärme oder innerer Energie in andere Energieformen durch den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre begrenzt.

Solarzellen - Sonnenkollektoren

Vielfach werden diese beiden Solartechnologien verwechselt.

Solarzellen sind meist bläulich glänzende elektronische Halbleiterelemente, die unter Sonneneinstrahlung elektrischen Strom erzeugen.

Als Sonnenkollektoren werden dagegen 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.

Die negativen Umweltauswirkungen der Photovoltaik sind relativ gering. Dies gilt besonders im Vergleich zum Ressourcenverbrauch und zur Emissionsbilanz anderer Energietechnologien. Zusätzliche positive Effekte 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

## 1. SOLARSTRAHLUNG

Das technische Potential für den Einsatz von Photovoltaik ist zweifelsohne gegeben: Für Österreich gilt, daß an einem einzigen wolkenlosen Tag von der Sonne etwa die Energiemenge auf die Fläche Österreichs gestrahlt wird, die Österreich in einem Jahr verbraucht. In Zahlen ausgedrückt heißt das: die jährliche Einstrahlung auf die horizontale Fläche in Österreich beträgt etwa 1100 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 sowie in einigen Gebieten Amerikas erreicht.

Österreich hat durch seine alpine Lage auch Vorteile in der Sonnenenergienutzung, da mit zunehmender Höhenlage die Einstrahlungssumme ansteigt. Die steigende Leistungsausbeute kristalliner Solarzellen bei sinkenden Temperaturen von etwa 0,5% pro °C, sowie die reinere Luft und mögliche Schneereflexionen bringen z.B. beim Sonnenkraftwerk am Loser/Altaussee besonders in den Wintermonaten äußerst günstige Werte.

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 wolkenlosen Himmel beträgt der diffuse Anteil abhängig vom Ort und der Höhenlage mindestens 10-20 %.

Auch 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.

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



Bild: Fassade der Firma Hirschmann, Rankweil  
Quelle: stromaufwärts PV, message, Medien & Verlags GmbH

## 2. SOLARZELLEN

### 2.1 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 Metallkontaktierungen 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 sogenannten äußeren Photoeffekt treten Elektronen aus dem Material aus, beim sogenannten 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 sogenanntes 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 sogenannter 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.

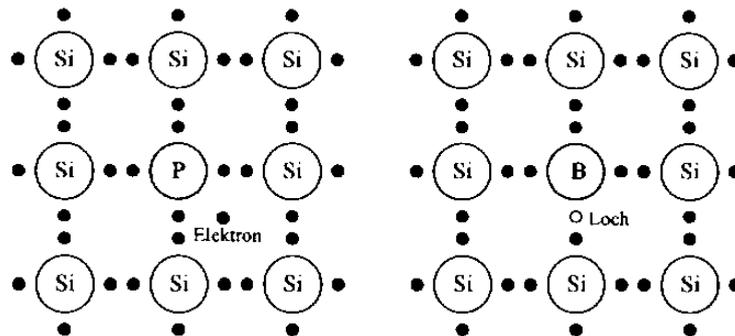


Bild: Mit Phosphor bzw. Bor dotiertes Siliziumgitter

Quelle: Volker Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, Carl Hanser Verlag München Wien

Ein für die Halbleitertechnik und für die Funktionsweise von Solarzellen grundlegendes Element ist ein sogenannter 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 sogenannte Verarmungszone (an freien Ladungsträgern) entsteht am p – n Übergang durch die aufgebaute Sperrspannung.

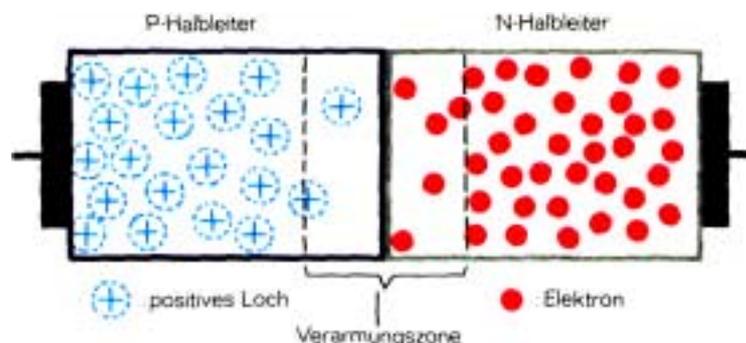


Bild: Schematische Darstellung eines p – n Übergangs.

Quelle: Edgar Lüscher, Pipers Buch der modernen Physik, R. Piper & Co. Verlag München Zürich

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.

## **2.2 Solarzellentypen**

### **Monokristalline Silizium-Solarzellen**

Grundelement für die Solarzellenproduktion ist Silizium, das in Form des Quarzsandes das zweithäufigste Element der Erde ist.

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. Allerdings wird mit monokristallinem Silizium der beste Wirkungsgrad aller Silizium-Solarzellen erzielt (bis ca.18%).

**Kristalline Zellen** weisen eine regelmäßige Kristallstruktur auf.

Monokristalline Zellen: sind Zellen, die nahezu keine Verunreinigungen aufweisen. Sie haben eine ideale Gitterstruktur, sind aber sehr aufwendig in der Herstellung

**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, sogenannte 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.

Nach der Herstellung der Siliziumkristalle werden im darauffolgenden Produktionsschritt - der "Dotierung" - durch Einbringen von chemischen Elementen (z.B. Phosphor und Bor) aus dem Silizium ein p-Halbleiter (bei Dotierung mit Phosphor), bzw. ein n-Halbleiter (bei Dotierung mit Bor) erzeugt.

Durch das Zusammenfügen dieser beiden Schichten entsteht ein p-n Übergang der für die Wirkungsweise der Solarzelle (wie auch anderer elektronischer Bauelemente) entscheidend ist. (Nähere Details sind im Kapitel Grundlagen zusammengefaßt). Weitere Informationen findet man auch in /6/.

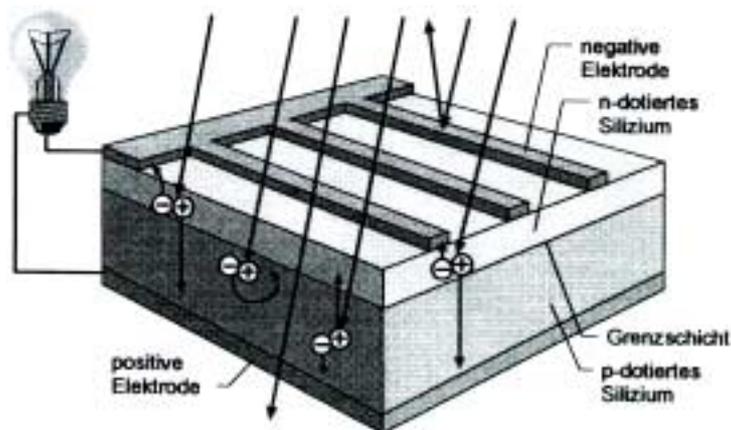


Bild: Prinzipieller Aufbau einer kristallinen Solarzelle

Quelle: Volker Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, Carl Hanser Verlag München Wien

### Andere Solarzellentypen

Andere Grundstoffe wie Galliumarsenid, Cadmiumtellurid, Kupferindiumdiselenid, - oder einige weitere - können auch für die Produktion von Solarzellen verwendet werden, doch muß jeweils eine mögliche Toxizität beachtet werden.

Solarzellen aus Cadmiumtellurid sind in der Produktion wesentlich günstiger, ihr Weltmarktanteil beträgt derzeit jedoch nur etwa 1 %. Bei diesem Grundmaterial ist die Umweltverträglichkeit (Schwermetalle) jedoch ein kritischer Punkt. Bei Störfällen (z.B. Brand) oder bei der Entsorgung der Zellen sind Cadmiumemissionen nicht zu vermeiden.

Mit Solarzellen aus Kupfer – Indium – Diselenid werden im Labor Wirkungsgrade bis 17 % 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, größtenteils weg.

### **Emissionsbilanz**

Jene 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.

Die Strombereitstellung mit amorphen Zellen weist die kleinsten spezifischen Emissionen auf. Der Einsatz monokristalliner Zellen bringt weniger Emissionen mit sich als der Einsatz multikristalliner Zellen. Die Herstellung kristalliner Zellen ist mit HCl-Emissionen und die Herstellung amorpher Zellen ist mit NH<sub>3</sub>-Emissionen verbunden.

Insgesamt werden die mit der Photovoltaik verbundenen Emissionen jedoch von den vermiedenen Emissionen in Kraftwerken mit fossilen Energieträgern deutlich übertroffen.

### **2.3 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 Antireflexionsschicht 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 oder -Paneele 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 Solarwechselrichter (wird weiter unten im Text beschrieben) übernimmt dieser die Aufgabe der Leistungsmaximierung.

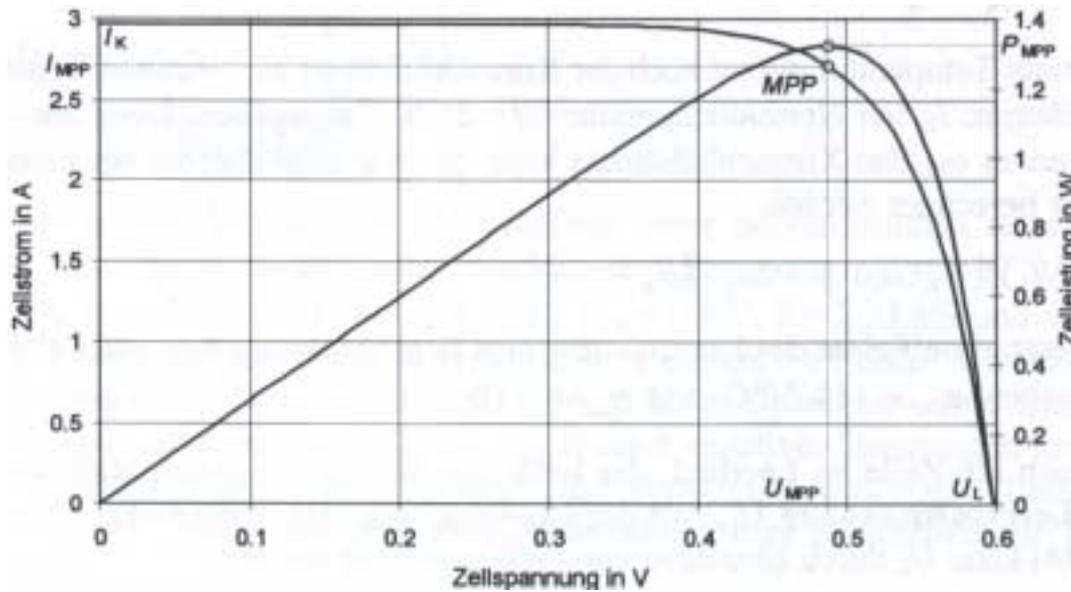


Bild: I – U (Strom – Spannung) Kennlinie und P – U (Leistung – Spannung) Kennlinie einer Solarzelle mit dem MPP.

Quelle: Volker Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, Carl Hanser Verlag München Wien

Für eine Einstrahlungsintensität von  $1000 \text{ W m}^{-2}$ , für ein Sonnenspektrum entsprechend AM 1.5, für senkrechten Strahlungseinfall auf die Solarzellen und für eine Modultemperatur von  $25 \text{ °C}$  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  $W_p$ . 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 Körper 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 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). /3/

### **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 Rücklieferung der Erzeugungs-Energiemenge ("pay back-time") liegt etwa bei 2 bis 5 Jahren. Bei einer Einstrahlung von  $1900 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ , die sonnigeren Gebieten entspricht, reduziert sich diese Zeit auf 1,6 Jahre. Für amorphe Silizium-Zellen, für deren Herstellung entsprechend weniger Energie notwendig ist, liegen die Vergleichswerte bei  $1100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  1,6 Jahren, bzw. bei  $1900 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  0,9 Jahren. Vorausgesetzt wurde dabei der Gesamtenergieaufwand bei kommerzieller Erzeugung (Jahresproduktion  $> 1,5 \text{ MW}$ ), polykristalline Zellen mit einem Wirkungsgrad von 12%, sowie eine Sonneneinstrahlung für mitteleuropäische Verhältnisse von  $1100 \text{ kWh}$  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.

### 3. 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) zusammenschaltet. 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.

#### 3.1. 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 Dieselmotor.

Die Systemspannung einer Inselanlage ist üblicherweise 12 Volt Gleichspannung, bei größeren Anlagen aber auch 24 oder 48 Volt. Für die 12 Volt Spannung, 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.

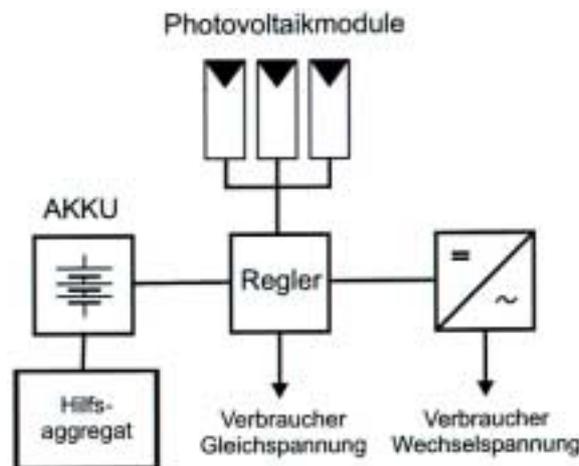


Bild: Prinzipieller Schaltplan einer Inselanlage

Quelle: „SOLARSTROM“, H. Wilk; ARGE Erneuerbare Energie, Gleisdorf

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 sogenannten "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 Sicherungstechnik 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.

### **3.2. Netzparallelbetrieb**

Die Photovoltaik Anlage für Netzparallelbetrieb besteht aus folgenden Komponenten: Photovoltaikgenerator, Generatoranschlußkasten, Gleichstromfreischaltstelle, Wechselrichter, Stromkreisverteiler, Einspeisungs- und Bezugszähler, Hausanschlußkasten.

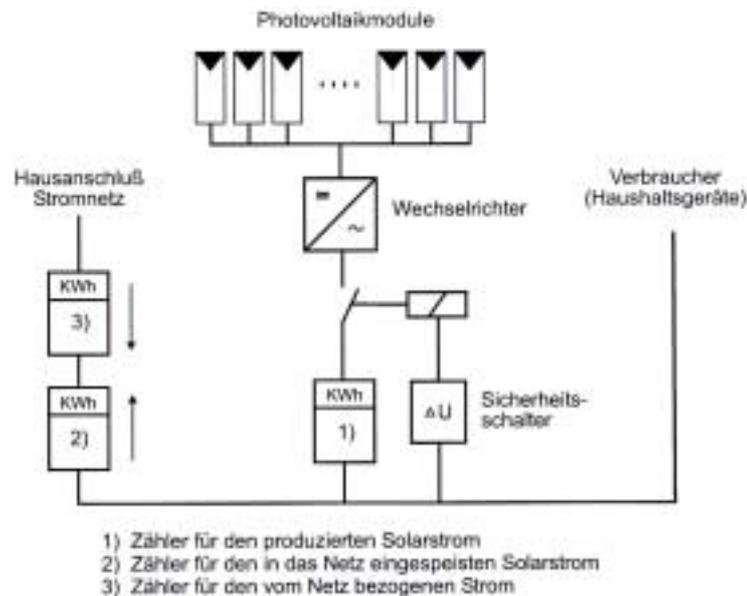


Bild: Prinzipieller Schaltplan einer netzgekoppelten Anlage

Quelle: „SOLARSTROM“, H. Wilk; ARGE Erneuerbare Energie, Gleisdorf

Wie die meisten Solartechniken 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 /2/.

Sicherheitstechnische Aspekte sind auch im Entwurf der ÖNORM/ÖVE E 2750 „Photovoltaische Energieerzeugungsanlagen, Sicherheitsanforderungen“ vom 26.2.1996 festgelegt.

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. Eine Aktuelle Auflistung von Simulationsprogrammen findet man z.B. in /8/.

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.

### **3.3. Wechselrichter**

Für Inselanlagen werden Wechselrichter - wie oben erwähnt - 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.

Kosten für marktübliche Wechselrichter: bei einer 1,8 kW Anlage ist mit etwa ATS 10.000.- - 15 000.- zu rechnen.

### **3.4. 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 Schneereflexion) 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.

### **3.5. 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 zweiachsige 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.

### **3.6. 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

### **3.7. 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.

### 3.8. Kosten

Eine sehr gute Darstellung der Anschaffungskosten für eine Photovoltaikanlage und die daraus entstehenden Stromkosten findet man in der Marktübersicht 1994/1995 „Photovoltaik Anlagen“ (Jürgen Leuchtner, Klaus Preiser, Öko-Institut e.V., Deutschland).

Leistungsgröße		1 kW (peak)	3 kW (peak)	30 kW (peak)
Spezifische Systemkosten	DM/ kW p	21 000.-	18 000.-	17 000.-
Investitionskosten	DM	21 000.-	54 000.-	510 000.-
Kapitalkosten	DM/ Jahr	1 344.-	3 456.-	32 640.-
Wartungskosten	DM/ Jahr	105.-	270.-	2 550.-
<b>Ges. jährl. Kosten</b>	<b>DM/ Jahr</b>	<b>1 449.-</b>	<b>3 726.-</b>	<b>35 190.-</b>
Energieausbeute	KWh/ Jahr	1 000.-	3 000.-	30 000.-
<b>Stromerzeugungskosten</b>	<b>DM/ kWh</b>	<b>1,45</b>	<b>1,24</b>	<b>1,17</b>

Die Nutzungsdauer wurde mit 25 Jahren angenommen, die spezifische jährliche Energieausbeute 1000 kWh/ kW und Jahr.

### **3.9. 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 (Sommer Spitze, 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 durchdachtem Energiekonzept durch kalorische Ergänzung auf Basis Biomasse erfolgen (Kraft-Wärmekopplung);

Wie groß kann der Anteil an photovoltaischem Strom im österreichischen Verbundnetz sein?

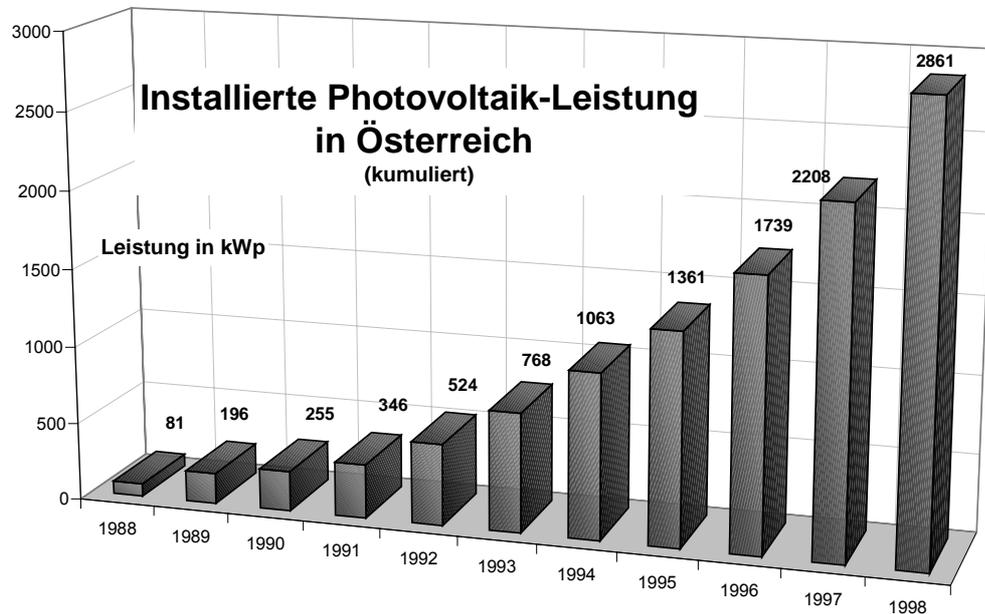
In der derzeitigen Situation könnte unter den heute gegebenen netztechnischen Voraussetzungen (Fluktuation der Photovoltaik-Leistung, Kurzschlußleistung des Netzes) 3500 MW photovoltaische Leistung ins Netz eingespeist werden, was derzeit rund 7% des heutigen Strombedarfes bedeutet (aus /7/). Derzeit sind in Österreich noch unter 3 MW (peak) installiert.

Besondere Regelstrategien könnten eine wesentliche Vergrößerung dieses Anteils herbeiführen, wenn Verbraucher entsprechend der Solarstromproduktion zu- und abgeschaltet werden.

Das neue ELWOG (Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz) entspricht den Vorgaben der EU – Strommarktliberalisierung. Es schreibt unter anderem vor, daß in Österreich bis zum Jahre 2005 drei Prozent des Stromes aus regenerativen Energieträgern (ohne Wasserkraft) zu stammen haben. Das entspricht 1 500 Mio. kWh – so viel wie 375 000 Haushalte im Jahr verbrauchen. Die Ausführungsgesetze des ELWOG müssen von den Ländern beschlossen werden, darin sind auch Einspeisetarife für Strom aus erneuerbarer Energie festgelegt. In Vorarlberg soll demnach z.B. 1,531 ATS/ kWh bezahlt werden, im Burgenland zwischen 1 und 2 ATS /kWh je nach Tageszeit, in Niederösterreich 1,78 ATS / kWh, in Tirol 3,8 ATS /kWh. Wien, Steiermark und Salzburg vergüten jeweils unter 1 ATS/ kWh. Ausschließlich in Kärnten wird die Photovoltaik mit 10.- ATS/ kWh deutlich gefördert.

Aufgrund der derzeit noch geringen Wirtschaftlichkeit von netzgekoppelten Photovoltaik – Anlagen wären Einspeisetarife, wie in Kärnten notwendig, um die Verbreitung dieser Technologie zu fördern.

## 4. MARKTDATEN



Quelle: Prof. Faninger, Marktübersicht Photovoltaik, Wirtschaftskammer Österreich

Die ersten Inselanlagen in Österreich entstanden 1987 auf der Baumgartlalm und am Hochleckenhaus. Die erste netzparallele Anlage ging in Österreich 1987 in Gmunden in Betrieb.

Auf Schutzhütten in den österreichischen Bergen stehen nun mittlerweile eine Vielzahl von Insel-Anlagen, die oft die lauten und nicht gerade geruchsfreien Dieselgeneratoren ersetzen, und den Hüttenwirten den Treibstofftransport ersparen.

Das für einige Zeit größte Solarstromkraftwerk steht entlang der Westautobahn bei Seewalchen mit einer Spitzenleistung von 40.000 Watt. Die Inbetriebnahme erfolgte im Februar 1992, die installierte Modulfläche beträgt 357m<sup>2</sup>.

Die derzeit in Österreich größte Anlage ist in Steyr in Oberösterreich im Einsatz. Dort wurden 70 kW vom Brillenwerk Hartlauer installiert.

In der Anfangsphase wurde diese Entwicklung durch den Photovoltaik-Breitentest (1992) gefördert: In Österreich wurde vom Verband der E-Werke, dem Wirtschaftsministerium und den lokalen Elektrizitätsversorgungsunternehmen vereinbart 200 kW (peak) Photovoltaik großzügig zu fördern: rund 100 private Stromerzeuger betreiben nun im Rahmen dieses Programms eine netzparallele Anlage. Der Betrieb der Anlagen wurden über mehrere Jahre untersucht, vor allem in Hinsicht auf Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit und Leistung.

In Österreich wurden im Jahr 1998 photovoltaische Systeme mit einer Gesamtleistung von ca. 653 kW (peak) installiert. Das entspricht einer Zunahme von 39% im Vergleich

zum Vorjahr (1997). Der bevorzugte Solarzellentyp für die im Jahr 1998 installierten Photovoltaikanlagen war die polykristalline Solarzelle mit einem Anteil von 90%.

Insgesamt (kumuliert über die Jahre) waren im Jahr 1998 in Österreich Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von etwa 2 861 kW (peak) im Einsatz. Davon entfallen 59,4% auf netzgekoppelte Anlagen, 21,4 % Anlagen im Inselbetrieb und 19,2% auf diverse Kleingeräte.

Der am meisten verbreitete Solarzellentyp ist die polykristalline Solarzelle mit 71,8%, an zweiter Stelle liegt die monokristalline Solarzelle mit 27,4%, sehr schwach sind amorphe Solarzellen mit 0,7% vertreten.

Gereicht nach Bundesländern führt Oberösterreich mit 34,9% (der gesamten in Österreich installierten Leistung), gefolgt von der Steiermark mit 14,9% und Niederösterreich mit 13,5%.

Diese und weitere statistischen Angaben findet man in /5/.

## 5. DIE ZUKUNFT DER PHOTOVOLTAIK

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 weiteren exponentiellen 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 Verbrauchsminderung 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 weiteren Jahren).

Unter diesen Umständen werden in den kommenden Jahren große Änderungen in der gesamten Energieversorgung der Menschheit passieren müssen.

Was wird die Photovoltaik in Zukunft zur gesamten Energieversorgung beitragen? Der derzeitige Beitrag der Photovoltaik zur Weltenergieversorgung ist verschwindend gering. Doch ein überzeugender Vorteil dieser Technologie ist ihre universelle Anwendbarkeit. Dies umfaßt sowohl die Art der Anwendung, als auch die Anlagengröße und die geographische Lage. Photovoltaik kann an jedem Ort der Erde Energie liefern. Und das zumindest theoretische Potential ist nahezu unbegrenzt.

Der theoretisch mögliche Wirkungsgrad konventioneller Siliziumzellen liegt bei 28%. Weiterentwicklungen werden immer wieder bekannt (Tandemzellen, Photoelektrochemische Solarzellen,.../4/) und lassen Wirkungsgrade von Solarzellen bis über 50% theoretisch möglich scheinen. In Labortests wurden bisher Wirkungsgrade von maximal 37% erreicht. /3/

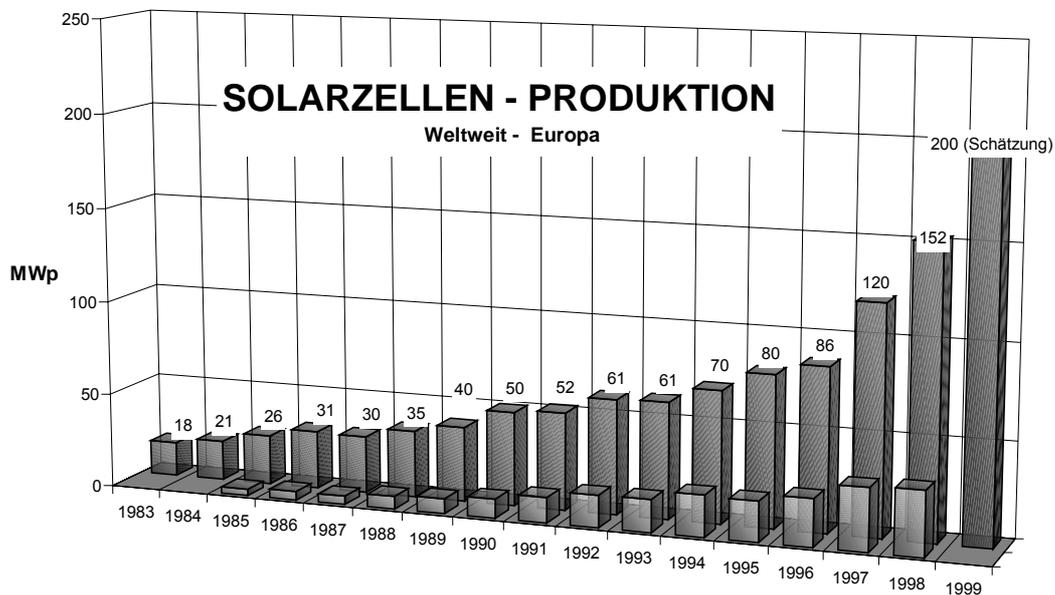
Die heute erhältlichen Photovoltaik-Module sind nach derzeitigem technischen Stand ausgereift und zuverlässig, wie bei jeder technischen Entwicklung werden aber auch bei der Photovoltaik durch einen größeren Markt Weiterentwicklungen verstärkt gefördert. Besonders viele Chancen werden auch der amorphen Silizium-Technologie eingeräumt; aufgrund der einfachen Herstellung wird vielfach in diese Zellen die größte Hoffnung gesteckt. Doch auch bei den kristallinen Silizium-Zellen ist eine Effizienzsteigerung bei der Herstellung, sowie eine Erhöhung der Wirkungsgrade zu erwarten.

Laufend bauen große Solarzellenproduzenten ihre Produktionskapazitäten aus, auch werden erstmals Solarzellenfabriken in der Größenordnung von 25 MW/ Jahr komplett neu geplant und errichtet (z.B. Shell Solar in Gelsenkirchen, Werk Alzenau von ASE – NUKEM, Kyocera in Japan). Damit ist mit einer weiteren wesentlichen Reduktion bei Investitionskosten zu rechnen.

Heute sind Inselsysteme – gemessen an ihrer Anzahl, nicht an der Leistung – den netzgekoppelten Anlagen weit voraus. Für viele dezentrale Aufgaben (Meßstationen, Anlagen im Verkehrsbereich, Almhütten etc.) sind Photovoltaikanlagen bereits heute wirtschaftlich attraktiv. Ein ganz wesentlicher Aspekt ist aber der, daß etwa 2 Mrd. Menschen derzeit nicht an ein Stromnetz angeschlossen sind und daß das aus heutiger Sicht auch nicht leistbar sein wird. Photovoltaik – Anlagen im Inselbetrieb sind eine gute und (im Vergleich zum Aufbau eines Netzes) sehr kostengünstige Variante, die erforderliche Stromversorgung sicherzustellen.

In Europa wird der Ausbau netzgekoppelter Anlagen noch über einen längeren Zeitraum von Förderungen und der Einstellung besonders umweltbewußter Konsumenten abhängig sein.

Wenn die Photovoltaik den Schritt von der derzeit schon oft konkurrenzlosen solaren Inselversorgung zur haushaltsüblichen Stromversorgung mit Überschuß - Einspeisungsmöglichkeit, bzw. Bezug vom Versorgungsnetz machen wird, dann wird auch über Energiespeicherung vermehrt nachzudenken sein. Ein durchaus sinnvolles Konzept könnte dabei die elektrolytische Energiespeicherung sein (Speicherung mittels Wasserstoff).



## 6. LITERATUR

/1/ H.Wilk, Betriebsergebnisse von österreichischen Photovoltaikanlagen mit Netzkopplung, Tagungsband Solar 92, Symposium Gleisdorf/Stmk.

/2/ "Selbsttätige Freischaltstelle für Photovoltaikanlagen einer Nennleistung  $\leq 4,6$  kVA und einphasiger Paralleleinspeisung über Wechselrichter in das Netz der öffentlichen Versorgung"; Entwurf DIN VDE 0126 vom April 1999

/3/ H.Häberlin, Photovoltaik-Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz, AT-Verlag Aarau 1997

/4/ D.Meissner (Hrsg.) Solarzellen, Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Photovoltaik, Vieweg-Verlag Braunschweig 1993

/5/ Gerhard Faninger, Die Marktentwicklung der Solar- und Wärmepumpentechnik in Österreich, Berichtsjahr 1998 mit der Marktstatistik 1998 „Photovoltaik in Österreich“, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr.

/6/ Hadamovsky/ Jonas, Solarstrom Solarwärme, Kamprath Reihe, Vogel Verlag

/7/ Manfred Sakulin, ÖVE, Die Problematik bei der photovoltaischen Stromeinspeisung in das öffentliche Netz, e&i, 1992, H 7/ 8

/8/ Photon, November/ Dezember 98, Software, S 54, Solar Verlag GmbH





Photovoltaic  
a Technology Portrait

H. Fechner, M. Heidenreich



# Table of contents

<b>1</b>	<b>WHY PHOTOVOLTAIC (PV)?</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>PHOTOVOLTAIC MARKET IN AUSTRIA</b>	<b>5</b>
2.1.	AUSTRIAN COST DEVELOPMENT	5
2.2.	PROMOTION INCENTIVES	6
2.3.	OPTIMISED DYNAMIC SUBSIDY STRATEGIES	8
2.4.	SOCIOLOGICAL ASPECTS	9
<b>3</b>	<b>PHOTOVOLTAIC COMPONENTS</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>APPLICATIONS</b>	<b>12</b>
4.1.	GRID CONNECTED SYSTEMS	13
4.2.	STAND ALONE SYSTEMS	14
<b>5</b>	<b>BATTERIES</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>DEMO PROJECT STÜDLHÜTTE</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCES</b>	<b>17</b>

## 1 Why Photovoltaic (PV)?

“The current situation of the environment and the energy demand urgently needs drastic political, economical and technical decisions in order to face a situation that could quickly become hopeless.

Amongst the wide range of sources of renewable electricity, which itself only represents part of renewable energy sources, Photovoltaic (PV) takes a very particular place for three main reasons:

- One of its main characteristics is totally harmless operation for the immediate environment: no noise, no movement, no smoke, no dust, no waste, not any kind of physical risk
- Although the cost of PV power is expected to compete with conventional sources within a few years thanks to technical improvements and to mass production, the current prices are still higher than most of other renewable sources, making it more precious
- Because of its own physical properties, it is due to get a more and more large place in the daily and ordinary landscape of any part of population, as well in rural areas as in the heart of urban one.

Thus, PV, as the most popular technology, is an exemplary renewable energy from a technical point of view and for educational purposes.”

(Source: European Demonstration Project Hip-Hip. )

**The Phenomena** - Photovoltaic means conversion of sun rays direct into electricity. The potential for this electricity generation is nearly unlimited, since the source of energy is the sun. By using roofs or facades you need no additional space. Physically, electricity from Photovoltaic cells is high performed energy, because solar electricity can be converted into chemical, thermal and mechanical energy.

**Photo-Effect** - 1839, the so called "photo-electric-effect" was discovered by the French scientist E. A. Becquerel. Photons from the sun cause specific energy levels in semiconductors, which generate electric voltage. After connecting the contacts electric current flows within the semiconductor.

In general all existing chemical elements can be divided into 3 groups:

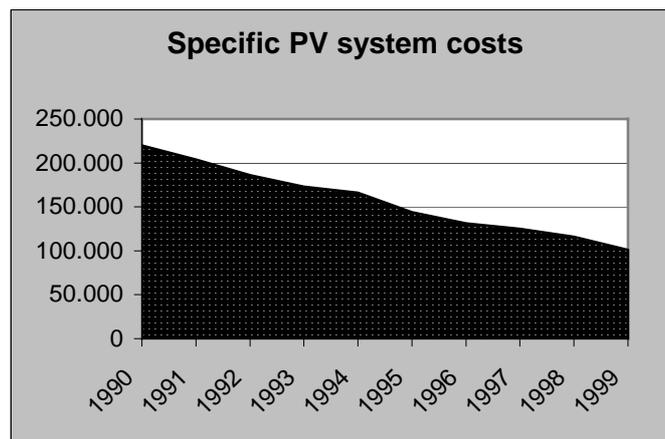
1. Isolators are characterised by fixed atoms and are not conductive.
2. Metals have free movable electrons within the crystal structure and are very conductive.
3. Semiconductors are laying between isolators and metals.

Silicon is a semiconductor with 4 free electrons at the outmost energy level. The free electrons are responsible for the binding to the neighbouring elements. Additional energy crack the bindings; at the position of a lost electron there is a defect electron (positive charge).

## 2 Photovoltaic market in Austria

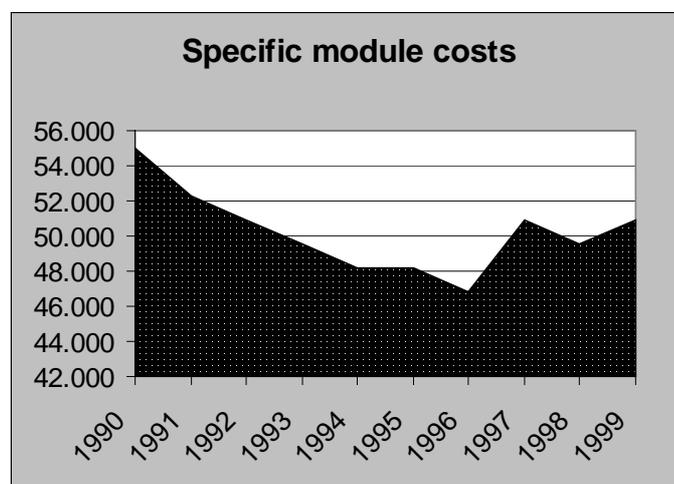
### 2.1. Austrian cost development

According to Austrian PV association and DI H. Wilk (Austrian PV-Expert and National ExCO-Member within the IEA PV-Power Systems-Programme) the investment costs of small residential PV systems in Austria have significantly decreased from 1990 to 1998. In the early nineties the system cost reduction was similar to the module price decreasing.



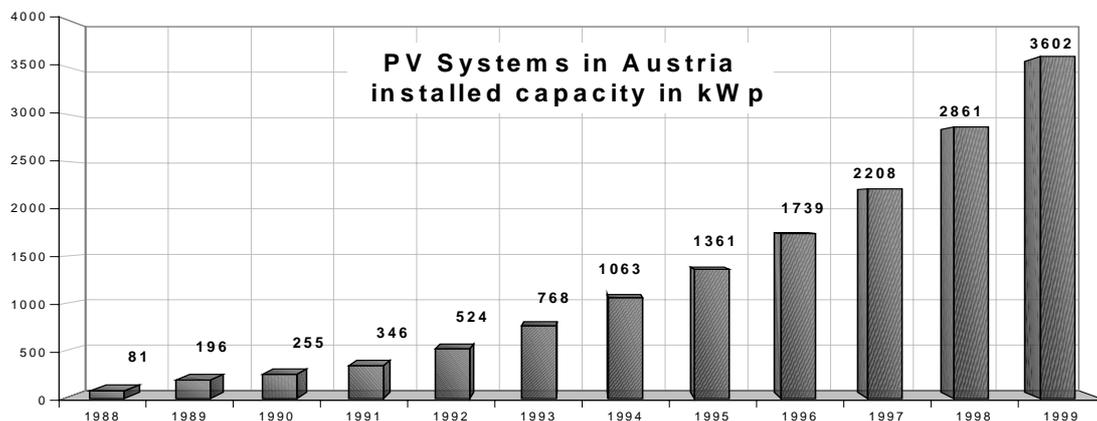
Total PV System costs (per kWp) from 1990 until 1999 (Source: Austrian PV association)

Since 1995 the decrease of the module cost stopped. The large world-wide demand of PV modules finally caused an increase of the prices. The main cause of this market situation was the implementation of promotion programmes in Germany, Japan, the Netherlands and in the United States. One result of these programmes is the move from a supply pushed market toward a more demand and service oriented market. This development went hand in hand with price reductions of components and with a shortening of the system assembling time. Both effects yield to yearly cost reductions of around 10%.



World-wide module costs (per kWp) from 1990 until 1999 (Source: DI H. Wilk)

Beside the international PV leading countries the installed Austrian capacity is small. The following diagram shows the market development during the last years. The cumulated capacity is continuously growing with around 25% per year. Regional and national financial incentives and distributed information are the major reasons for this continuous growth. But the development is only linear and not a dynamic increase.



Installed PV capacity in Austria 1988-1999 (Source: Prof. G. Faninger)

## 2.2. Promotion incentives

There is a wide range of incentives to promote Photovoltaic systems within Austria and its regions. The most significant subsidised programme for increasing the market penetration PV systems was the “**Austrian 200kWp Rooftop Programme** “ in the nineties.

The Austrian Ministry for Economic Affairs and the Union of Austrian Utilities decided to install 200 kWp grid connected rooftop PV systems in Austria similar to the German 1000 roofs programme started in May 1992. Within this program 110 small residential grid connected PV power systems were installed until 1994. The average capacity of the plants is about 2.28 kWp. A team of experts from government and union of Austrian Utilities elected out of hundreds of PV projects the best to be subsidised. The plants were selected for getting experiences about how PV systems are working at rather distinct places e.g. like in altitudes of about 2,000 meters above sea level as well as in valleys. About 58% of the investment cost of around 170.000.- ATS/kWp were subsidised by authorities and electrical utilities. (R. Haas et al., 1999).

The major targets of the 200 kWp Rooftop program were:

- Collecting comprehensive operation data as a basis for further R&D activities on various components of PV systems,
- testing and assessing the long-term performance of small decentralised PV systems,
- investigating the maintenance efforts for small PV systems,
- optimising the system design of grid-connected systems and
- acceleration of the market penetration of PV.

### In Austrian regions

Promotion incentives are very different between Austrian regions, but nevertheless insufficient concerning existing PV investment costs. The following table shows Feed-in Tariffs and investigation support for PV systems depending on different regions in Austria [1 ATS/kWh = 0,07 Euro/kWh].

Region	Feed-In S- HT(€/MWh)	Feed-In W- HT(€/MWh)	Investment support	Max. Subsidy (€)
Burgenland	140		30%	1,400 €
Carinthia	700 (till 10kW) 545 (>10kW)		--	--
Lower Austria	129		30%	2,200 €
Upper Austria	88	149	37%	3,500 €/kWp
Salzburg	83 (till 2kW) 37	83 (till 2kW) 52	--	
Styria	363		--	--
Tyrol	276 (till 10kW)			
Vorarlberg	111		37%	2,450 €/kWp
Vienna	111		50%	3,500 €/kWp

Legend: **S-HT**: High Tariff during daytime in summer, **W-LT**: High Tariff during daytime in winter  
Tab.: Regional Feed-In Tariffs and investment support (Source: Austrian PV association)

### 2.3. Optimised dynamic subsidy strategies

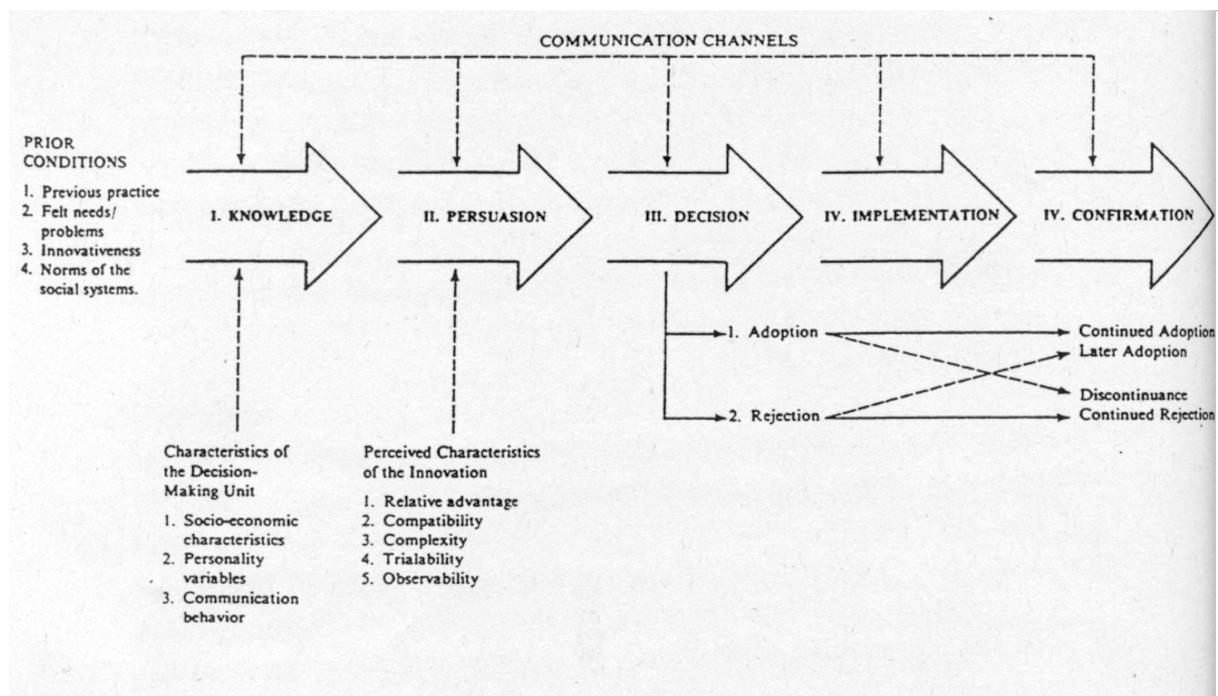
“For developing optimal subsidy strategies for PV systems different parameters like the price trend of PV systems and the willingness-to-pay of potential consumers play an important role.” is a quotation of a diploma from A. Studentschnig (Technical University in Vienna) in 1997. “The optimal control theory is used to take into account dynamic parameters and to create dynamic models. Producing electricity with PV systems is compared with the expenditure for subsidies. It turns out that a subsidy strategy can be donated as optimal if available funds are granted as soon as possible.”

The actual situation in Germany reflects this thesis. The 100.000 Roof programme combined with higher feed-in tariffs follows the results of the investigated dynamic model. The budget of the 100.000 Roof programme had to be increased only three months after starting. The yearly fund reduction of 5% might be a good average value to follow the conclusion of A. Studentschnig’s diploma. Generally can be said:

*The subsidies can be decreased after a preparation period impressed on dissemination activities and price reductions followed by the dynamic growing PV market.*

## 2.4. Sociological aspects

For promoting the development and distribution of PV plants on the market an accompanying scientific programme was installed to analyse sociological aspects within the Austrian 200 kWp Rooftop programme. The Group of Adapted Technology (GRAT) and the Institute of Economical Energy (IEW) of the Technical University of Vienna worked out sociological aspects of the Austrian 200 kWp Rooftop program (R. Haas et al., 1999). The investigations followed the “Innovation – Decision – Process” of the American Rogers concerning the question: “What are the driving forces and market preparation steps to disseminate innovative technologies.”



Willingness-To-Pay decision process (Source: Rogers)

**Interviews** - Detailed information were collected from three interviewed groups:

- Participants in the program (so called innovators),
- PV retail companies (so called diffusion agents) and
- informed persons, who are considered to be next adopters of PV systems.

Analysing and interpreting the data of the interviews with the participants are summarised in following results:

1. The major motives to invest in a PV system are the same for both, program participants and informed persons: Environmental protection, alternative to nuclear power and technical interest. In addition to those reasons for investment motives the presence of public subsidies for PV systems is also of principal relevance.
2. The investment in a PV system is the last part of energy saving investments chain for both, program participants and informed persons. Hence, subsidies

for PV are not in direct competition with subsidies for other energy saving measures (e.g. insulation of outdoor walls or retrofit of windows). Moreover, PV triggers electricity conservation, whereas building retrofits merely save space heating energy demand.

3. The purchase of a PV system leads to different changes in consumer behaviour. Consumers with low initial consumption increased their electricity demand slightly, consumers with high initial electricity Demand saved electrical energy.
4. The incentives in the program were not optimally designed. With the same amount of total subsidies, it would have been possible to promote more PV systems. Informed persons have a rather willingness to invest in PV systems. Yet, they claim rebates to put this willingness to pay into practice.
5. The key factors for further dissemination of PV systems are subsidies, rebates or full cost rates, reduction of the investment costs, increase in reliability, well aimed distribution of information and enhancement of environmental awareness.

### 3 Photovoltaic Components

Solar Heat (Solar Thermal Collectors) and electricity (Photovoltaik) production are often mixed. Generally can be stated:

- Photovoltaics is a semiconductor technology that converts light energy into direct-current electricity, with no moving parts. In its current form Photovoltaics has been developed in 1953-1954, for the aim of power supply of satellites in space since 1958; remote telecommunications, cathodic protection, and signaling systems since the mid-1960s; remote residential and commercial systems since the 1970s; and utility-intertied residential and commercial systems since the 1980s.
- Solar (thermal) collectors are heat exchangers, which convert the sun rays on a black absorber plate into heat. The heat is removed from the absorber by fluid filled pipes integrated into the plate. Afterwards, the heated fluid is used for space heating and hot water preparation.

#### Solar cells

##### **Mono crystalline silicon**

Sliced from single-crystal boules of grown silicon, these wafers/cells are now cut as thin as 200 microns. Research cells have reached nearly 24-percent efficiency, with commercial modules of single-crystal cells exceeding 15-percent.

##### **Poly crystalline silicon**

Sliced from blocks of cast silicon, these wafers/cells are both less expensive to manufacture and less efficient than single-crystal silicon cells. Research cells approach 18-percent efficiency, and commercial modules approach 14-percent efficiency.

##### **Gallium Arsenide (GaAs)**

A III-V semiconductor material from which high-efficiency photovoltaic cells are

made, often used in concentrator systems and space power systems. Research cell efficiencies greater than 25 percent under 1-sun conditions, and nearly 28 percent under concentrated sunlight. Multijunction cells based on GaAs and related III-V alloys have exceeded 30-percent efficiency.

### **Integrated Thin Film Technology**

#### **Copper Indium Diselenide (CuInSe<sub>2</sub>, or CIS)**

A thin-film polycrystalline material, which has reached a research efficiency of 17.7%, delivers the highest completed module efficiency for full sized power modules, reaching over 11 percent.

#### **Amorphous Silicon (a-Si)**

Used mostly in consumer products for solar watches and calculators, a-Si technology is also used in building-integrated systems, replacing tinted glass with semi-transparent modules. The primary issue with a-Si technology remains the low efficiency and associated greater requirement for space and higher array installed cost and weight

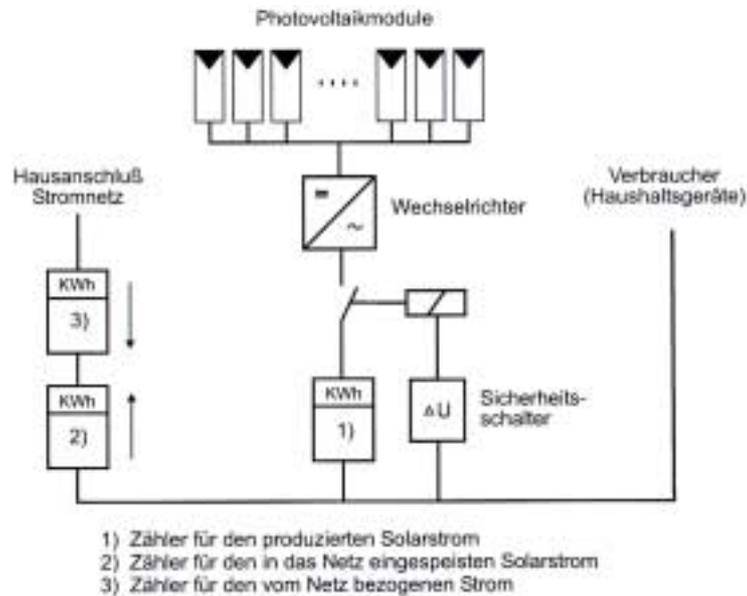
#### **Cadmium Telluride (CdTe)**

A thin-film polycrystalline material, deposited by electrodeposition, spraying, and high-rate evaporation. Small laboratory devices reached 16% efficiency, with commercial-sized modules (7200-cm<sup>2</sup>) measured at 8.34% (NREL-measured total-area) efficiency and production modules at approximately 7 percent.

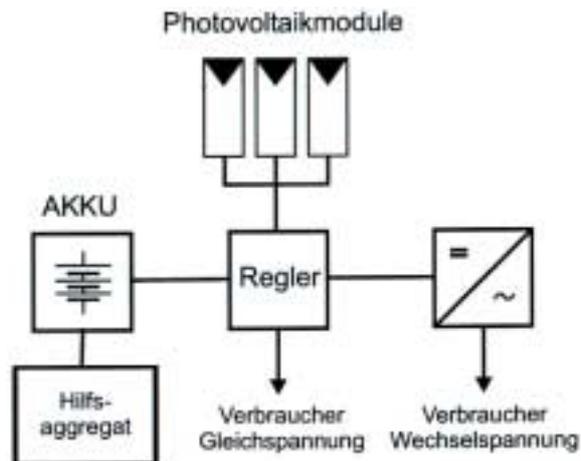
## 4 Applications

The two types of applications are:

- Grid connected systems (GCS) which feed directly into the public grid.



- Stand alone system (SAS), which do not possess a coupling with the electricity grid.



## 4.1. Grid connected systems

In areas with an existing utility grid it normally makes no sense to operate the PV System as stand alone system. Avoiding the costs for the batteries it is more easy to connect the system with the grid by means of an DC/AC inverter. Beside the conversion into AC, the inverter is responsible for the maximum power tracking (MPP-Tracking). MPP-Tracking means to optimise the electrical performance automatically. Aspects of reliability, safety and electromagnetic compatibility are further features which an inverter must comply with. Investigations regarding the effect of lightning and other effects which may influence the power grid are just under intensive research.

Installing a Photovoltaic-System on and integrating into a multi-family house arises immediately the question about the optimal building integration. Nowadays Photovoltaic modules are more and more often integrated into the roof, serving as part of the roof or used as entire roof area. Sometimes PV -elements are even made like roof tiles. Most of these innovative PV systems are installed in the highly industrialised countries such as Germany, the USA and Japan as well as Austria. Competitions and impulse programs e.g. the " house of the future " of the Austrian Ministry of Traffic Innovation and Technology further pushes the development of such innovative solar technologies.

Building and facade integration of PV modules depends substantially on the co-financing by supporting measures of national or European programs. Target of these programs is to integrate the solar cells in the same way like other standard elements into the building envelope. New, coloured and individually formed cells offer new possibilities for architects. Information campaigns and competitions are the instruments for a successful dissemination. A CDROM of the IEA task VII - " Photovoltaic power of system into the Built Environment " shows impressively examples of modern solar architecture.

This IEA task has also established a Website ([www.demosite.ch](http://www.demosite.ch)) designed, on different versions the fixings, to which roof and front integration and free standing carriers are demonstrated.

Shown are:

- Innovative module attachment and interconnecting concepts
- Facade components on base of usual market standard module
- Integration of PV components into the building cover
- Roof integration
- Solar roofing tile or. - items
- Glass A packagings
- Shading items
- Amorphous solar cells, AC of modules...

### **PV-Noise barriers**

Stricter official regulations, laws for newly built traffic routes, increased feed-in tariffs for the grid connected solar electricity are the main reason for the establishment of PV noise barriers. Switzerland and Germany are outriders of this market tendency, which now also in Austria finds rising interest. To the "16th European test specifications conference in Glasgow" in May 2000, the market potentials of this technology for six countries of Europe were presented / 9 / on the basis of the different concepts and architectures implemented in demonstration projects like

1. installed PV modules or PV roof-elements on existing walls
2. the vertical simple or Bifacial-construction,
3. the horizontal Zigzag construction and
4. the cassette form

There are high potentials for a wide dissemination of PV noise barriers in Germany, the Netherlands and Switzerland. Austria has good market potentials as well, where increased feed-in remuneration - e.g. in Carinthia and Styria - are paid.

### **4.2. Stand Alone Systems**

Photovoltaic-Moduls, battery and load automatic controllers are the basic elements for a current supply off the utility grids. On alpine huts and holiday houses, they are often the most economic solution. In this applications PV systems have much advantages in contrast to the noise- and emission-rich Diesel generator. The system voltage of an island system is usually 12 V of DC voltage, with larger systems in addition, 24 or 48 V. For 12 V of voltage, in addition, for the other voltage levels a variety of devices can be bought. (lamps, radios, refrigerators, vacuum cleaners, television sets, pumps...). For operating devices with other voltages, it is necessary to use a dc static converter. If one wants to use devices, which are intended for the link at 220 V alternating current (the usual current supply in households), then the application of an inverter is inevitable. The efficiency of such a system is slightly less. However, it can be used with 230V devices in Stand Alone systems from time to time.

## 5 Batteries

With the use of renewable energies (wind, photovoltaic) for sites which are isolated from the energy network, electricity production profiles do not fit with consumption profiles. To meet consumers power needs, it is necessary to store the energy. Lead-acid batteries, which are most often used for this storage, represent today more than 90% of the industrial or domestic installed batteries and their market share will be still significant in the next 25 years. Often battery lifetime in the field is considerably less than the manufacturer's claimed lifetime, because of energy management shortfalls. Classical methods of battery management, which are based on voltage threshold control, are not able to avoid :

- stratification of electrolyte, because of incomplete charges ,
- sulfation hardening, which builds up during periods of insufficient electricity production.

Premature failures of lead-acid batteries are principally linked to these two processes. The battery management is then a key point in such systems.

An EDF (Electricité de France) patent disseminated within the European demonstration project MULTIBAT will solve this problem and will significantly extend the lead-acid batteries.

## 6 Demo Project Stüdlhütte

**Planning aspects of the Alpine hut:** The substantial criteria for planning the best utilisation of the Energy resources of such a remote Alpine hut of 2800m attitude is **the Rational Use of Energy and the effective Use of Renewables under given economical conditions**. The starting point for the application of Renewable Energy at the Stüdlhütte was the evaluation and selection of the construction and the isolation material. The requirements of the hut and restaurant owner led to the decision of a hybrid system, because this system represented the best solution for supplying Energy, when it is needed. The Energy planner of the hut took into their consideration the remote aspects of the Stüdlhütte by developing and installing the hybrid system. Mountain huts offer the possibility of proving with model-like projects the optimised integration of Renewable energy. The application system as pilot object, which works continuously under extreme positions of high mountains might easily realisable at valley sites under normal conditions.

For the calculation of the hybrid systems the planner can normally assess to reliable Data of the weather services. In remote areas like the Alps the climate Data must be referred through faraway-assessable weather stations. High Alpine experiences and the knowledge in the winter of occurring snow reflections are essential for planning. The sizing of the system for measured irradiation yields until 1700 W/m<sup>2</sup>. The selection of durable components is necessary because of the extreme climate conditions.

**The operational start:** Up to the beginning of the test operation at 12<sup>th</sup> of September,1995 the helicopter transported around 28 tons technical equipment to the Stüdlhütte. The extreme snowing and the storms delayed the planned start of operation. The helicopter could not fly and the material cableway could not drive because of the high snow level. Due to the described weather conditions the installed Photovoltaic (PV) systems inclusive the Battery Back-up started to operate in the

second half of September. For ensuring the equalising charge of the batteries and for covering the peak loads an additional District heating power station was installed in October 1995, which operates with pure vegetable oil. The power station produces 6 kW electrical and 11 kW thermal power and works perfectly in the winter season with minus 20 degrees.

### **The existing facilities integrated in the Stüdlhütte**

- Photovoltaic system (3,4 kWp: Approx. 31.5 m<sup>2</sup> 32 modules of 108 Wp installed on the roof of the hut and 2 Siemens inverters of 1500W and 600W/230V~),
- Battery back-up (capacity 2x2.000Ah/24V) with integrated control unit,
- District heating power station (6 kW electrical and 11 kW thermal power operating with pure vegetable oil),
- Electricity installation,
- Solar thermal system for heating,
- Drinking water sterilisation, ...

*The PV system with the two vented lead acid battery supply 73% of the consumed hut electricity. The discharging of the batteries is controlled through the integrated unit, which triggers the start up of the district heating power station.*

## 7 References

- /1/ G. Faninger, Solarmarkt in Österreich, Bundesverband Solar, 1998
- /2/ Intern: Marktübersicht.doc
- /3/ A. Indinger, R. W. Lang, H. Wilk, W. Weiß, Endbericht: Österreichisches Netzwerk für Nachhaltige Wirtschafts- und Technologieentwicklung, Aktionsschwerpunkt Solarenergie, 1999
- /4/ Intern: ESIF.doc European Solar Industry Federation (ESIF), 4/97: Solar market data from Europe
- /5/ G. Faninger, Sonnenenergie, Forschung und Nutzung in Kärnten, Klagenfurt 1985
- /6/ F.N. Fett, Photovoltaische und thermische solare Kühlung im Vergleich Projekt- Zwischenbericht
- /7/ R. HAAS et al., "PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN AUSTRIA A HISTORICAL SURVEY ON RESEARCH, PROMOTION AND DISSEMINATION ACTIVITIES",  
Institute of Energy Economics, Gußhausstr. 27-29/357, A-1040 Vienna, Austria  
Gerhard FANINGER, IFF Klagenfurt, Austria, Heinrich WILK, OKA, Linz, Austria  
Martin HUEMER, BMWV, Vienna, Austria  
Christian PETERKA, WIENSTROM, Vienna, Austria
- /8/ A. Studentschnig, "Ansätze für Optimale Dynamische Förderungsstrategien für eine mögliche Marktdurchdringung Erneuerbarer Energieträger am Beispiel Photovoltaik", Diplomarbeit TU Wien, 1997
- /9/ <http://www.siemens.de>