8 Fotovoltaik

Der *fotovoltaische Effekt* wurde 1839 von *Becquerel* beobachtet, der Silberelektroden in einem Elektrolyten bestrahlte und feststellte, dass dadurch ein Strom induziert wurde. 1954 gelang *Chapin, Fuller* und *Pearson* bei den Bell Laboratorien der Bau der ersten Solarzelle auf der Basis von einkristallinem Silicium mit einem Wirkungsgrad von 6%. Durch intensive Forschung und Entwicklung konnte der Wirkungsgrad innerhalb von 40 Jahren etwa vervierfacht werden.

8.1 Wirkungsweise der Solarzelle

Die Solarzelle ist grundsätzlich eine Fotodiode mit großer Fläche (Abb. 8.1, Abschn. 1.6.3.1). Durch absorbierte Photonen gebildete Elektron-Loch-Paare werden infolge des eingebauten elektrischen Feldes getrennt. Dabei werden die Elektronen zum n-Kontakt, die Löcher zum p-Kontakt befördert (Abb. 1.69). Die Deckfläche der Solarzelle ist mit einem Gitter dünner Kontaktfinger versehen, die den erzeugten Fotostrom ableiten. Wegen des hohen Reflexionsgrades der Halbleiter muss die Oberfläche der Zelle stets mit einer reflexvermindernden Schicht versehen werden. Da der Absorptionskoeffizient beim indirekten Halbleiter Silicium nur langsam mit der Photonenenergie ansteigt (Abb. 1.68), benötigen Si-Solarzellen eine Dicke von 200 μm bis 300 μm. Solarzellen aus direkten Halbleitern wie beispielsweise GaAs kommen dagegen mit Dicken von 1 μm bis 2 μm aus.

Im Kurzschlussbetrieb fließt durch die Solarzelle ein Fotostrom I_K, der proportional ist zur eingestrahlten Leistung Φ_e:

$$I_K \sim \Phi_e = E_e A \tag{8.1}$$

Bei gegebener Bestrahlungsstärke E_e steigt der Strom und damit die produzierte elektrische Leistung proportional zur Fläche A.

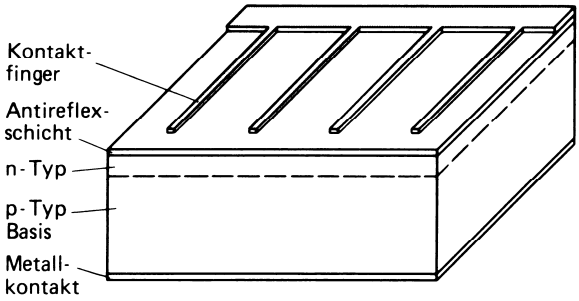


Abb. 8.1. Schematischer Aufbau einer Solarzelle

Im Leerlaufbetrieb ist an den Kontakten der idealen Solarzelle die Leerlaufspannung

$$U_{\mathrm{L}} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{\mathrm{K}}}{I_{\mathrm{S}}} + 1\right) \approx \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{\mathrm{K}}}{I_{\mathrm{S}}}\right) \tag{8.2}$$

abgreifbar. k: Boltzmann-Konstante, T: absolute Temperatur, e: Elementarladung, I_{S}: Sperr-Sättigungsstrom (Dunkelstrom).

Zeichnet man – anders als in Abb. 1.71 – die Kennlinie der Solarzelle im ersten Quadranten, so gilt für die Strom-Spannungs-Kennlinie einer idealen Solarzelle (Abb. 8.2)

$$I = I_{\mathrm{K}} - I_{\mathrm{S}}\left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1\right]. \tag{8.3}$$

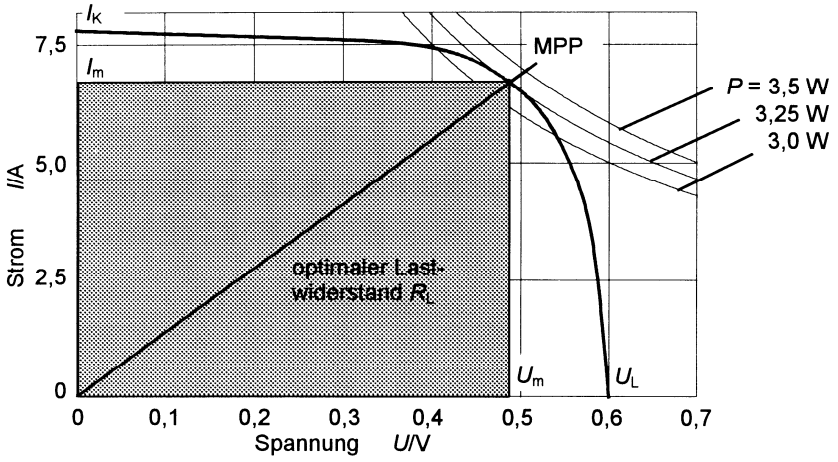


Abb. 8.2. Strom-Spannungs-Kennlinie einer Si-Solarzelle bei Standard-Testbedingungen (STC). Zellengröße 15 cm x 15 cm.

Ist der Lastwiderstand im Außenkreis R_L, dann definiert der Schnittpunkt der Widerstandsgeraden $I = U/R_L$ mit der Kennlinie den Arbeitspunkt. Der *optimale Lastwiderstand* liegt vor, wenn die Fläche des grauen Rechtecks maximal ist, nämlich

$$P_m = I_m U_m . \tag{8.4}$$

Der zugehörige Arbeitspunkt ist in Abb. 8.2 mit MPP (**M**aximum **P**ower **P**oint) gekennzeichnet. Da sich die Kennlinie mit der Sonneneinstrahlung verändert, muss für effektiven Betrieb der Lastwiderstand durch eine elektronische Schaltung so angepasst werden, dass stets im Punkt maximaler Leistung gearbeitet wird. Ein erster Schätzwert für den *optimalen Lastwiderstand* ist

$$R_{L,opt} \approx \frac{U_L}{I_K} . \tag{8.5}$$

Das Verhältnis der grau schraffierten Rechteckfläche in Abb. 8.2 zur größten denkbaren Rechteckfläche, gebildet durch den Kurzschlussstrom I_K und die Leerlaufspannung U_L, wird als *Füllfaktor* bezeichnet:

$$F_F = \frac{I_m U_m}{I_K U_L} = \frac{P_m}{I_K U_L} . \tag{8.6}$$

Der Füllfaktor ist ein Maß für die Güte der Zelle. Er beträgt 70% bis 85%.

Beispiel:
Wie groß ist der Füllfaktor der Zelle von Abb. 8.2?

Lösung:
Aus dem Diagramm wird entnommen: $U_L = 0{,}6$ V, $U_m = 0{,}49$ V, $I_K = 7{,}6$ A, $I_m = 6{,}7$ A. Damit wird $F_F = 72\%$.

□

Die Kennlinie einer realen Solarzelle weicht etwas von der idealen nach Gl. (8.3) ab. Abbildung 8.3 zeigt ein Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle. Der Parallelwiderstand R_p berücksichtigt Leckströme über die Oberfläche sowie Punktdefekte im pn-Übergang. Der Serienwiderstand R_s entsteht durch den Ohm'schen Widerstand des Halbleitermaterials, den Widerstand der Kontaktfinger sowie den Übergangswiderstand an der Halbleiter-Metall-Grenzfläche. Die Strom-Spannungs-Kennlinie wird jetzt

$$I = I_K - I_S \left[\exp\left(\frac{eU + I R_s}{kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + I R_s}{R_p} . \tag{8.7}$$

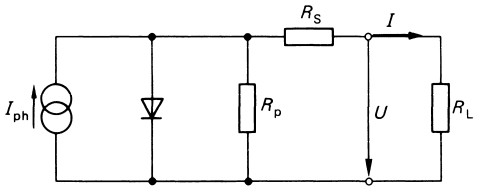


Abb. 8.3. Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle

Beide Widerstände verschlechtern den Füllfaktor (Abb. 8.4). Bei besonders niedrigen Parallelwiderständen reduziert sich die Leerlaufspannung und bei besonders hohen Serienwiderständen verringert sich der Kurzschlussstrom.

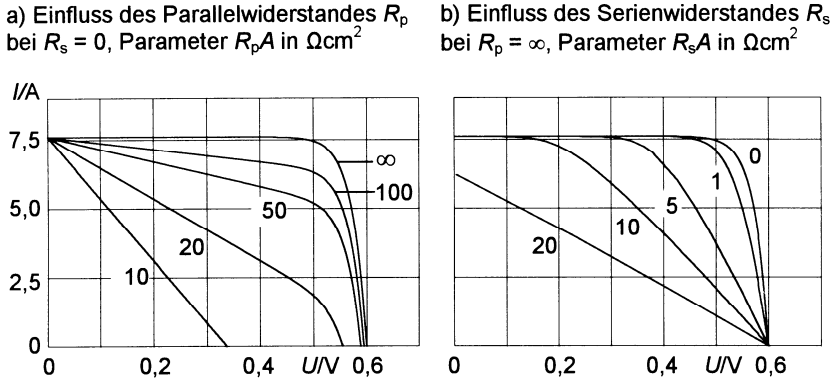


Abb. 8.4. Kennlinien realer Solarzellen

Die Eigenschaften der Solarzelle sind temperaturabhängig. Mit steigender Temperatur nimmt die Leerlaufspannung ab, während der Kurzschlussstrom leicht ansteigt. Tabelle 8.1 zeigt eine Zusammenstellung der Temperaturkoeffizienten.

Tabelle 8.1. Temperaturkoeffizienten der Betriebsparameter von Silicium-Solarzellen

Größe	Temperaturkoeffizient
Leerlaufspannung U_L	–0,5%/K
Kurzschlussstrom I_K	+0,1%/K
elektrische Leistung P_m	–0,44%/K

8.2 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ist definiert als Verhältnis der maximal entnehmbaren elektrischen Leistung P_m zur eingestrahlten optischen Leistung Φ_e:

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi_e} = \frac{I_K U_L F_F}{E_e A} . \tag{8.8}$$

Trotz großer Anstrengungen ist der Wirkungsgrad handelsüblicher Solarzellen nicht höher als etwa 15%. Die wichtigsten Verlustmechanismen sind in Tabelle 8.2 zusammengestellt.

Tabelle 8.2. Verluste in Si-Solarzellen

optische Verluste	elektrische Verluste
Reflexion an der Oberfläche • 3%	Interne Zellenverluste infolge des Serienwiderstandes des Zellenmaterials und der Kontaktfinger
Abschattung durch Kontaktfinger • 3%	• 1%
Photonen mit überschüssiger Energie • 32%	Rekombination von Ladungsträgern in Basis und Emitter
Photonen mit ungenügender Energie • 24%	• 22%

Entscheidend für die optischen Verluste ist die in Abb. 8.5 dargestellte *spektrale Bestrahlungsstärke* $E_{e,\lambda}$ des Sonnenlichts. Außerhalb der Lufthülle (AM0, **A**ir **M**ass Zero) entspricht die Verteilung etwa der eines schwarzen Strahlers mit $T = 5.960$ K (Abschn. 1.4.2). Die integrale Bestrahlungsstärke

$$E_e = \int_0^\infty E_{e,\lambda}\, d\lambda = 1353 \frac{W}{m^2}$$

wird als *Solarkonstante* bezeichnet. Je nach Einstrahlwinkel und Weglänge der Strahlen durch die Atmosphäre wird die Bestrahlungsstärke infolge von Absorption an Luftmolekülen verringert. Wird die Lufthülle senkrecht durchstrahlt, spricht man von *AM1-Verhältnissen* (**A**ir **M**ass One). Bei AM2 legen die Strahlen den doppelten Weg zurück usw. Als Standard zur Messung des Wirkungsgrades wurde das AM1,5-Spektrum mit $E_e = 1000$ W/m^2 festgelegt (STC, **S**tandard **T**est **C**onditions).

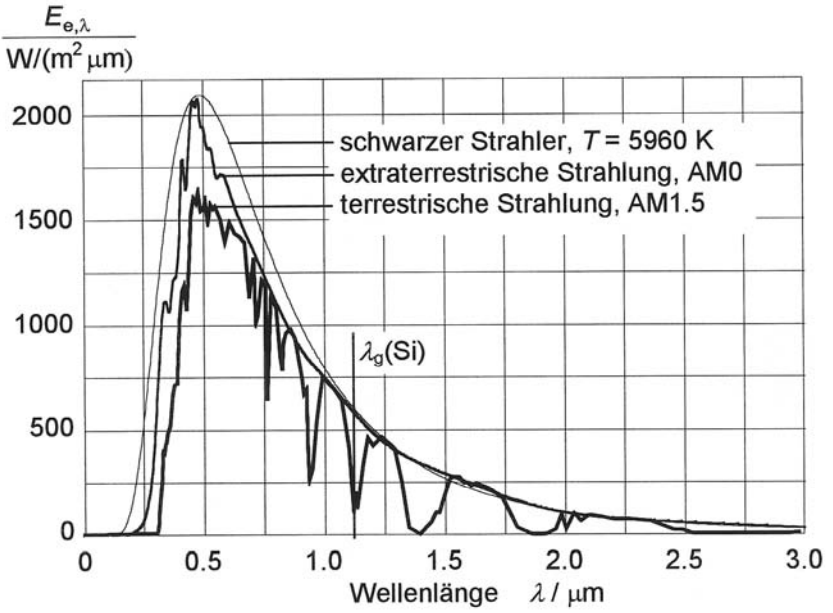


Abb. 8.5. Spektrale Bestrahlungsstärke des Sonnenlichts außerhalb der Atmosphäre (AM0) und auf der Erdoberfläche (AM1,5). λ_g ist die Grenzwellenlänge für Absorption in Silicium

Der ganze Teil des Spektrums, der rechts von der Grenzwellenlänge λ_g liegt, wird nicht absorbiert, weil die Photonenenergie nicht ausreicht, um ein Elektron-Loch-Paar zu bilden. Strahlung mit $\lambda < \lambda_g$ wird zwar absorbiert, aber die überschüssige Energie $E_{ph} - E_g$ wird in der Solarzelle in Wärme verwandelt. Wenn also beispielsweise ein Photon mit der Energie $E_{ph} = 2$ eV ($\lambda = 620$ nm) in Si absorbiert wird, dann wird die Energie $E_g = 1{,}11$ eV elektrisch nutzbar, während 0,89 eV in Wärme umgesetzt wird. Stünde ein Halbleiter mit $E_g = 2$ eV zur Verfügung, dann könnte die Energie dieses Photons zu 100% elektrisch genutzt werden. Für maximale Ausnutzung des Sonnenspektrums sollte also für jede Photonenenergie der Halbleiter mit passender Energielücke zur Verfügung stehen. Dieser Idealfall kann angenähert werden durch *Tandemzellen*, wobei Halbleiter mit verschiedenen Energielücken hinter einander angeordnet werden. Theoretisch könnten solche Strukturen Wirkungsgrade von über 50% besitzen. Praktisch wurden beispielsweise bei der Kombination GaAs/Si 31% gemessen.

Die größten elektrischen Verluste entstehen durch Rekombination der Ladungsträger an der Grenzfläche zwischen der p-dotierten Basis und der metallisierten Rückseite (Abb. 8.1). Die *Rekombination* wird stark reduziert, wenn der Halbleiter passiviert wird durch eine dünne Schicht aus SiO_2

oder SiN. Da diese Schicht elektrisch isoliert, müssen viele punktförmige Kontakte durch die Schicht hergestellt werden. Ein kleines Gebiet mit hoher p-Dotierung erzeugt ein elektrisches Feld, das die Elektronen von den Kontakten fern hält (*local back surface field*). In der Forschung sucht man nach preisgünstigen Verfahren, um diese Tausende von Punktkontakten an der Zellenrückseite herzustellen. Wenn dieses Problem gelöst ist, sollten Si-Solarzellen in der Massenproduktion mit Wirkungsgraden von etwa 20% möglich sein.

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle steigt mit der eingestrahlten Leistung. Wird der Wirkungsgrad bei $E_{e,0}$ =1.000 W/m^2 (STC) mit η_0 bezeichnet, so folgt mithilfe der Gln. (8.2) und (8.8) der Wirkungsgrad bei der Bestrahlungsstärke E_e zu

$$\eta = \eta_0 \frac{\ln(E_e / E_{e,0}) + eU_{L,0}/(kT)}{eU_{L,0}/(kT)}. \tag{8.9}$$

Es kann also interessant sein, das Sonnenlicht beispielsweise mittels mikrooptischer Bauelemente zu konzentrieren, um einen höheren Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringerem Materialverbrauch zu erhalten.

Beispiel:
Um welchen Bruchteil steigt der Wirkungsgrad einer Si-Solarzelle, wenn die Bestrahlungsstärke auf das Hundertfache gegenüber STC erhöht wird?

Lösung:
Für Si ist $U_{L,0}$ • 0, 6 V (Abb. 8.2), so dass für 300 K aus Gl. (8.9) folgt

$\eta = \eta_0 \frac{\ln(100) + 23{,}2}{23{,}2} = \eta_0 \cdot 1{,}198$. Der Wirkungsgrad steigt also um 20%.

□

Für den praktischen Gebrauch werden einzelne Zellen zu Modulen von 0,5 m^2 bis 1 m^2 Fläche zusammen geschaltet. Der Wirkungsgrad eines Moduls ist typischerweise um 1 bis 2 Prozentpunkte niedriger als der Wirkungsgrad einer durchschnittlichen Zelle.

8.3 Technologie

Das nach wie vor wichtigste Material zum Bau von Solarzellen ist Silicium. Wegen der hohen Materialkosten wird intensiv nach Alternativen gesucht (Tabelle 8.3). Sowohl beim einkristallinen als auch beim polykristallinen Si werden durch Sägen aus Blöcken (ingots) die Wafer mit ungefähr

300 μm Dicke heraus gesägt. Dabei entsteht ein Abfall von etwa der Hälfte des Ausgangsmaterials. Ungefähr 50% der Kosten für ein Solarmodul entfallen auf die Herstellung der Wafer. Günstiger ist es, polykristallines Silicium in Form von Bändern direkt aus der Schmelze zu ziehen, obwohl der Wirkungsgrad dieses Folien-Siliciums wegen vermehrter Kristalldefekte etwas niedriger liegt. Dünnschichtzellen aus amorphem Silicium (direkter Halbleiter) benötigen wenig Material. Der Wirkungsgrad degradiert aber im Laufe der Zeit und kommt längst nicht an die Wirkungsgrade kristalliner Zellen heran.

GaAs ist mit einer Energielücke von $E_g = 1{,}4$ eV optimal an das Sonnenspektrum angepasst. Die höchsten bislang erreichten Wirkungsgrade wurden daher mit GaAs-Zellen erreicht. Wegen der sehr hohen Herstellungskosten mit der Methode der Dünnschichtepitaxie werden GaAs-Zellen nur für Weltraumanwendungen eingesetzt.

Interessante Alternativen zu Silicium für terrestrische Anwendungen sind *Dünnschichtzellen* aus CdTe und verschiedenen Chalkopyriten (Tabelle 8.3). $CuInSe_2$ ($E_g = 1{,}05$ eV) und $CuInS_2$ ($E_g = 1{,}55$ eV) werden als *CIS-Zellen* bezeichnet. Durch stöchiometrische Mischung mit $CuGaSe_2$ ($E_g = 1{,}68$ eV) und $CuGaS_2$ ($E_g = 2{,}3$ eV) können quintinäre Verbindungen $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ – kurz CIGSSe – hergestellt werden, deren Energielücke optimal an das Sonnenspektrum angepasst werden kann.

Tabelle 8.3. Wirkungsgrade verschiedener Solarzellen

Material		Wirkungsgrad	
		Labormuster	Industrieelle Fertigung
Si	Einkristallin	23%	16% bis 18%
Si	polykristallin	20%	14% bis 16%
Si	polykristallines Band	13% bis 18%	11% bis 16%
Si	amorphe Dünnschicht	13%	7% bis 8%
GaAs	Einkristallin	25%	
CdTe	Dünnschicht	16%	9% bis 10%
$Cu(In,Ga)(S,Se)_2$	Dünnschicht	18,8%	9% bis 12%
$CuInS_2$	Dünnschicht	12,7%	
$CuGaSe_2$	Dünnschicht	9,3%	

8.4 Literatur

Brendel R (2003) Thin-Film Crystalline Silicon Solar Cells. Wiley-VCH, Berlin
Goetzberger A, Voß B, Knobloch J (1994) Sonnenenergie: Photovoltaik. Teubner, Stuttgart
Nelson J (2003) The Physics of Solar Cells. Imperial College Press, London
Schmid J (1999) Photovoltaik, Strom aus der Sonne. Müller, Heidelberg
Wagner A (1999) Photovoltaik Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg
Würfel P (2004) Physics of Solar Cells. Wiley-VCH, Weinheim

http://www.springer.com/978-3-540-23438-8

Photonik
Grundlagen, Technologie und Anwendung
Hering, E.; Martin, R. (Hrsg.)
2006, XXI, 523 S., Hardcover
ISBN: 978-3-540-23438-8