

## Photovoltaische Energiegewinnung

Alois Loidl und Joachim Hemberger  
Institut für Physik, Experimentalphysik V

Im Rahmen der Baumaßnahmen des Freistaates Bayern für die Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät wurde auf dem Gebäude des 1. Bauabschnitts, das für die Forschungsschwerpunkte Elektronische Korrelationen und Magnetismus bestimmt ist, die zur Zeit größte Photovoltaik-Anlage einer deutschen Hochschule installiert. Wir möchten dies zum Anlaß nehmen eine populärwissenschaftliche Einführung in die photovoltaische Energiegewinnung zu geben. Technische Details über die EKM-Anlage, wie z.B. über Auslegung und Energieertrag, sind im Anhang zu finden.

### 1 Vorbemerkungen

In einem Energieszenario zur Nutzung der Sonnenenergie ist die photovoltaische Energiegewinnung, also die direkte Umwandlung der Sonnenstrahlung in elektrischen Strom, ein wesentlicher Baustein. In einem Gesamtkonzept zur Nutzung regenerativer Energiequellen wird aber der Nutzung solarthermischer Anlagen, also der Umwandlung der Sonnenenergie in Wärme durch Erhitzung geeigneter Speichermedien in Solarkollektoren, eine mindestens ebenso große Bedeutung zukommen. Klar ist, daß zum gegenwärtigen Zeitpunkt insbesondere die photovoltaische Energiegewinnung nicht kostendeckend erfolgen kann. Dies ist bedingt durch den technischen Stand der Entwicklung bei Solarzellen und natürlich durch die niedrigen Strompreise, aufgrund einer noch ausreichenden Versorgung mit fossilen Energieträgern. Klar ist auch, daß regenerative Energiegewinnung spätestens in der Mitte des nächsten Jahrhunderts einsatzbereit sein muß. Dies gilt verschärft dann, wenn die Gesellschaft die Risiken der Energiegewinnung mittels Kernenergie nicht tragen will.

## 2 Historisches zum photovoltaischen Effekt

Der photovoltaische Effekt (pvE) ist die Erzeugung einer elektromagnetischen Kraft durch die Absorption von Licht. Die Absorption kann in Gasen, in Flüssigkeiten und in Festkörpern stattfinden und dabei positive und negative Ladungsträger erzeugen. Wesentlich ist, daß diese positiven und negativen Ladungen getrennt und über einen externen Widerstand (Verbraucher), abgeführt werden können. Auf diese Weise wird ein Teil des absorbierten Lichtes direkt in elektrische Energie umgewandelt.

Die erste Beobachtung des pvE wurden 1839 von Becquerel [1] gemacht. Er konnte eine Spannungsdifferenz nachweisen, wenn Licht auf Platin- oder Goldelektroden fiel, die in saure Lösungen eingetaucht waren. Der erste Bericht des pvE in einem Festkörper stammt von Adams und Day [2] aus dem Jahre 1877. Sie fanden elektrische Spannungsdifferenzen wenn Licht auf einen Selenstab fiel, an dessen Enden Platinelektroden aufgebracht waren. Weitere wesentliche Schritte in der Entwicklung der photovoltaischen Energiegewinnung waren die Entdeckung des pvE an Metall-Isolator Kontakten. Um 1930 entdeckten Lange [3] und Schottky [4] unabhängig voneinander photovoltaische Phänomene an den Grenzflächen von Kupfer und Kupferoxid Schichten. Die Einführung und Herleitung der elektrostatischen Potentialbarriere an der Metall-Isolator Grenzschicht machte Schottky zu einem herausragenden Pionier der Halbleitertechnologie.

Der wesentliche Meilenstein für die Entwicklung der Solarzelle war allerdings die Entwicklung des Transistors, die Ende der vierziger Jahre durch Brattain und Bardeen [5] und Shockley [6] bei den Bell Laboratories vorangetrieben wurde. Diese Transistoren wurden aus dotiertem Silizium hergestellt und bald zeigte sich, daß auch die Ausbeute an elektrischer Energie durch den pvE in diesen Materialien deutlich größer ist. Die ersten Solarzellen auf der Basis von dotiertem Halbleitern (Silizium und Cadmium-Sulfid) wurden 1954 von Rappaport [7], Chapin et al. [8] und Reynolds et al. [9] vorgestellt. Diese ersten Solarzellen hatten Wirkungsgrade von ca. 5%.

Bis ca. 1960 war der pvE nur ein Thema der Grundlagenforschung. Aufgrund der scheinbar unbegrenzt vorhandenen fossilen Energieträger wurde einer möglichen photovoltaischen Energiegewinnung keinerlei Bedeutung beigemessen. Ab ca. 1960 wurden Solarzellen zur Energieversorgung von Satelliten eingesetzt und die Anforderungen der Raumfahrt prägten von nun an die Entwicklung der Photovoltaik: Wesentliche Anforderungen an die Solarzelle waren eine hohe Effizienz, eine möglichst lange Lebensdauer und große Strahlenresistenz. So hatte z.B. der Satellit Vanguard I, der als Radiotransmitter arbeitet, eine Lebensdauer von 8 Jahren, die durch die Lebensdauer der Solarzellen aufgrund von Strahlenschäden begrenzt wurde. Deshalb spielte der

Herstellungspreis der Solarzellen in diesen Jahren überhaupt keine Rolle. Die Einstellung von Politik und Öffentlichkeit zu alternativen Energieträgern änderte sich in den 70er Jahren aufgrund der ersten sogenannten Energiekrise. Erstmals wurde darüber nachgedacht Strom aus Solarzellen zur allgemeinen Energieversorgung zu benutzen. Von nun an wurde bei der weiteren Entwicklung der Photovoltaik Anforderungen an terrestrische Anwendung und ökonomische Gesichtspunkte immer mit berücksichtigt.

Das Beispiel der Entwicklung der Photovoltaik von der Entdeckung 1839 bis zur Marktreife, die vielleicht erst 2010 erreicht sein wird, verdeutlicht wie unsinnig die Forderung nach Anwendungsrelevanz und Marktnähe für die Grundlagenforschung ist. Nach den ersten Beobachtungen von Becquerel betrug der ökonomisch relevante Zeitabschnitt ("Time to Market") der Photovoltaik fast zweihundert Jahre. Trotzdem, und das ist keine gewagte Prophezeiung, wird die Photovoltaik Mitte des 21. Jahrhunderts aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken sein.

### 3 Physikalische Grundlagen

In diesem Abschnitt möchten wir die einfachen physikalischen Grundlagen der Photovoltaik vorstellen. Die physikalischen Prinzipien und Gesetze die hier benutzt werden sind einfaches Lehrbuchwissen und sind auch in manigfacher Form in Lehrbüchern dokumentiert. Einige repräsentative Bücher, aus denen wir auch einige Abbildungen entnommen haben sind in den Literaturzitaten [10]-[15] angegeben.

#### 3.1 Das Sonnenspektrum

Das Sonnenspektrum außerhalb der Atmosphäre kann durch die Strahlungscharakteristik eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von  $T = 5762$  K beschrieben werden. Die spektrale Strahlungsdichte ergibt sich nach dem Planckschen Gesetz

$$S(\nu)d\nu = 2h\nu^3 d\nu/c^2 [\exp(h/kT) - 1]$$

$S(\nu)d\nu$  ist die pro Flächeneinheit und pro Frequenzintervall  $d\nu$  von der Sonne abgestrahlte Leistung. An der äußeren Erdatmosphäre beträgt die spektrale Strahlungsdichte  $135.3$  mW/cm<sup>2</sup>. Diesen Wert bezeichnet man als die Solarkonstante des AM0 Spektrums. Hier steht AM für "air mass" und die Null bezeichnet die Strahlungscharakteristik außerhalb der Erdatmosphäre, wo die Sonnenstrahlung noch keine Verluste beim Durchgang durch die

Erdatmosphäre erlitten hat. Das AM0 Spektrum und die spektrale Strahlungsverteilung eines Schwarzen Körpers mit  $T = 5762 \text{ K}$  sind in Abbildung 1 dargestellt. Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre treten verschiedene Streu- und Absorptionsprozesse auf: Absorption an elektronischen Anregungszuständen, an molekularen Rotations- und Schwingungsbanden, Streuung an Staubteilchen in der Luft, Rayleigh Streuung, etc.. Diese Verlustprozesse gewinnen mit zunehmendem Weg der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre an Bedeutung. Begriffe wie AM1 oder AM2.5 beschreiben die Länge des Weges die das Sonnenlicht in der Erdatmosphäre zurückgelegt hat. Bei senkrechter Einstrahlung auf die Erdoberfläche definiert man den Weg als AM1. Bei einem Einfallswinkel von  $60^\circ$  findet man dann den doppelten Weg, AM2. Ein AM2 Spektrum mit den dazugehörigen Absorptionsbanden ist ebenfalls in Abbildung 1 eingezeichnet.

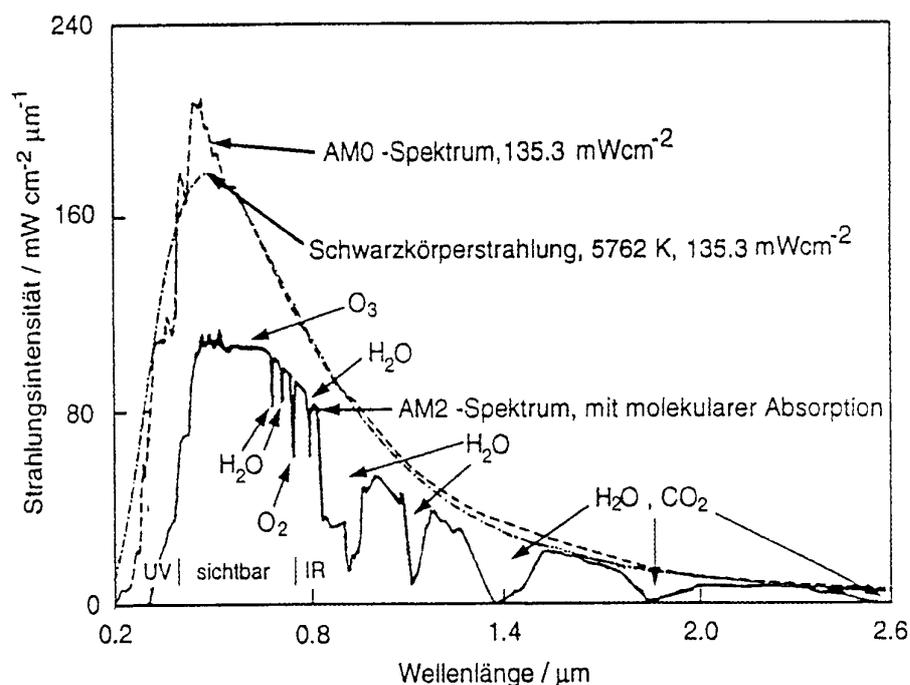


ABBILDUNG 1: Spektrale Strahlungsverteilung des Sonnenlichtes für AM0 und AM2 Bedingungen als Funktion der Wellenlänge des Lichtes (nach Lewerenz und Jungblut [13]).

## 3.2 Die photovoltaische Energiewandlung

Um aus elektromagnetischer Strahlung (Licht) elektrischen Strom zu erzeugen sind drei Bedingungen zu erfüllen: Die Erzeugung von Elektron-Lochpaaren, die Trennung von positiver und negativer Ladung und der Abgriff dieser Ladungen über einen externen Verbraucher oder Speicher.

### 3.2.1 Erzeugung von Elektron-Lochpaaren

In einem kristallinen Festkörper sind die Elektronen der Einzelatome in kollektiven Kristallbändern angeordnet. Die einzelnen Bänder sind energetisch voneinander getrennt und in den Zwischenbereichen können sich die Elektronen nicht bewegen. Ist nun das energetisch am höchsten liegende Band von Elektronen nur teilweise besetzt, so können sich die Elektronen in diesem Band frei bewegen und wir sprechen von einem Metall. Bei Anlegen einer externen Spannung fließt ein endlicher Strom. Ist dieses Band allerdings vollständig besetzt und das darüberliegende Band vollständig leer, so ist der elektrische Widerstand bei  $T = 0$  K unendlich groß. Die Elektronen können sich nicht bewegen, da dies eine Variation der Elektronenenergien verlangen würde, aber aufgrund des Pauli-Prinzips alle möglichen Zustände vollständig besetzt sind. Abhängig von der Energielücke  $E_L$  zwischen dem letzten besetzten Band (Valenzband) und dem ersten unbesetzten Band (Leitungsband) sprechen wir bei diesen Materialien von Isolatoren ( $E_L > 3$  eV) oder Halbleitern ( $0 \text{ eV} < E_L < 3 \text{ eV}$ ). Erst mit steigender Temperatur werden Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben und stehen damit zur Stromleitung zur Verfügung. Gleichzeitig werden im Valenzband Löcher erzeugt, die ebenso zur elektrischen Leitung beitragen. In idealen Halbleitern ist dieser Prozeß der thermischen aktivierten Erzeugung von Elektron-Lochpaaren klein, denn man muß bedenken, daß 1 eV ungefähr einer Temperatur von 10 000 K entspricht. Aber ebenso wie Elektron-Lochpaare thermisch erzeugt werden können, können sie auch durch Absorption von Licht entstehen. Wesentlich ist, daß die Energie des einfallenden Photons größer ist als die Energie der Lücke zwischen Leitungs- und Valenzband. Die Anregung eines Elektrons in das Leitungsband und die gleichzeitige Schaffung eines Lochzustandes im Valenzband durch die Absorption eines Lichtquantens mit der Energie  $h\nu$  ist in Abbildung 2 dargestellt. Typische Energielücken gebräuchlicher Halbleitermaterialien und der damit nutzbare Teil des Sonnenspektrums ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die in einem Halbleiter erzeugten Elektron-Lochpaare werden aber in kürzester Zeit rekombinieren und können nicht über einen externen Verbraucher abgeführt werden. Der wesentliche Schritt der photovoltaischen Energiege-

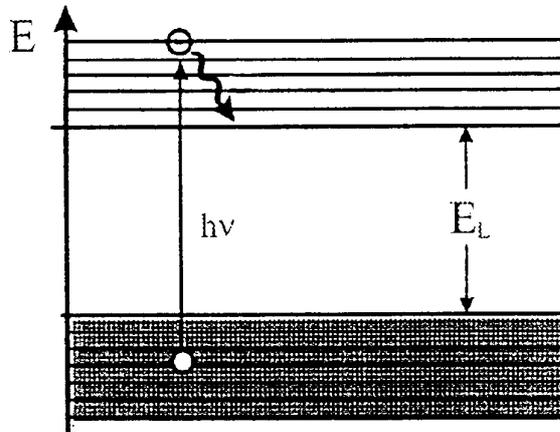


ABBILDUNG 2: Anregung eines Elektrons vom Valenzband in das Leitungsband durch ein Photon der Energie  $h\nu$  (nach Würfel [14])

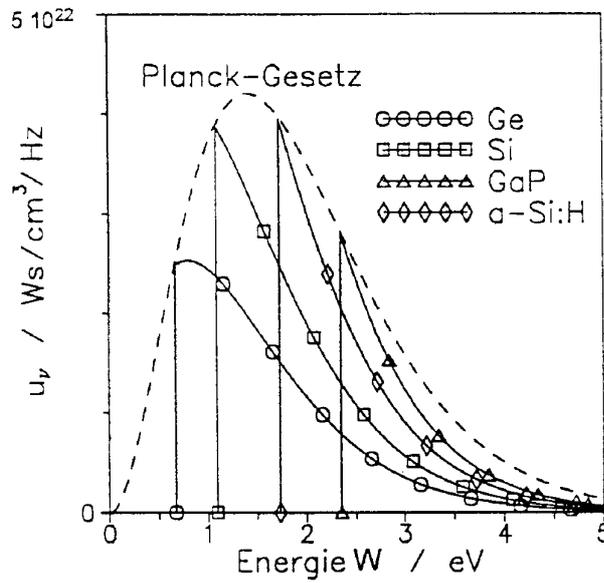


ABBILDUNG 3: Planck'sches Strahlungsgesetz (Energiedichte gegen Energie) für einen schwarzen Körper mit einer Temperatur  $T = 5762 \text{ K}$  und der photovoltaisch nutzbare Anteil des Sonnenspektrums durch unterschiedliche Halbleiter. Die Energie der Bandlücken sind als Abschneidekanten in das Spektrum eingezeichnet (nach Wagram und Eschrich [11]).

winnung liegt nun in der Trennung der negativen (Elektronen) und positiven elektrischen Ladungen (Löcher). Dies geschieht durch Einbringen einer Raumladungszone, die z.B. durch einen pn-Übergang realisiert werden kann.

### 3.2.2 Trennung ungleicher Ladungen

Die Grundlage der Solarzelle ist eine pn-Diode. Ein pn-Übergang ist der Kontakt zweier Halbleitermaterialien, die unterschiedlich dotiert wurden. Dotieren eines Halbleiters bedeutet Zugabe von Fremdatomen, die eine höhere (Donatoren) oder niedrigere Wertigkeit (Akzeptoren) als die Gitteratome besitzen. Damit werden in der Umgebung dieser Fremdatome entweder Überschusselektronen (n-Leiter) oder Überschußlöcher (p-Leiter) zu finden zu sein. Für das Verständnis der Funktionsweise einer Solarzelle ist die genaue Kenntnis der Vorgänge bei einem pn Übergang von entscheidender Bedeutung. Nehmen wir an, wir bringen zwei Siliziumkristalle mit gleich hoher Konzentration von Donatoren (n-dotiertes Silizium, z.B. Si:P) und Akzeptoren (p-dotiertes Silizium; z.B. Si:B) in Kontakt. Betrachten wir den pn-Übergang bei Raumtemperatur, so werden die beweglichen Ladungsträger aufgrund des Konzentrationsunterschieds über den Kontakt in den jeweiligen anderen Bereich diffundieren, und zwar die Löcher vom p-Gebiet in das n-Gebiet und die Elektronen vom n-Gebiet in das p-Gebiet. Damit bleiben die jetzt nicht mehr kompensierten Ionenrümpfe der Akzeptoren und Donatoren als ortsfeste Raumladungen zurück. Es entstehen im p-Gebiet negative und im n-Gebiet positive Rumpfladungen, die ein elektrisches Feld bewirken. Werden nun bei Beleuchtung in der Raumladungszone Elektron-Lochpaare erzeugt, so werden diese aus der Raumladungszone in die beiden unterschiedlichen Kristallhälften getrieben. An den Rückseiten des pn-Überganges können diese lichtelektrischen Elektronen über einen Verbraucher abgeführt werden.

### 3.2.3 Kennlinie und Ersatzschaltbild

Eine Solarzelle ist also ein optoelektronisches Bauelement, in dem durch Lichtabsorption ein Elektron-Lochpaare erzeugt und anschließend durch die Raumladungszone voneinander getrennt wird. So wird ein Potentialunterschied erzeugt, der einen elektrischen Strom über einen externen Verbraucher treiben kann. Das Ersatzschaltbild einer pn Diode ist in Abbildung 5 zusammen mit der dazu gehörenden Diodenkennlinie ohne ( $E = 0$ ) und mit Beleuchtung ( $E > 0$ ) gezeigt.

Der Kurzschlußstrom  $I_K$  und die Leerlaufspannung  $U_L$  sind die Schnittpunkte der  $I(U)$ -Kennlinie mit den Koordinatenachsen. Wie der Name sagt, erhält man den Kurzschlußstrom wenn an der Solarzelle keine Spannung vor-

handen ist. Im Idealfall ist der Kurzschlußstrom durch die Lichtstromdichte  $I_{phot}$  gegeben, d.h. die gesamte durch das Licht erzeugte Stromdichte. Die Leerlaufspannung erhält man, wenn der Solarzelle kein Strom entnommen wird. Für die Leerlaufspannung gilt

$$U_L \approx k_B T / e \ln(I_K / I_0).$$

Hier entspricht  $k_B T$  der thermischen Energie,  $e$  der Elementarladung und  $I_0$  bezeichnet die Dunkelstromdichte. D.h. die Leerlaufspannung entspricht dem Logarithmus des Verhältnisses von Kurzschluß zu Dunkelstromdichte. Da bei guten Solarzellen die Kurzschlußstromdichte sehr schnell einem Sättigungswert zustrebt, hängt das Erreichen einer großen Leerlaufspannung von einer der Reduzierung des Sättigungsstromes ab. Wie wir im nächsten Ab-

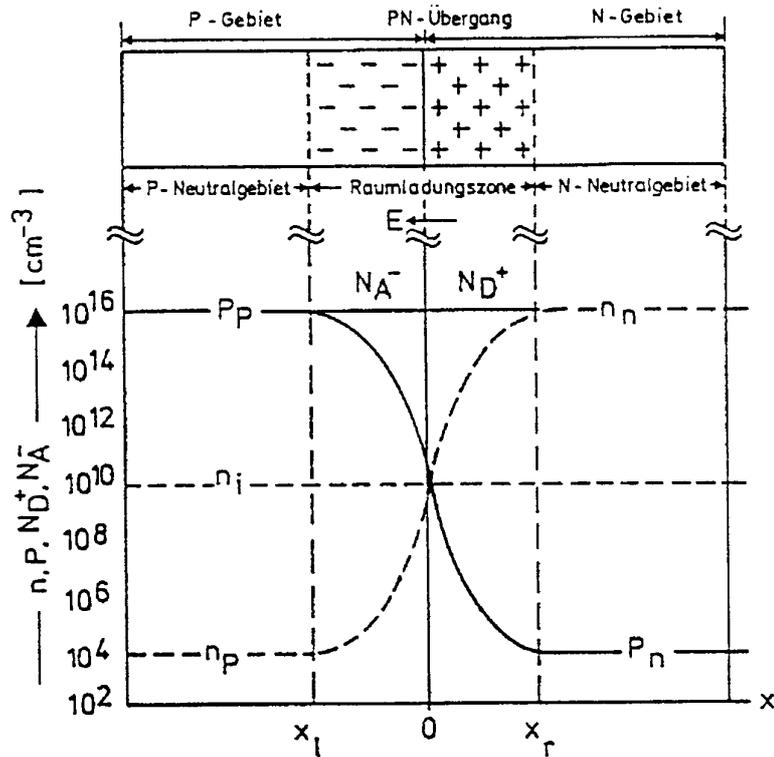


ABBILDUNG 4: Dotierungsverlauf und Konzentrationsverteilung in einem symmetrischen pn-Übergang im thermischen Gleichgewicht.  $N_A$  und  $N_D$  bezeichnet die Konzentration von Akzeptoren und Donatoren;  $n_n$ ,  $n_p$ ,  $p_n$  und  $p_p$  bezeichnen die Elektronen- ( $n$ ) und Löcherkonzentrationen ( $p$ ) in den  $n$ - und  $p$ -dotierten Bereichen (nach Goetzenberger et al. [10]).

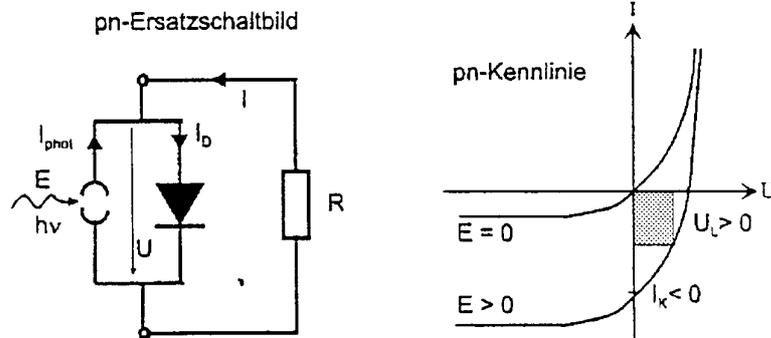


ABBILDUNG 5: Kennlinie und Ersatzschaltbild eines pn Überganges (nach Wagemann und Eschrich [11]). Schraffiert ist die Fläche der maximalen Leistungsentnahme eingezeichnet).

schnitt sehen werden ist eine große Leerlaufspannung wichtig für einen hohen Wirkungsgrad der Solarzelle.

### 3.2.4 Grenzen der Energiekonversion in Solarzellen

Bei der Herleitung der Strom-Spannungskennlinie in Abbildung 5 wurden alle Transportwiderstände außer acht gelassen. Außerdem wird der Strom der Minoritätsladungsträger nicht berücksichtigt. Unter der Voraussetzung der Gültigkeit dieser Näherungen tragen alle vom Licht erzeugten Elektron-Lochpaare zum Photostrom bei, die nicht rekombinieren. Bei homogener Anregung durch das einfallende Licht sind das gerade so viele Ladungsträger, wie innerhalb der Diffusionslänge erzeugt werden. Die maximale Leistungsentnahme einer Solarzelle ist durch das größte Rechteck gegeben, daß unter die Strom-Spannungskennlinie im vierten Quadranten paßt. Der maximale Leistungspunkt ("maximum power point") entspricht einem bestimmten Verhältnis von  $U_m/I_m$ . Dieses Optimum an Leistungsentnahme muß natürlich durch einen entsprechend angepaßten Arbeitswiderstand gewährleistet werden. An diesem optimalen Arbeitspunkt wird die maximale Leistungsabgabe  $P_m = U_m I_m$  erzielt. Das Verhältnis von maximaler Leistung zur Größe  $U_L I_K$  bezeichnet man als Füllfaktor  $FF$ :

$$FF = U_m I_m / U_L I_K .$$

Der Füllfaktor gibt an, wieviel Fläche unter der Kennlinie vom Rechteck  $P_m$  gegenüber dem maximalen Rechteck  $U_L I_K$  ausgefüllt wird. Füllfaktoren von Solarzellen liegen üblicherweise in der Größenordnung von ca. 0.8. Der Wirkungsgrad einer Solarzelle kann nun über den Füllfaktor angegeben werden:

$$\eta = FF \cdot I_K U_L / P_{\text{Licht}} .$$

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ist also durch das Verhältnis der von der Zelle photovoltaisch erzeugten elektrischen Leistung zur einfallenden Lichtleistung  $P_{\text{Licht}}$  definiert. In dieser einfachen und sehr idealisierten Betrachtung findet man, daß hohe Wirkungsgrade von Solarzellen durch möglichst großen Kurzschlußstrom und möglichst große Leerlaufspannung gegeben werden. Für einen großen Kurzschlußstrom sollte die Solarzelle möglichst dick gemacht werden. Bei großer Dicke der Zelle wird die Absorption des Lichtes annähernd 1 und damit der erzeugte Kurzschlußstrom maximal. Die Leerlaufspannung wird maximal, wenn die Diffusionslängen der erzeugten Minoritätsladungsträger sehr groß werden und/oder wenn die Dicke der Solarzelle möglichst klein wird. In den Wirkungsgrad einer Solarzelle geht aber auch entscheidend der Bandabstand des verwendeten Halbleitermaterials ein. Der Kurzschlußstrom ist durch den absorbierten Photonenstrom gegeben. Er ist natürlich für Halbleiter mit Bandlücke  $E_L = 0$  maximal und nimmt mit wachsender Bandlücke ab. Die Leerlaufspannung andererseits ist Null für  $E_L = 0$  und nimmt mit wachsendem Bandabstand zu. Der Wirkungsgrad der Solarzelle wird daher bei einem endlichen Bandabstand maximal sein. Der Wirkungsgrad einer Solarzelle als Funktion des Bandabstandes wird in Abbildung 6 für ein AM1.5 Spektrum gezeigt. Die Bandlücken für Si und Ga As sind eingezeichnet. Sie zeigen, daß diese beiden Halbleitermaterialien für terrestrische Anwendungen annähernd optimale Energielücken besitzen.

Zur Zeit liegen die höchsten Wirkungsgrade von Solarzellen aus monokristallinem Silizium, die unter Laborbedingungen hergestellt wurden (Flächen von  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ , AM1.5 Bedingungen) bei ca. 23%. Großtechnisch hergestellte Zellen zeigen Wirkungsgrade von ungefähr 15%. Das Problem der niedrigen Wirkungsquerschnitte liegt in der nur sehr unvollständigen Ausnutzung des Solarspektrums begründet: So sind ca. 24% der Sonnenstrahlung zu langwellig und damit ist die Energie der Lichtquanten nicht groß genug um ein Elektron-Lochpaar zu erzeugen. Weitere 33% des Sonnenspektrums werden in Wärme umgewandelt. Diese Verluste kommen von den kurzwelligeren (hochenergetischen) Anteilen des Spektrums. Die zu hohe Energie der Lichtquanten im Vergleich zur Energielücke des Halbleiters wird als Wärme an das Kristallgitter abgegeben. Diesen extremen Einschränkungen im Wirkungsgrad von Solarzellen kann dadurch begegnet werden, daß man die einfallende Lichtstrahlung aufspaltet und einer Anordnung von mehreren Solarzellen mit unterschiedlichen Energielücken zuführt. So errechnet sich der Wirkungsgrad von einer Anordnung von drei Solarzellen mit Energielücken  $E_L = 0.94, 1.34$  und  $1.91 \text{ eV}$  unter AM0 Bedingungen zu 39%. Eine Anordnung aus 26 Zellen ergibt unter AM0 Bedingungen einen maximalen Wirkungsgrad von ca. 50%. Benutzt man konzentriertes Licht, so kann bei einer Lichtverstärkung von 1000 und wiederum einer Anordnung von 26 optimierten Solarzellen der

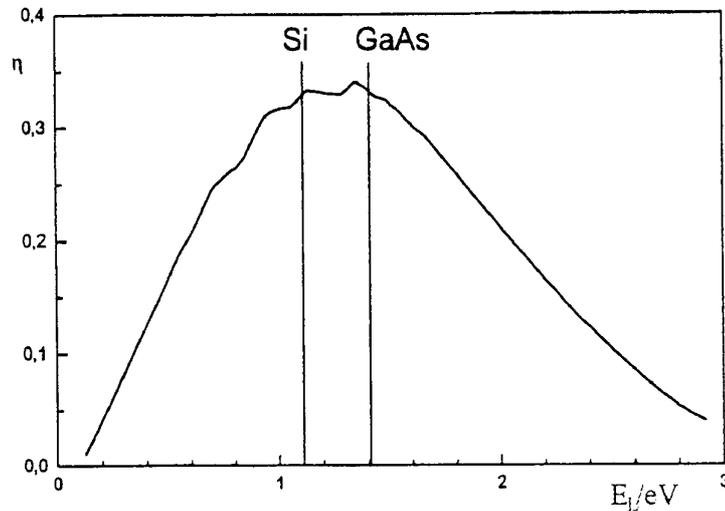


ABBILDUNG 6: Wirkungsgrad von Solarzellen als Funktion des Bandabstandes für ein AM1.5 Spektrum. Die Bandlücken für Si und GaAs sind eingezeichnet. In diesen idealisierten Rechnungen können Wirkungsgrade bis zu 35% erreicht werden (nach Würfel [14]).

Wirkungsgrad auf ca. 60% erhöht werden.

## 4 Ausblick

Wie man dem Anhang entnehmen kann, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt, d.h. bei dem gegebenen Stand der Entwicklung der photovoltaischen Energieerzeugung und bei der sehr billig verfügbaren elektrischen Energie aus fossilen Kraftwerken und aus Kernenergie, Solarstrom noch nicht konkurrenzfähig. Es ist jedoch klar absehbar, daß sich dieses Verhältnis mittelfristig zugunsten der Solarenergie verschieben wird: Die technische Weiterentwicklung photovoltaischer Energieerzeugung zielt auf billigere Herstellung, meist durch Materialeinsparung, und/oder auf deutlich höhere Wirkungsgrade. Dünnschichtzellen, Zellen aus amorphem Silizium, Tandemzellen, Kugelelement-Solarzellen, Konzentratorzellen, Farbstoff-sensibilisierte-Solarzellen sind nur einige Entwicklungsstränge die in F&E-Strategien verfolgt werden und die deutliche Kosteneinsparungen und deutlich höhere Ausbeuten versprechen. Zu bedenken ist, daß diese Entwicklung erst begonnen hat und eine Sättigung oder gar ein Stillstand nicht abzusehen sind. Nach Untersuchungen der Enquetekommission des deutschen Bundestages „Technikfolgen“ liegen zur

Zeit die Kosten photovoltaischer Energieanlagen bei einem Preis von 1.67 DM/kWh (siehe dazu auch die Investitionskosten und den Energieertrag auf der Basis der zur Zeit gültigen Energiepreise; hier muß noch bedacht werden daß Zinsen, Reparatur- und Wartungskosten noch nicht berücksichtigt sind). Die geschätzten Energiepreise für Solarstrom für das Jahr 2050 werden mit DM 0.20/KWh angegeben. Bei diesen Berechnungen geht man von einem deutschen Standort, von 1050 Nennlaststunden pro Jahr und einer 30 jährigen Laufzeit der Photovoltaikanlage aus.

Natürlich gibt es keine Energietechnologie, die für die Umwelt vollkommen unschädlich ist. Ganz sicher ist die pvE vollständig geräuschlos und abgasfrei. Sicherlich ist auch der Eingriff in den Wärmehaushalt der Erde selbst bei großflächiger Nutzung von Solarzellen nicht dramatisch. Im Gegensatz zu natürlicher Abkühlung laufen in der pvE Abkühlungsprozesse in einem für den Nutzer günstigeren Weg. Die wesentlichen Einwände gegen eine Nutzung pvE sind sicherlich der große Flächenbedarf aufgrund der geringen Energiedichte der Sonnenstrahlung und der geringen Wirkungsgrade der Solarzellen. Wir möchten dazu ein einfaches Rechenbeispiel angeben (zitiert nach P. Würfel [14]): In Deutschland leben 80 Mio. Einwohner auf 357 000 km<sup>2</sup>. Das bedeutet 4425 m<sup>2</sup>/Kopf. Im Jahresmittel liefert die Sonneneinstrahlung auf diese Fläche ca. 500kW/Jahr an Energie. Der derzeitige Verbrauch in Deutschland beträgt 5.7 kW/Kopf an Energie und davon 0.76 kW/Kopf (ca. 6600 kWh/Kopf/Jahr) an elektrischer Energie. Unter der Annahme eines Wirkungsgrades der Solarzellen von 20 % benötigt man daher zur Versorgung des gesamten elektrischen Energiebedarfes über Solarzellen ca. 33 m<sup>2</sup>/Kopf. Dies ist eine sehr große Fläche, auch wenn man berücksichtigt, daß zur Zeit in Deutschland ca. 23 m<sup>2</sup> pro Kopf der Bevölkerung von Gebäuden bedeckt sind. Bereits diese einfachen Abschätzungen zeigen, daß vor einer breiten Nutzung des pvE sicherlich deutliche Energieeinsparungen notwendig sind. Energieeinsparungen stellen auch kurzfristig den zur Zeit sicherlich effektivsten und umweltschonendsten Aspekt eines alternativen Energiekonzepts dar. Photovoltaische Energiegewinnung sollte man nicht als einzige Möglichkeit, sondern nur in einem Gesamtkonzept regenerativer Energiequellen sehen.

Zusammenfassend möchten wir sagen, daß die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Strom über den pvE eine elegante und sehr umweltschonende Energietechnologie ist. Mögliche Umweltschäden treten bei der Photovoltaik im Halbleiter-Herstellungprozeß durch die Verwendung von organischen Lösungsmittel auf. In diesem Bereich wurden bereits große Fortschritte bei der Einführung umweltschonenderer Herstellungsprozesse erzielt. Bei massivem Einsatz von pvE ist auch der Aufwand an Halbleiter-Rohmaterialien nicht zu vernachlässigen. Aber bei der pvE gibt es keine beweglichen Teile,

sie hat deshalb einen sehr geringen Wartungsaufwand, pvE arbeitet abgasfrei und geräuschlos, der Brennstoff wird von der Sonne geliefert. Die "energy pay back time" also die Zeit die notwendig ist um die Energie zu erzeugen, die bei der Herstellung verbraucht wurde, liegt zwischen 3 und 5 Jahren, ist also kurz verglichen mit einer Lebensdauer von 20 bis 40 Jahren. Ein Nachteil der Photovoltaik liegt sicherlich in der geringen Energiedichte der Sonneneinstrahlung und dem damit verbundenem großen Flächenaufwand bei der Stromerzeugung. Solarelektrizität kann aber bereits heute kostendeckend zur Energieversorgung von Signalstationen, „Inselhäusern“ und energieautarker mobiler Geräte eingesetzt werden. Durch die kombinierte Verwendung von Solarzellen und von Sonnenkollektoren zur Warmwassererzeugung und Heizung können Einfamilienhäuser mit dem heutigen Stand der Technik autonom versorgt werden. Es scheint realistisch anzunehmen, daß um 2020 die Photovoltaik einen nennenswerten Beitrag zur elektrischen Energieversorgung in Deutschland leisten wird.

## Literatur

- [1] E. Becquerel, Coptes Rendues 9, 561, 1839
- [2] zitiert nach J. F. Loferski, in "Photovoltaic Devices", Encyclopedia of Applied Physics, Vol 13, (Hsg.: G. L. Trigg), VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1995
- [3] B. Lange, Z. Physik 31, 139, 1930
- [4] W. Schottky Z. Physik 31, 913, 1930
- [5] W. Brattain, J. Bardeen, Phys. Rev. 74, 230, 1948
- [6] W. Shockley, Bell. Sys. Tech. J. 28, 435, 1949
- [7] P. Rappaport, Phys. Rev. 93, 246, 1954
- [8] D.M. Chapin, C. S. Fuller, G- L. Pearson, Phys. Rev. 96, 533, 1954
- [9] D. C. Reynolds, G. Leis, L. L. Antes, R. E. Marburger. Phys. Rev. 96, 533, 1954
- [10] A. Goetzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner, Stuttgart, 1997
- [11] H.-G. Wagemann, H. Eschrich, Grundlagen der photovoltaischen Energiegewandlung, Teubner, Stuttgart, 1994
- [12] D. Meissner (Hrsg.), Solarzellen, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1993
- [13] H.-J. Lewerenz, H. Jungblut, Photovoltaik. Springer, Berlin, 1995
- [14] P. Würfel, Physik der Solarzellen, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 1995
- [15] F. Lasnier, T.G. Ang, Photovoltaic Engineering Handbook. Adam Hilger, Berlin und New York, 1990

## Anhang: Daten zur Solaranlage:

- Nennleistung: 35.475 kW (bei AM1.5 Strahlung)  
15 Teilgeneratoren
- Solarmodule: 645 × Siemens M55 (kristalline Siliziumzellen)
- Modulfläche: insgesamt 273 m<sup>2</sup>

Die Anlage der Universität Augsburg ist als reine Netzeinspeiseanlage ausgeführt und in zwei Teilanlagen (Netzfeld und Experimentierfeld) gegliedert.

	Experimentierfeld	Netzfeld
--	-------------------	----------

Die Solarmodule bestehen aus je 36 Zellen in Reihe geschalteten kristallinen Siliziumzellen.

- Wirkungsgrad der Module:  $\eta \approx 14\%$
- Klemmspannung und Kurzschlußstrom:  $U_L = 21.7 \text{ V}$ ,  $I_K = 3.4 \text{ A}$
- Maximaler Leistungspunkt:  $17.4 \text{ V} \times 3.15 \text{ A} \approx 55 \text{ W}$

Die Verschaltung der Teilgeneratoren 1 bis 11 im Experimentierfeld erfolgt im Mittel in jeweils 4 Teilsträngen zu je 5 Solarmodulen (Teilgenerator 12 besteht aus einem solchen Strang). Es werden je 2 Teilstränge in Reihe und dann je 2 dieser doppelten Teilstränge parallel geschaltet (Ausgangsspannung am Arbeitspunkt:  $U_{DC} \approx 175 \text{ V}$ ). Die Verschaltung der 3 Teilgeneratoren im Netzfeld erfolgt in jeweils 7 Parallel-Strängen zu je 20 Modulen in Reihe (Ausgangsspannung am Arbeitspunkt:  $U_{DC} \approx 350 \text{ V}$ ).

Die DC-Leistung des Netzfeldes wird so auf die zugehörigen Wechselrichter verteilt, das stets möglichst viele im maximalen, d.h. effizientesten Leistungsbereich arbeiten. Nach kontinuierlicher Prüfung der gemäß VDE-Bestimmung vorgegebenen Parameter (z.B. Frequenzfenster, Spannungsfenster oder Netzeingangsimpedanz) wird die erzeugte AC-Leistung direkt ins elektrische Netz der Universität eingespeist (keinerlei Speicher-Akkumulatoren etc.).

Meßtechnisch erfaßbar sind Größen wie Einstrahlung, Luft- und Modultemperatur, Generatorspannungen, erzeugte DC-Leistung, AC-Spannungen der Wechselrichter und eingespeiste AC-Leistung; die Daten werden kontinuierlich als 15minütige Mittelwerte abgespeichert.

- Gesamtkosten der Anlage: ca. 600 000 DM  
davon
  - 65 % für Module
  - 10 % für Wechselrichter
  - 15 % für Aufständering
  - 10 % für Sonderausstattung  
des Experimentierfeldes  
(Meßtechnik, Datenerfassung, etc.)

- 1997 „erzeugte“ elektrische Energie: 30 272 kWh

Das sind 4.8% des Verbrauchs im EKM (631 702 kWh) und 0.44% des Verbrauchs im Neubaubereich der Universität (8 812 700 kWh).

- 1997 eingestrahlte Energie: ca. 400 000 kWh
- effektiver Wirkungsgrad: 7.6%  
(genutzte / eingestrahlte Energie 1997)
- Geschätzte Lebensdauer der Anlage: 20 - 40 Jahre
- Energieertrag in 30 Jahren: ca. 900 000 kWh  
= 207 000 DM bei 23 Pf/kWh
- Energieerntefaktor (grober Schätzwert): ca. 4  
(Nutzenergie / Produktions- und Betriebsenergie)

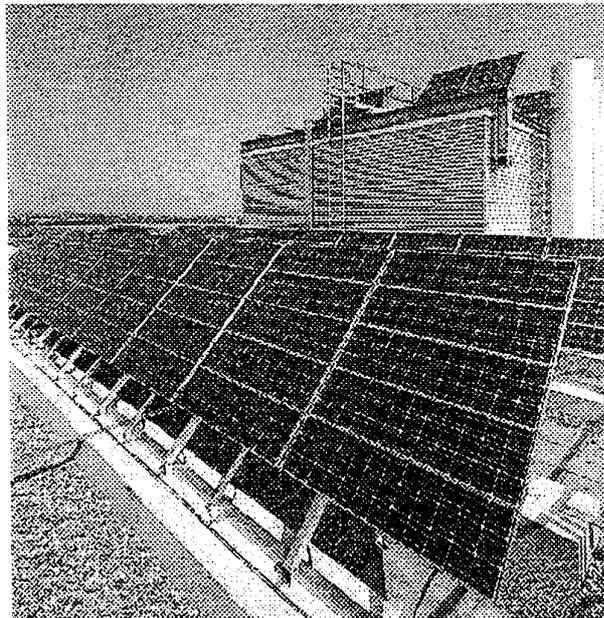


ABBILDUNG 7: Photovoltaikanlage auf dem Dach des EKM