

1 Einleitung

Die Sonne ist die Grundlage aller Lebensprozesse auf der Erde. Außer der Kernenergie und der Erdwärme sind alle heute gebräuchlichen Energiearten eine direkte oder indirekte Nutzung der Sonnenenergie. Meistens wird dabei auf gespeicherte Sonnenenergie zurückgegriffen – sei es in Form von fossilen Brennstoffen (Öl, Gas, usw.) oder in Form von Biomasse (z. B. von Holz). Fossile Brennstoffe sind in Millionen von Jahren gespeicherte Sonnenenergie. Diese Vorräte werden in naher Zukunft aufgebraucht sein. Die Menschheit muß spätestens zu dieser Zeit über neue Energiequellen verfügen.

Es scheint naheliegend, daß dabei an die Sonnenenergie gedacht wird. Denn jährlich trifft etwa das 20 000fache des benötigten Weltjahresenergiebedarfs in Form von Sonnenenergie auf die Erdoberfläche.

So ist es verständlich, daß in den letzten Jahren vermehrt versucht wird, diese Energie direkt zu nutzen. Eine der spektakulärsten Methoden dazu ist die Erzeugung von hochwertiger elektrischer Energie mittels Solarzellen. Diese Technologie wird erst seit etwa 20 Jahren für Anwendungen auf der Erde eingesetzt. Dabei wurden bereits große Fortschritte erzielt und beachtliche Projekte realisiert.

Die Zahl der „solaren Stromversorgungen“, wie solche Anlagen genannt werden, ist heute sehr groß. Sie versorgen meist kleinere Objekte, die nicht vom öffentlichen Stromnetz erreicht werden, mit elektrischer Energie. So wurden im Alpenraum Tausende von Ferien- und Alpenhäusern elektrifiziert. Solare Stromversorgungen auf Booten, in Gartenhäusern und Wohnmobilen sind heute schon fast eine Selbstverständlichkeit.

Seit einigen Jahren werden immer mehr Solaranlagen gebaut, die ihre Energie direkt in das Verbundnetz abgeben. Diese „solaren Netzeinspeisungen“ werden die bedeutendste Anwendung der Photovoltaik des nächsten Jahrtausends sein. Damit ergeben sich völlig neue Perspektiven für die langfristige Energieversorgung der Menschheit.

1.1 Was ist eine Solarzelle?

Eine Solarzelle ist ein aktives Bauelement, das Licht in elektrische Energie umwandelt.

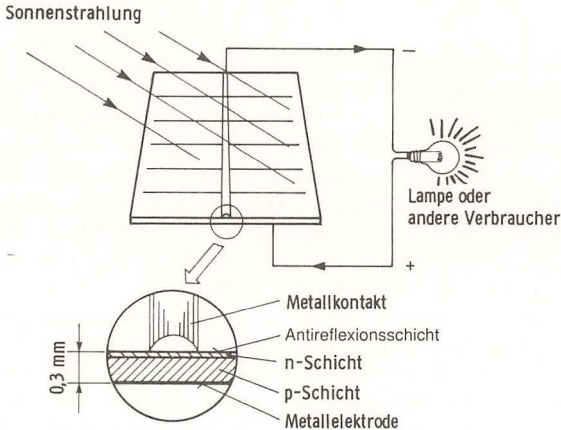


Abb. 1 Schematischer Schnitt durch eine Solarzelle

Die Solarzelle besteht meistens aus dünnen (ca. 0,3 mm) Halbleiterscheiben. Sie haben einen Plus- und einen Minuspol. Fällt Licht auf die Zelle, so entsteht zwischen dem Minus- und dem Pluspol eine elektrische Spannung. Damit kann ein elektrischer Verbraucher (Lampe, Motor) betrieben werden (Abb. 1).

Es können auch einzelne Zellen zusammengeschaltet werden, so daß große Leistungen erzeugt werden können.

Solarzellen sind also etwas ganz anderes als Sonnenkollektoren, die zur Wärmeproduktion benutzt werden.

1.2 Entwicklung von Solarzellen

Das Grundprinzip der Solarzelle ist der *photovoltaische Effekt*. So wird die Umwandlung von Licht in elektrische Energie genannt.

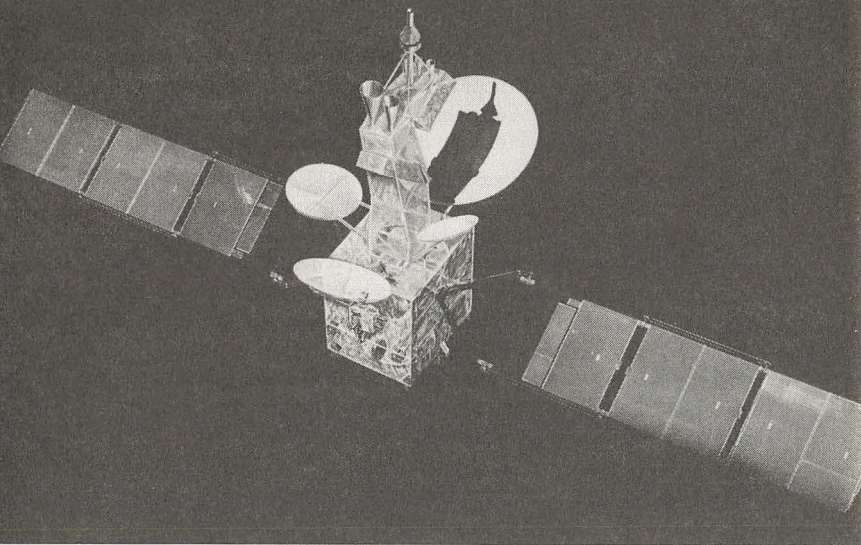


Abb. 2 Satellit Intelsat V mit 140 000 Solarzellen (Foto: Telefunken electronic)

Dieses Prinzip wurde bereits 1839 vom französischen Physiker Becquerel entdeckt. Die technischen und theoretischen Grundlagen für eine erfolgreiche Anwendung fehlten jedoch noch.

In den folgenden Jahrzehnten gelangen verschiedenen Forschern Erfindungen, die 1954 zur Entwicklung der Silizium-Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 8 % führten. Die Erfindung des ersten Transistors (1947) war der unmittelbare Wegbereiter, da die Herstellung dieser Solarzellen ähnlich war wie die Herstellung dieser Halbleiterelemente. Das Resultat waren sehr teure Solarzellen, die nur für spezielle Einsatzzwecke taugten (Abb. 2).

Erstmals wurden Solarzellen zur Energieversorgung in Satelliten eingesetzt. Seit 1957 wurden und werden immer mehr Satelliten mit Solarzellen gespeist. Dabei stehen die Kosten der Solarzellen nicht im Vordergrund der Überlegungen. Viel wichtiger ist ein hoher Wirkungsgrad und ein möglichst kleines Gewicht des Solargenerators. Wichtig

ist auch die Zuverlässigkeit der Zellen, weil im Weltraum Reparaturarbeiten sehr teuer oder gar nicht möglich sind. Auch die Lebensdauer der Zellen rückt in den Vordergrund, ist doch die Beanspruchung durch die hohe Strahlung im Weltall viel stärker als auf der Erde.

Nach der sogenannten Energiekrise von 1973 rückten die Solarzellen und mit ihnen die weiteren Nutzungsarten der Sonnenenergie in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Dabei wurde sehr schnell klar, daß die herkömmlichen Solarzellen viel zu teuer für einen Einsatz auf der Erde waren. 1973 kostete eine Solarzelle für einen Satelliten pro Watt Spitzenleistung (= W_{peak} oder W_p) 1000.– bis 1500.– DM.

Diese neue Anwendung erfordert eine billige, robuste Zelle. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden neue Herstellungsmethoden entwickelt. Dabei entstanden ganz neue Solarzellentypen.

Gleichzeitig wurde die Produktionsmenge Jahr für Jahr gesteigert. Bis 1991 erreichte sie einen Umfang von etwa 60 Millionen Watt Spitzenleistung. Dieses rasante Wachstum und die neuen Entwicklungen führten dazu, daß kleine Mengen Solarzellen im Modul noch etwa 20 DM/ W_p kosten. Entgegen vielen Erwartungen ist dieser Preis in den letzten Jahren erstaunlich stabil geblieben. Experten erwarten, daß dies auch in den nächsten Jahren so bleiben wird. Sogar leichte Preissteigerungen werden aufgrund der starken Nachfrage für möglich gehalten.

1.3 Möglichkeiten der Sonnenenergienutzung

Einen Ausweg aus dem Verbrennen nicht erneuerbarer Energien bietet die direkte Nutzung der Sonnenenergie. Dabei wird die Sonnenenergie nicht über den Umweg der Pflanzen, sondern direkt genutzt. Diese direkte Nutzung wurde in den letzten Jahren vermehrt erforscht. Dabei wurden erstaunliche Fortschritte gemacht. Die direkte Nutzung der Sonnenenergie wird heute bereits in vielen Bereichen angewandt.

Es gibt zahlreiche Auswirkungen der Sonnenstrahlung auf die Erde. Noch zahlreicher sind die Möglichkeiten, diese Auswirkungen für die Energieerzeugung zu nutzen (Abb. 3).

Alle diese Energieformen erneuern sich immer wieder durch die Sonne – und das bleibt noch einige Milliarden Jahre so.

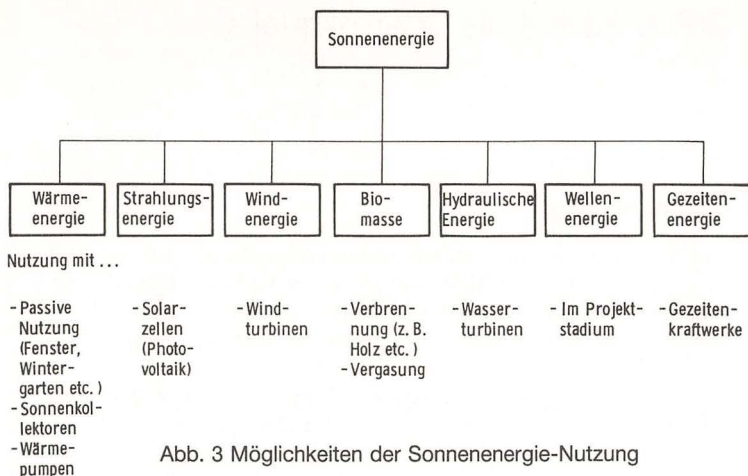


Abb. 3 Möglichkeiten der Sonnenenergie-Nutzung

Die Photovoltaik ist also nur eine unter vielen Nutzungsarten der Sonnenenergie. Ihre Anwendung beschränkt sich sinnvollerweise auf die Erzeugung von elektrischer Energie, zur Beleuchtung, zum Antrieb von Motoren und zur Speisung elektronischer Geräte usw.

Keinesfalls sollten mit Solarzellen Wärme oder andere niederwertige Energieformen erzeugt werden. Dazu eignen sich die Sonnenkollektoren in ihren verschiedenen Bauformen viel besser. Sie erreichen Wirkungsgrade von über 50 % – Werte, die für Solarzellen nicht machbar sind. Dafür hat die von Solarzellen erzeugte elektrische Energie eine viel höhere Qualität als die vom Kollektor erzeugte Wärme.

2 Die Sonne als Energiequelle

2.1 Die Sonne

Die Sonne ist eine Kugel von sehr heißen Gasen. Ihr Durchmesser mißt 1,39 Millionen km, das ist 109mal größer als der Erddurchmesser. Im Durchschnitt ist die Sonne 150 Millionen km von der Erde entfernt. Die Sonnenstrahlen brauchen 8 Minuten, um diese Strecke zurückzulegen.

Im Innern der Sonne verschmelzen ständig vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern. Bei dieser Verschmelzung wird ein Teil der Masse in Energie umgewandelt. Dieser Vorgang wird auch als Fusion bezeichnet. Dieser Prozeß wird durch die bekannte von Einstein aufgestellte Formel $E = mc^2$ beschrieben. Die dabei entstehende Energie führt zu sehr hohen Temperaturen im Inneren der Sonne (bis zu 15 Millionen Grad Celsius). An der Oberfläche beträgt die Temperatur immer noch etwa 6000 Grad Celsius. Der größte Teil der Sonnenstrahlung entsteht in der äußersten Schicht der Sonne.

Von der gesamten Sonnenstrahlung fängt die Erdkugel 0,5 Milliardstel der Sonnenstrahlung auf. Das sind etwa $1,3 \cdot 10^{17}$ W und entspricht etwa dem 20 000fachen des heutigen Weltenergiebedarfs.

2.2 Zusammensetzung der Sonnenstrahlen

Die Strahlung der Sonne setzt sich aus Lichtstrahlen verschiedener Wellenlängen zusammen. So besteht die Sonnenstrahlung für den Menschen aus sichtbaren und unsichtbaren Strahlen. Bei den sichtbaren Strahlen erzeugen die verschiedenen Wellenlängen das bekannte Regenbogenspektrum der Farben. Die Bereiche der unsichtbaren Strahlen werden Infrarot- (IR)- und Ultraviolett- (UV)-Bereich genannt. Auch hier bestimmt die Wellenlänge (oder Frequenz) die Art der

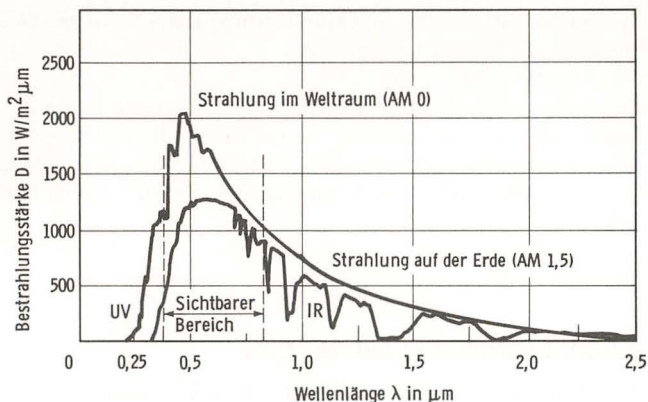


Abb. 4 Spektrum der Sonnenstrahlen

Strahlung. Zeichnet man die Stärke dieser Lichtstrahlen und ihre Wellenlänge auf, so erhält man folgendes Bild für die Sonnenstrahlung (Abb. 4).

Dieses Spektrum der Sonnenstrahlen variiert, je nachdem, ob es im Weltraum (AM 0) oder auf der Erde (AM 1,5) gemessen wird.

Für die Solarzellen ist dieses Spektrum deshalb wichtig, weil die Solarzellen wie auch das menschliche Auge nur ganz bestimmte Bereiche erfassen können. Es kann also immer nur ein Teil des Energiespektrums genutzt werden. Der andere Teil geht verloren und kann nicht in elektrische Energie umgewandelt werden.

Wenn wir nun die Energieteile summieren, ergibt sich in der Tabelle 1 folgendes Resultat:

Tabelle 1

Wellenlänge [μm]	Ultravioletter (UV)-Bereich (0–0,38)	Sichtbarer Bereich (0,38–0,78)	Infraroter (IR)-Bereich (0,78– ∞)
Leistung [W/m^2]	95	640	618
Leistung [%]	7	47,3	45,7

Zusammengezählt ergibt dies eine Leistung von 1353 W/m^2 . Diese Leistung wird Solarkonstante genannt.

Solarkonstante = 1353 W/m^2

Diese Leistung wird durch verschiedene Faktoren (Lufthülle, Luftverschmutzung usw.) verringert, bis sie auf die Erde auftrifft. Auf der Erdoberfläche beträgt die Maximalleistung der Sonneneinstrahlung noch etwa 1000 W/m^2 . Diese Strahlung wird Globalstrahlung G genannt.

2.3 Sonnenstrahlung auf der Erde

Die Sonnenstrahlung auf der Erde wird mit zwei verschiedenen Maßstäben gemessen:

- die Anzahl der Sonnenscheinstunden S (pro Tag, Monat, Jahr)
- die Globalstrahlung G

Eine Sonnenscheinstunde entspricht einer direkten Strahlung von mehr als 200 W/m^2 während einer Stunde. Die Sonnenscheindauer schwankt je nach Ort stark und beträgt für Deutschland etwa 1400 bis 2000 Stunden pro Jahr.

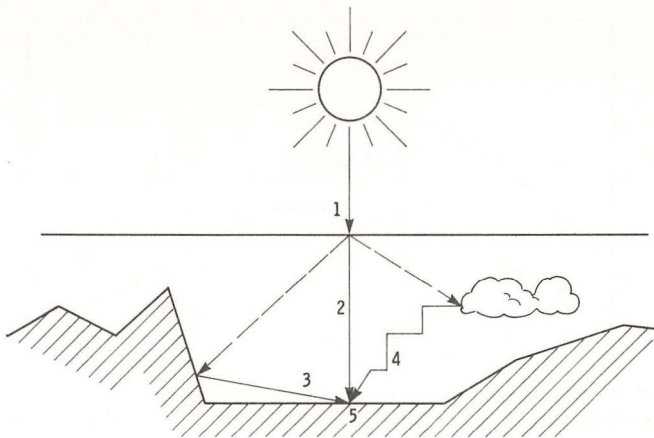
Bis vor kurzem registrierten die meisten Wetterämter nur die Sonnenscheinstunden. Die Sonnenscheinstunden allein ergeben aber keine genauen Berechnungsgrundlagen für die Dimensionierung einer Sonnenenergieanlage. Dieser Fehler ist erkannt worden, und es wird auf der ganzen Welt verstärkt die Sonnenstrahlung gemessen. Außerdem erscheinen laufend neue Tabellenwerke und Meteodaten, die dem Praktiker ein unentbehrliches Hilfsmittel geworden sind.

Viel wichtiger als die Sonnenscheinstunden ist die Globalstrahlung G . Sie setzt sich zusammen aus direkter Strahlung B und diffuser Strahlung D . Die diffuse Strahlung D setzt sich ihrerseits zusammen aus der Reflexstrahlung D_g und der Himmelsstrahlung D_a (Abb. 5).

$$G = B + D$$

$$D = D_g + D_a$$

Diese Unterscheidung ist deshalb wichtig, weil nicht alle Sonnenenergiesysteme gleich auf diese Strahlungsanteile ansprechen. Solarzellen können direkte und diffuse Strahlung nutzen und produzieren auch



- 1 Extraterrestrische Strahlung B_0
 - 2 Direkte Strahlung B
 - 3 Reflexstrahlung D_g
 - 4 Himmelsstrahlung D_a
 - 5 Globalstrahlung G
- } diffuse Strahlung D

Abb. 5 Zusammensetzung der Globalstrahlung

bei bedecktem Himmel elektrische Energie. Ihre Leistung ist proportional zur Stärke der Globalstrahlung.

Systeme, die mit der Konzentrierung von Sonnenstrahlen arbeiten, verwerten dagegen fast nur die direkte Strahlung. In der Photovoltaik sind solche Systeme eher selten.

Die Stärke von diffuser und direkter Strahlung sowie der Globalstrahlung ändern sich im Lauf des Jahres. Für Deutschland ergibt sich folgendes Bild (Abb. 6).

Wie der Tagesverlauf der Globalstrahlung im Frühjahr aussehen kann, zeigt folgendes Diagramm (Abb. 7) für klaren und bedeckten Himmel.

Die durchschnittliche jährliche Intensität der Globalstrahlung, gemittelt über eine Tageslänge von 24 Stunden, beträgt in Deutschland 110–135 W/m². In der Sahara beträgt dieser Wert 240–290 W/m². Das

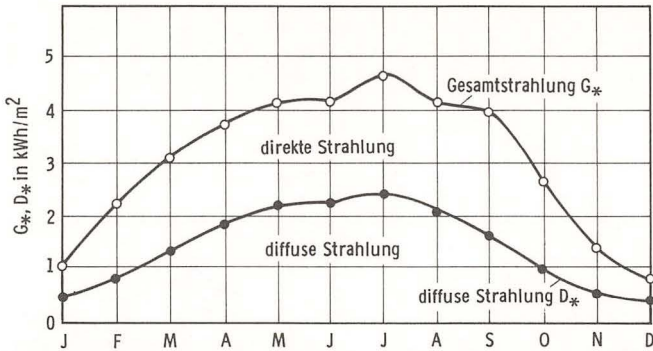


Abb. 6 Jahresverlauf der diffusen und der direkten Strahlung gemittelt über einen Monat für eine geneigte Fläche (60°) in Zürich (siehe 2.4.). Das *-Symbol symbolisiert die Neigung der Fläche.

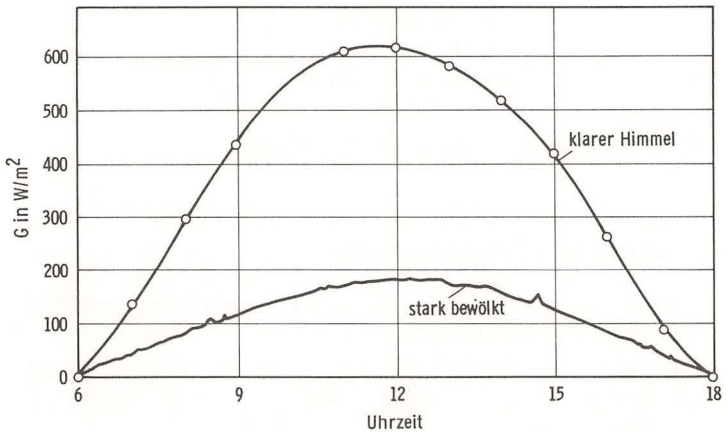


Abb. 7 Tagesverlauf der Globalstrahlung im April (Standort: Schweizer Jura)

bevorzugt die direkte Nutzung der Sonnenenergie in der Sahara. Dafür steht uns in unseren Breitengraden mehr indirekte Sonnenenergie in Form von Wasserkraft und Windenergie zur Verfügung. Dies gleicht das Strahlungsmanko wieder etwas aus (Tabelle 2).

Tabelle 2

Tägliche horizontale Globalstrahlung im Jahresdurchschnitt Wh/m ² für verschiedene Standorte:			
Norderney (BRD):	3000	Wien (A):	3026
Hamburg (BRD):	2680	Salzburg (A):	2925
Berlin:	2805	Innsbruck (A):	3446
Braunschweig (BRD):	2648	Sonnblick (A):	3809
Würzburg (BRD):	3054	Klagenfurt (A):	3434
Trier (BRD):	2917	Zürich (CH):	3164
Weihenstephan (BRD):	3208	Davos (CH):	3748
Hohenpeißenberg (BRD):	3322	Locarno-Monti (CH):	3726

2.4 Sonnenstrahlung auf geneigte Flächen

Die Angaben und Messungen über die Globalstrahlung beziehen sich meistens auf horizontale Flächen. Für geneigte Flächen, wie sie bei der Anwendung von Sonnenzellen meist nötig sind, ergeben sich in unseren Breitengraden höhere Werte. Diese Gesamtstrahlung bezeichnet man in diesem Fall mit G_* . Die optimale Neigung der Solarzelle ergibt sich, wenn das Sonnenlicht senkrecht auf die Fläche fällt.

Ein weiterer Faktor, der beachtet werden muß, ist der Horizont eines Standortes. Hindernisse, die eine Höhe von 10° nicht überschreiten, können vernachlässigt werden. Der Einfluß des Horizonts wird allerdings allgemein überschätzt. Das betrifft alle Systeme, die nicht dem Tagesstand der Sonne nachgestellt werden.

Die einfallende Strahlung ist vom Wetter abhängig. Noch wichtiger ist der astronomische Einfluß, der durch die elliptische Bahn der Erde um die Sonne und die tägliche Erdumdrehung verursacht wird. Dadurch wird die Sonnenhöhe bestimmt, d. h. der Winkel der Sonne zum Horizont.

Will man also jederzeit die optimale Einstrahlung verwerten, muß die Solarzelle um zwei Achsen nachgeführt werden. Meistens wird versucht, die Fläche für eine bestimmte Jahreszeit optimal auszurichten. In diesem Fall wird der Tagesgang der Sonne vernachlässigt.

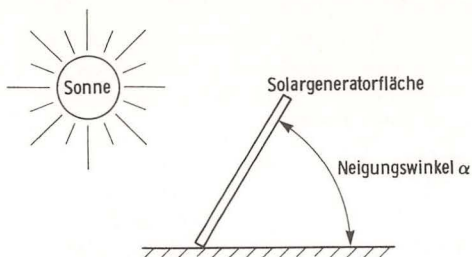


Abb. 8 Der Neigungswinkel α ist abhängig vom Breitengrad

In der nördlichen Hemisphäre ergibt das eine südwärts geneigte Fläche. Der Neigungswinkel α ist abhängig vom Breitengrad der Anlage und von der Jahreszeit (Abb. 8).

Die Sonne scheint zum Frühlings- und Herbstanfang genau senkrecht auf den Äquator. Die größte Abweichung von dieser Position hat sie am Sommer- und Winteranfang. Sie beträgt $+23,45^\circ$ (Sommeranfang) bzw. $-23,45^\circ$ (Winteranfang). Diese Abweichung sollte die Solarzelle nachvollziehen, wenn der optimale saisonale Energieertrag erreicht werden soll. Meist begnügt man sich mit Zwischenwerten (die folgenden Werte der Tabelle 3 gelten in Mitteleuropa):

Tabelle 3

Jahreszeit	Günstigster Neigungswinkel bei südlicher Ausrichtung der Solarzelle
Sommer	$20^\circ\text{--}50^\circ$
Frühjahr und Herbst	$40^\circ\text{--}60^\circ$
Winter	$60^\circ\text{--}90^\circ$
bei festem Neigungswinkel je nach Speicher- und Verbrauchermodus	$40^\circ\text{--}70^\circ$

Für die geneigte Fläche können nun die Globalstrahlungswerte G nicht mehr direkt zur Dimensionierung beigezogen werden.

Die Umrechnung der Globalstrahlungswerte G zu den Gesamtstrahlungswerten G_* ist eine heikle Sache, die auch Fachleuten Mühe bereitet. Trotzdem können sogenannte „typische Werte“ in der *Tabelle 4* angegeben werden.

Tabelle 4

Korrekturfaktoren für die Umrechnung $\frac{G_*}{G}$ (typische Werte):			
Neigung der Fläche	März/Sept.	Juni/Juli	Dez./Jan.
30°	1,3	1,0	1,7
50°	1,4	0,9	2,3
70°	1,3	0,65	2,4
90°	1,0	0,4	2,3

3 Die Solarzelle

Es gibt mehrere unterschiedliche Möglichkeiten, wie Solarzellen aufgebaut werden können. Von Bedeutung sind jedoch im Moment nur Solarzellen, die aus Halbleiter- oder Halbleiter-Metall-Verbindungen bestehen. Im praktischen Einsatz sind fast ausschließlich Silizium-Solarzellen. Die genaue Erklärung der Funktionsweise würde den Rahmen dieses Taschenbuches sprengen. Hier verweisen wir auf das Literaturverzeichnis.

3.1 Kennlinie der Solarzelle

Die Solarzelle ist im unbeleuchteten Zustand wie eine großflächige Halbleiterdiode. Das geht aus der Kennlinie hervor. Im beleuchteten Zustand liefert die Solarzelle einen konstanten Strom, der in umgekehrter Richtung zum Diodenstrom fließt. Die Kennlinie verschiebt sich nach unten (Abb. 9).

Üblicherweise betrachten wir die Solarzellen-Kennlinie unabhängig vom Diodenverhalten. Es wird deshalb nur der 4. Quadrant der Kennlinie gezeichnet. Durch die Solarzellenkennlinie sind drei wichtige Punkte bestimmt:

- die Leerlaufspannung U_0 wird bei fehlender Belastung gemessen und ist von der Bestrahlung weitgehend unabhängig;
- der Kurzschlußstrom I_K wird gemessen, indem die Zelle kurzgeschlossen wird. Der Kurzschlußstrom ist proportional zur Stärke der Bestrahlung (Abb. 10);
- den Punkt maximaler Leistung (Maximum Power Point, MPP) der Solarzelle finden wir, wenn wir das Produkt aus Strom und Spannung für jeden Kurvenpunkt bilden. Im Falle des Leerlaufs (U_0 maximal) und im Falle des Kurzschlusses (I_K maximal) produziert die Solarzelle

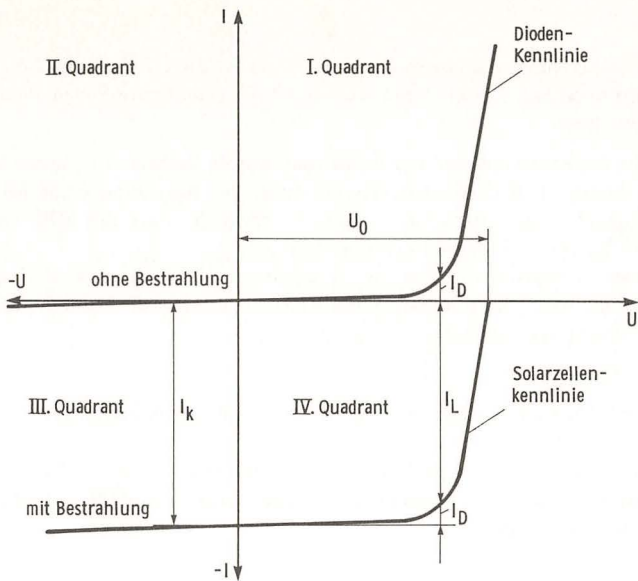


Abb. 9 Kennlinie einer Solarzelle und einer Diode im Vergleich

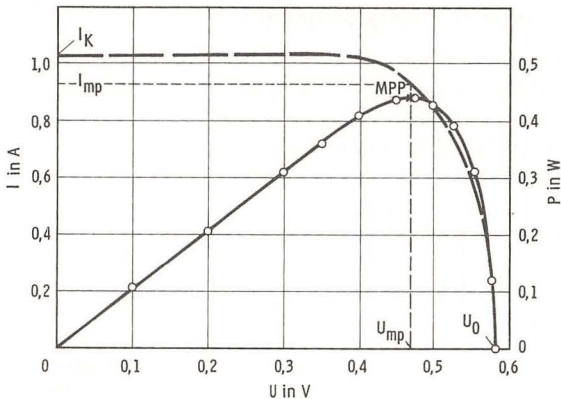


Abb. 10 Kennlinie einer monokristallinen Solarzelle mit einer Fläche von ca. 40 cm² und einer Einstrahlung von 1000 W/m² und einer Zelltemperatur von 25 °C.

keine Leistung. An einem einzigen Punkt ist die Leistung der Solarzelle maximal. Dieser Punkt wird mit MPP (Maximum Power Point) bezeichnet.

In der Praxis müssen wir versuchen, unsere Verbraucher immer so zu bauen, daß deren Betriebsspannung der Spannung beim MPP entspricht. Dies hat seine Tücken, ist doch die Lage des MPP von verschiedenen äußeren Faktoren abhängig.

Der Energietransfer von der Solarzelle zum Verbraucher ist dann optimal, wenn der Widerstand des Verbrauchers (R_L) dem Innenwiderstand (R_i) der Solarzelle entspricht.

$$R_L = R_i$$

Dieser Zustand wird in der Elektrotechnik mit *Lastanpassung* bezeichnet (s. 6.1).

Mit Hilfe von speziellen Gleichspannungswandlern, „Maximum Power Tracker (MPT)“ genannt, ist es möglich, eine künstliche Lastanpassung zu erreichen.

3.2 Messen der Solarkennlinie

Zum Messen der Kennlinie einer Solarzelle genügt eine einfache Meßschaltung wie in Abb. 11. Das Symbol für die Solarzelle zeigt, daß es sich um eine lichtabhängige Diode handelt. Der Strom fließt bei der beleuchteten Solarzelle in der Sperrrichtung der Diode.

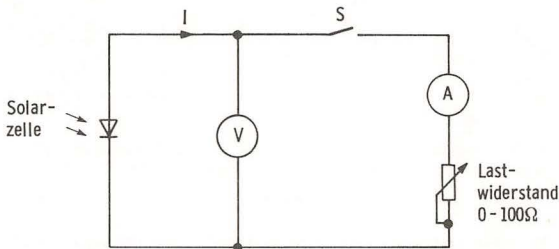


Abb. 11 Schaltung zum Messen der Solarzellenkennlinie

Bei kurzgeschlossenem Schalter S und variablem Widerstand R kann man den Kurzschlußstrom und die einzelnen Punkte der Solarzellenkennlinie messen. Daraus läßt sich die Position des MPP ermitteln. Ist der Schalter S geöffnet, zeigt uns das Voltmeter die Leerlaufspannung an.

Es ist darauf zu achten, daß das Voltmeter hochohmig und das Ampèremeter sehr niederohmig ist. Sonst wird die Messung zu sehr verfälscht.

Schwieriger ist es, die Strahlung zu messen: Geräte, die das ganze Spektrum der Sonnenstrahlung messen können, sind sehr teuer und müssen mit Sachkenntnis eingesetzt werden. Für unsere Zwecke genügt eine geeichte Solarzelle, deren Leerlaufspannung einer bestimmten Einstrahlung entspricht. Die gemessene Spannung kann dann mit einem Taschenrechner in einen Absolutwert (W/m^2) oder in einen Relativwert (%) umgerechnet werden. Solche Zellen sind in Elektronikgeschäften erhältlich.

3.3 Einfluß der Bestrahlung auf die Leistung der Solarzelle

Wie wir schon gesehen haben, verändert sich bei einer normalen Solarzelle die Leerlaufspannung nur wenig mit der Bestrahlung, der Kurzschlußstrom aber massiv. Damit verändert sich auch die Leistung in Abhängigkeit von der Bestrahlung. Diese Abhängigkeit ist nahezu linear (Abb. 12).

Man sieht auch, daß die Betriebsspannung U_{mp} , bei der die Zelle im Optimum (MPP) arbeitet, leicht variiert.

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle bei konstanter Temperatur nimmt logarithmisch mit der Bestrahlungsstärke zu. Normalerweise steigt aber auch die Zellentemperatur und der Wirkungsgrad sinkt insgesamt. Für gekühlte Zellen mit konzentrierter Strahlung ergibt sich daher eine interessante Perspektive (s. 6.2).

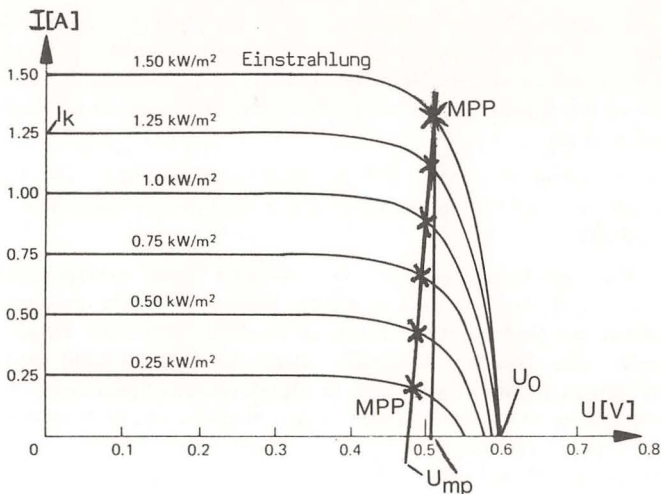


Abb. 12 Einfluß der Bestrahlung auf die Leistung

3.4 Einfluß der Temperatur auf die Leistung der Solarzelle

Bei konstanter Einstrahlung nimmt die Leistung einer Solarzelle mit zunehmender Temperatur ab. Dabei verhalten sich Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom gegenläufig:

- Die Leerlaufspannung nimmt mit zunehmender Temperatur um typisch 3 mV/K ab. Eine Solarzelle mit einer Leerlaufspannung von 0,6 V bei 25 °C erreicht bei 75 °C noch eine Leerlaufspannung von 0,45 V. Das ist eine beträchtliche Reduktion, die in der Praxis durchaus auftreten kann. Dies entspricht einer Abnahme von 25 %.
- Der Kurzschlußstrom nimmt mit zunehmender Temperatur um ca. 0,1 %/K zu. Eine Solarzelle mit einem Kurzschlußstrom von 2,0 A bei 25 °C erreicht bei 75 °C einen Kurzschlußstrom von 2,1 A. Dies entspricht einer Zunahme von 5 % (Abb. 13).

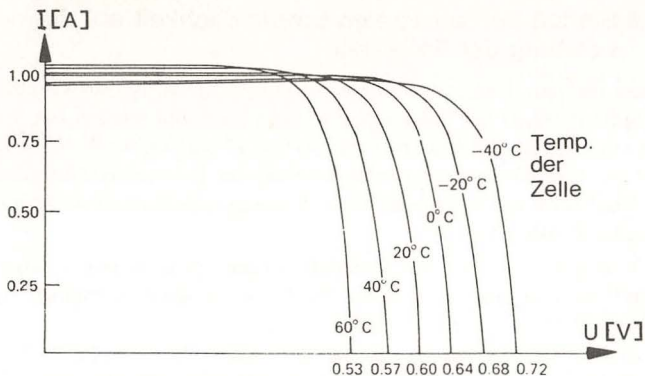


Abb. 13 Einfluß der Temperatur auf die Leistung

Die Abnahme der Spannung ist also weit größer als die Zunahme des Stromes. Das wirkt sich auf die Leistung aus, die typischerweise pro K um 0,44 % abnimmt. Man muß also darauf achten, daß die Solarzellen im Betrieb möglichst kühl bleiben. Das ist ein schwieriges Unterfangen, weil die Zelle sich selbst erwärmt, wenn sie von der Sonne beschienen wird.

3.5 Einfluß der Solarzellenfläche auf die Leistung der Solarzelle

Die Größe der Solarzellenfläche bestimmt wesentlich die Leistung der Solarzelle. Die Beziehung ist linear: Eine Solarzelle von 100 cm^2 hat einen doppelt so hohen Kurzschlußstrom (z. B. 2 A) wie eine Solarzelle von 50 cm^2 Fläche (also 1 A). Die Leerlaufspannung wird von der Solarzellenfläche nicht beeinflusst. Deshalb bestimmt die Größe der Solarzellenfläche auch die maximale Leistung der Solarzelle. Die größten Solarzellen haben eine Fläche von 100 cm^2 und erreichen damit einen Kurzschlußstrom von über 3 A bei einer Zellentemperatur von 25°C . Das ergibt eine Spitzenleistung von über 1,5 Wp.

3.6 Einfluß der spektralen Empfindlichkeit auf die Leistung der Solarzelle

Eine für den Fachmann weitere wichtige Größe ist die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle. Sie kann bestimmt werden aus dem gemessenen Wert des Kurzschlußstromes in Funktion zur Wellenlänge (λ) der Strahlung bei konstanter Einstrahlung. Die spektrale Empfindlichkeit wird mit $S(\lambda)$ bezeichnet. Für eine Si-Solarzelle ergibt sich folgendes Bild (Abb. 14).

Solarzellen aus anderen Materialien haben ganz andere spektrale Empfindlichkeiten. Dadurch ergeben sich interessante Kombinationsmöglichkeiten (s. 4.5).

In der Praxis hat dies zur Konsequenz, daß Solarzellen in Taschenrechnern, die häufig unter Kunstlicht betrieben werden, eine ganz

Relative spektrale Empfindlichkeit $S_{rel} = f(\lambda)$:

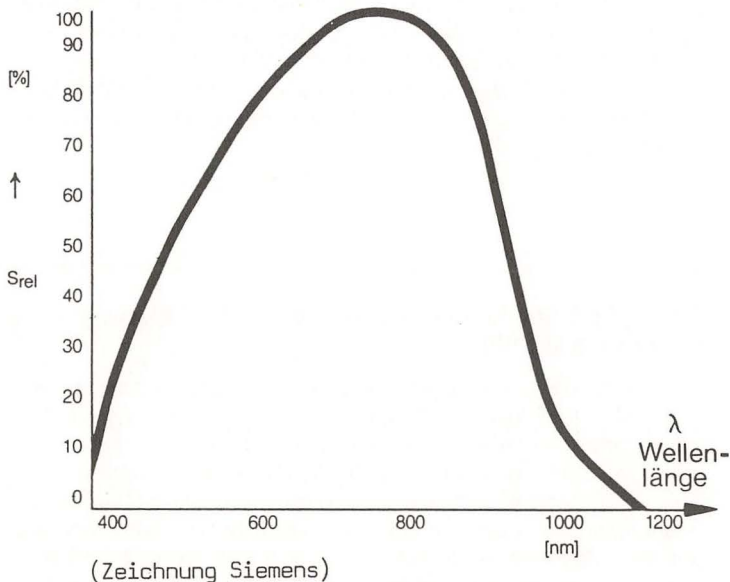


Abb. 14 Einfluß der spektralen Empfindlichkeit auf die Leistung

andere spektrale Empfindlichkeit brauchen als Solarzellen, die von der Sonne bestrahlt werden. Die Angabe der elektrischen Daten einer Solarzelle ist nur dann sinnvoll, wenn auch die Lichtquelle angegeben und die spektrale Verteilung definiert wird. Eine genaue Messung der spektralen Verteilung erfordert aufwendige Meßeinrichtungen, die dem Anwender normalerweise nicht zur Verfügung stehen.

3.7 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.

Etwas gravierender ist das Problem der Alterung bei amorphen Solarzellen gewesen. Doch scheint man jetzt in einigen Firmen die Alterung nach kurzer Betriebszeit stoppen zu können.

3.8 Das Ersatzschaltbild der Solarzelle

Will man ein Element genau untersuchen, ist es zweckmäßig, dessen Ersatzschaltbild zu zeichnen. So kann die Funktion genau studiert werden:

Die Solarzelle können wir uns zusammengesetzt vorstellen aus einer Konstantstromquelle und einer Diode. An die Klemmen wird ein Lastwiderstand angeschlossen (Abb. 15).

Der Strom, der durch die Last fließt, ist also $I_L = I_K - I_D$

In der Praxis genügt dieses einfache Ersatzschaltbild nicht. Zwei weitere wichtige Größen sind:

- R_p : Parallel zur Konstantstromquelle wirkt ein innerer Verlustwiderstand R_p . Dieser Widerstand sollte möglichst groß sein, um den Leistungsverlust in Grenzen zu halten. R_p wird durch Kristallfehler, Dotierungsunzulänglichkeiten und andere Defekte beeinflusst (Abb. 16).

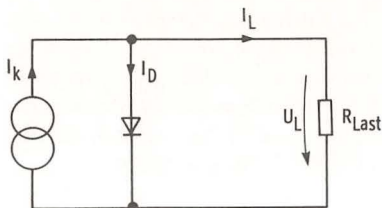


Abb. 15 Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Solarzelle

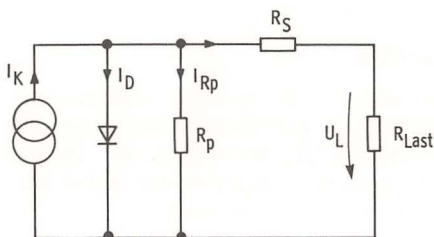


Abb. 16 Erweitertes Ersatzschaltbild einer Solarzelle

● R_S : Der Serienwiderstand R_S setzt sich aus verschiedenen Einzelwiderständen zusammen (Widerstand des Halbleitermaterials, der Metall-Halbleiter-Kontakte und der elektrischen Zuleitungen). Messungen ergaben für kommerzielle monokristalline Solarzellen mit Flächen von 20 bis 80 cm² Serienwiderstandswerte R_S zwischen 80 mΩ und 400 mΩ und Parallelwiderstände R_p von 400 Ω bis 600 Ω je nach Zellentyp.

3.9 Der Füllfaktor der Solarzelle

Der Einfluß der Serie- und Parallelwiderstände auf die Kennlinie und die Leistung der Solarzelle wird mit dem Füllfaktor FF beschrieben: Der FF einer Solarzelle ist das Produkt aus Strom I_{mp} und Spannung U_{mp} im Punkt maximaler Leistung MPP dividiert durch das Produkt aus Kurzschlußstrom I_K und Leerlaufspannung U_0 .

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot U_{mp}}{I_K \cdot U_0}$$

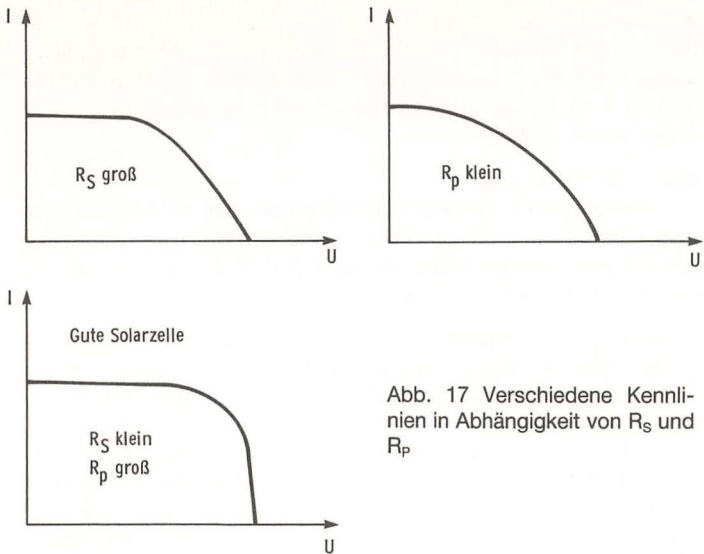


Abb. 17 Verschiedene Kennlinien in Abhängigkeit von R_S und R_P

Der größte Füllfaktor wird bei kleinem Serienwiderstand R_S und großem Parallelwiderstand R_P erreicht (Abb. 17).

3.10 Der Wirkungsgrad einer Solarzelle

Die Leistung einer Solarzelle und damit ihr Wirkungsgrad wird durch verschiedene Faktoren eingeschränkt:

- Reflexionsverluste:

Ein Teil der auftreffenden Strahlung wird durch die Zellenoberfläche reflektiert und geht verloren. Normales unbehandeltes Silizium reflektiert 36 % oder mehr der Sonnenstrahlung. Durch das Behandeln der Zellenoberfläche (Texturierung) und das Aufbringen spezieller Antireflexionsschichten können die Reflexionsverluste auf ca. 4 % eingeschränkt werden.

- Nicht absorbierte Strahlung:

Ein Teil der Strahlung ist zu wenig energiereich und vermag keine Valenzelektronen ins Leitungsband (LB) zu heben (Leistungseinbuße ca. 24 %). Die Energie erhitzt zusätzlich die Solarzelle und verursacht damit weitere Verluste.

- Zu starke Strahlung:

Die Strahlung hat mehr Energie als nötig wäre, um ein Valenzelektron ins Leitungsband (LB) zu heben (Leistungseinbuße ca. 30 %). Die überschüssige Energie geht verloren, erhitzt zusätzlich die Solarzelle und verursacht damit weitere Verluste.

Die beiden letztgenannten Verlustfaktoren sind die größten Verlustquellen. Bestünde das Sonnenlicht aus monochromatischer Strahlung (eine einzige Wellenlänge/Farbe), könnten diese beiden Verlustfaktoren eliminiert werden.

Es gibt Vorschläge, die einzelnen Wellenlängen der Sonnenstrahlung aufzuteilen und mittels Solarzellen zu nutzen, die verschiedene spektrale Empfindlichkeiten aufweisen. Ein solcher Vorschlag ist in 4.5 beschrieben. In die Praxis vorgedrungen sind solche Vorschläge bis jetzt noch nicht.

Der Wirkungsgrad der Silizium-Solarzelle wird aber noch durch weitere Faktoren vermindert:

- Sammelwirkungsgrad:

Nicht alle erzeugten Ladungsträger erreichen die p/n-Schicht. Viele Elektronen rekombinieren vorher mit einem Loch und gehen für die Stromerzeugung verloren. Das Verhältnis der Ladungsträger, die die p/n-Schicht erreichen, zu den gesamthaft erzeugten Ladungsträgern, wird Sammelwirkungsgrad genannt. Er kann durch technologische Maßnahmen bei der Herstellung beeinflusst werden.

- Serie- und Parallelverluste:

Seriewiderstände R_s und Parallelwiderstände R_p beschränken den Wirkungsgrad weiter. Auch diese Widerstände können durch technologische Maßnahmen bei der Herstellung verändert werden.

- Selbstbeschattung:

Diese Verluste werden vom Leiternetz auf der Oberfläche der Solarzelle verursacht. Das Leiternetz „sammelt“ die Ladungsträger und leitet sie zu den Anschlußpunkten. Dabei wird die Zelloberfläche

von der Sonnenstrahlung abgedeckt. Diese Fläche nimmt nicht an der Energieproduktion teil. Das Leiternetz sollte einerseits jeden Punkt an der Oberfläche erreichen und andererseits möglichst dünn sein. Der Kompromiß führt zu einer fingerförmigen Leiterstruktur auf der Zelloberfläche.

● Temperaturverluste:

Ein weiterer Verlustfaktor ist die Temperatur. Mit steigender Temperatur werden die Valenzelektronen immer mehr bewegt. Bei Temperaturen von ca. 300 °C verliert die Sperrschicht ihre Funktion. Solarzellen aus anderen Materialien als Silizium verhalten sich zum Teil temperaturbeständiger.

All diese Faktoren führen dazu, daß der Wirkungsgrad einer Siliziumsolarzelle in der Theorie auf maximal etwa 30 % bei 25 °C beschränkt bleibt. Der höchste Wirkungsgrad, der bis jetzt im Labor erreicht wurde, betrug 22,8 % (1989). Die monokristallinen Silizium-solarzellen mit dem höchsten Wirkungsgrad bietet im Moment (1991) die spanische Firma BP an. Diese Zellen erreichen etwa 17 %, die damit gefertigten Module erreichen gegen 16 %. In ferner Zukunft (2010–2030) werden Modulwirkungsgrade von über 18 % erwartet. Die Entwicklung ist also bereits ziemlich ausgereizt.