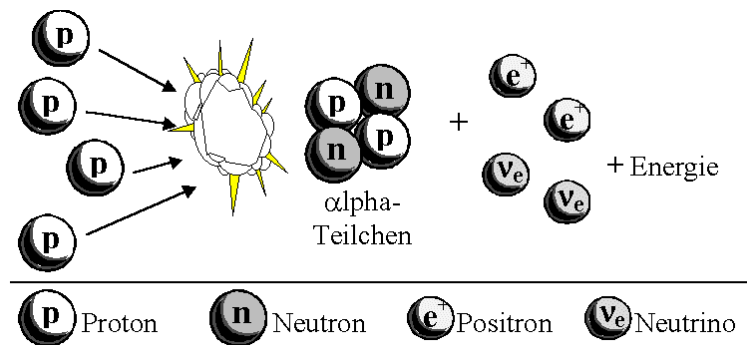


Der Fusionsreaktor Sonne

Die Strahlungsleistung der Sonne stammt aus **Kernfusionsprozessen**. Hierbei werden über verschiedene Zwischenreaktionen vier Wasserstoffkerne (Protonen ${}^1_1\text{p}$) zu einem Heliumkern (Alphateilchen ${}^4_2\alpha$) verschmolzen, der aus zwei Neutronen ${}^1_0\text{n}$ und zwei positiv geladenen Protonen ${}^1_1\text{p}$ besteht. Auf Grund der Ladungserhaltung werden dabei zwei Positronen e^+ und zwei Neutrinos ν_e erzeugt.

Kernfusionsreaktion: $4 {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^4_2\alpha + 2 e^+ + 2 \nu_e + \Delta E$



Die Gesamtmasse aller nach der Fusion entstandenen Teilchen ist geringer als die Summe aller an der Fusion beteiligten Teilchen vor der Reaktion. Der Massedefekt $\Delta m = 4,401 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$ ergibt sich durch die Umwandlung in freigesetzte Energie ΔE . Beim Zusammenbau des Atomkerns aus Protonen und Neutronen muss, damit ein stabiler Kern entsteht, dessen Bindungsenergie frei werden.

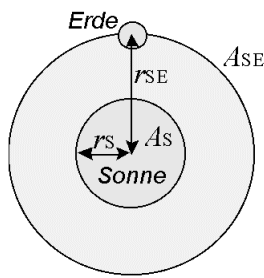
Masse-Energie-Äquivalent: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ mit $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 $\Delta E = 3,955 \cdot 10^{-12} \text{ J}$

Von den vier Elektronen der Wasserstoffatome werden zwei im Heliumatom gebunden. Es kommt zur Wechselwirkung der anderen beiden Elektronen mit den zwei Positronen und sie werden in Strahlungsenergie $\Delta E = 3,275 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ umgewandelt. Insgesamt wird bei der Fusionsreaktion eine Gesamtenergie von $\Delta E_{\text{Ges}} = 4,2825 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ freigesetzt. Durch die große Anzahl von Kernverschmelzungen summiert sich pro Sekunde ein sehr großer Energiebetrag. In jeder Sekunde verliert die Sonne eine Massedifferenz von $\Delta m = 4,278 \cdot 10^9 \text{ kg}$. Somit ergibt sich die **solare Strahlungsleistung** Φ_s .

Strahlungsleistung der Sonne: $\Phi_s = \Delta m / \Delta t \cdot c^2$
 $\Phi_s = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$

Bezogen auf die Sonnenoberfläche von $A_s = 6,092 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$ besitzt jeder Quadratmeter eine spezifische Ausstrahlung von $M_s = 63,116 \text{ MW/m}^2$ bei einer Oberflächentemperatur der Sonne von ca. 5800 K.

Die solare Strahlung breitet sich aus und trifft auf die Erde. Dabei verteilt sich die Strahlung nach dem quadratischen Abstandsgesetz in doppelter Entfernung von der Strahlungsquelle auf eine viermal so große Fläche. Somit verteilt sich die Strahlungsleistung, die durch die Sonnenoberfläche A_s tritt, auf eine Kugeloberfläche A_{SE} mit den Abmessungen der Erdumlaufbahn. Daraus ergibt sich die **Bestrahlungsstärke der Erde** E_E .

Bestrahlungsstärke der Erde:

$$E_E \cdot A_{SE} = M_S \cdot A_S$$

$$\text{mit } r_S = 6,9626 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$E_E = M_S \cdot \frac{r_S^2}{r_{SE}^2}$$

$$r_{SE} = (1,47 \dots 1,52) \cdot 10^{11} \text{ m}$$

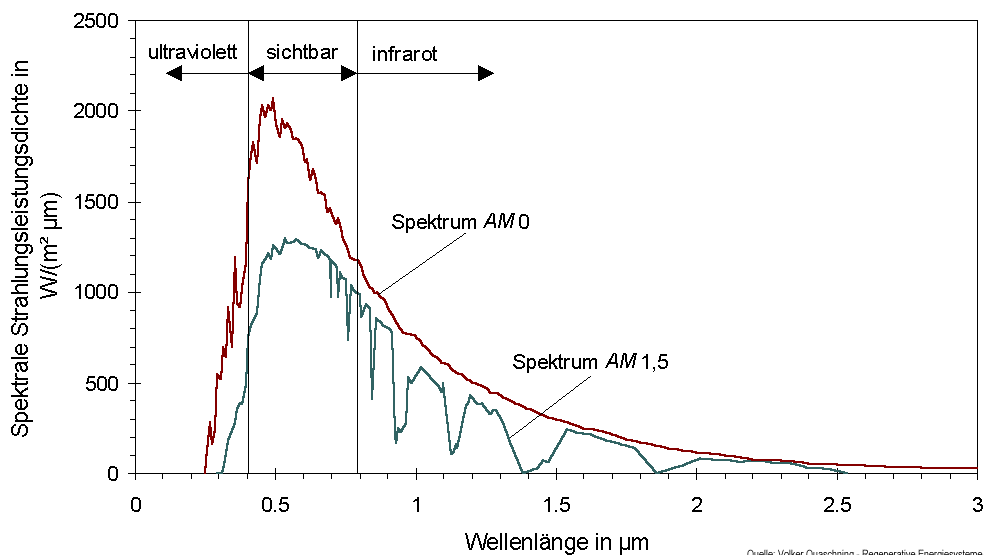
$$E_E = (1,32 \dots 1,42) \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Der Mittelwert wird als **Solarkonstante** $E_0 = 1,37 \text{ kW/m}^2$ bezeichnet.

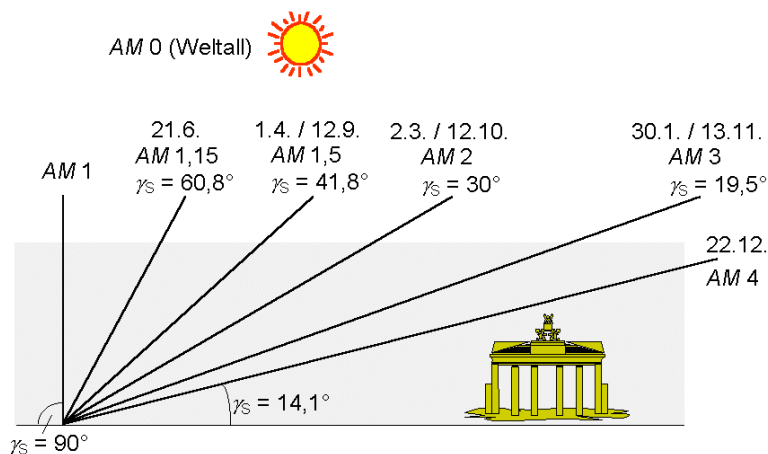
Dieser Wert kann außerhalb der Erdatmosphäre auf einer Fläche senkrecht zur Einstrahlungsrichtung gemessen werden.

Solare Strahlung auf der Erde

Die Bestrahlungsstärke wird beim Durchdringen der Atmosphäre durch Reflexion, Absorption und Streuung reduziert. Somit wird auch das **solare Spektrum** verändert.



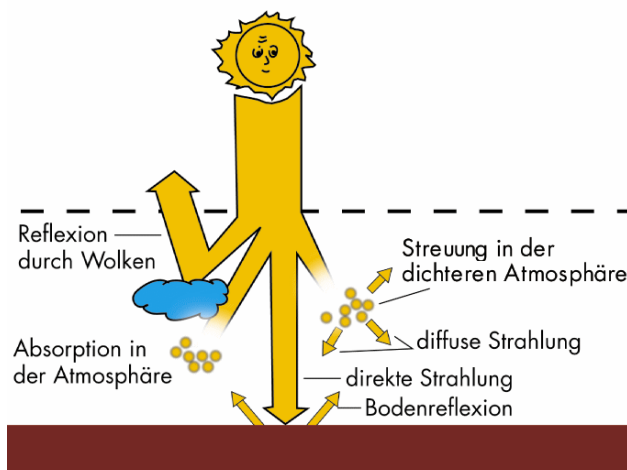
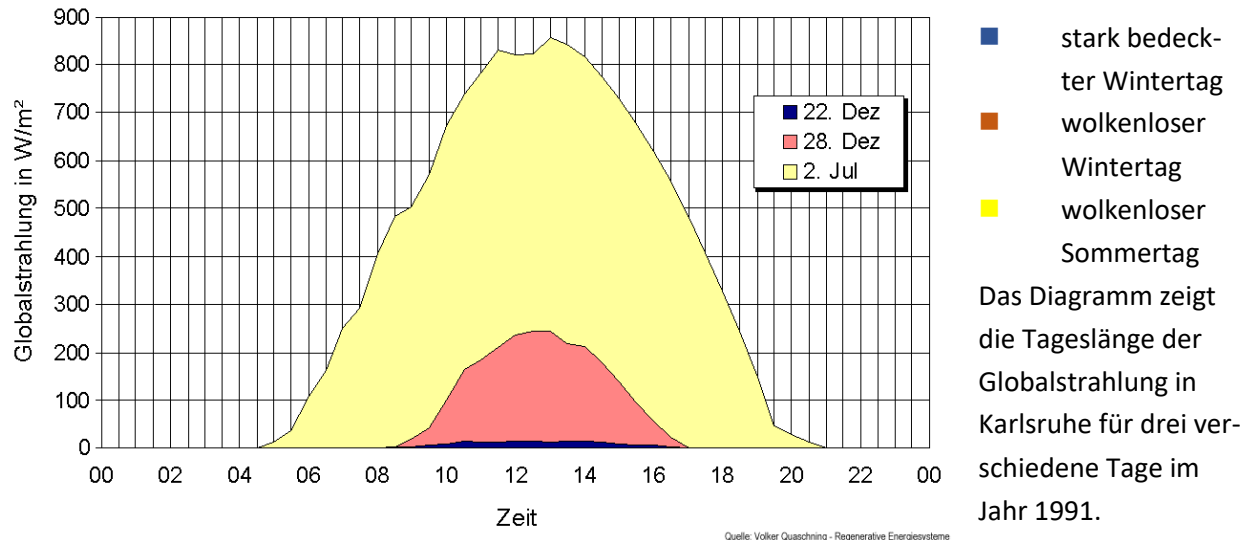
Das Spektrum gibt den Anteil der verschiedenen Wellenlängen an der Gesamteinstrahlung an. Beim extraterrestrischen Spektrum (AM 0) entfallen 7 % der Einstrahlung auf den ultravioletten, 47 % auf den sichtbaren und 46 % auf den infraroten Bereich. Beim terrestrischen Spektrum (AM 1,5) sind deutliche Einbrüche der Intensität infolge der Absorption an verschiedenen Gasteilchen zu erkennen. Das Spektrum AM 1,5 bezieht sich auf eine mittlere Sonnenhöhe (Einstrahlungswinkel) von $\gamma_S = 41,8^\circ$.



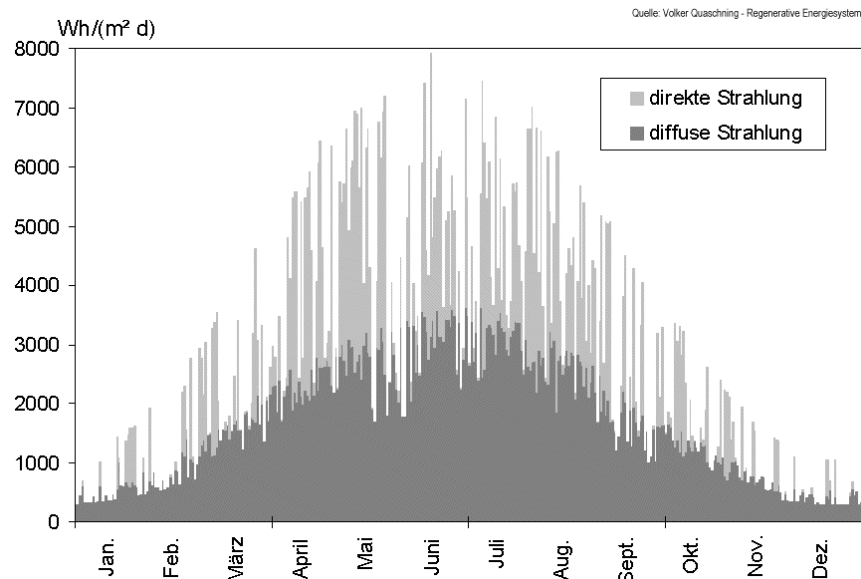
Dieser Einstrahlungswinkel gilt in Berlin jeweils am 01. April sowie am 12. September eines Jahres. Der AM-Wert (Air-Mass) gibt an, wie oft der Weg des Sonnenlichts der kürzesten Strecke durch die Erdatmosphäre entspricht. Bei senkrechtem Sonnenstand beträgt der AM-Wert 1.

Die Wellenlänge der intensivsten solaren Strahlung beträgt $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm}$ für eine Oberflächentemperatur der Sonne von ca. 5800 K. Diese Wellenlänge entspricht dem sichtbaren Licht im grünen Spektralbereich.

Die tägliche Sonneneinstrahlung ist stark von der Jahreszeit und auch vom Wetter abhängig.



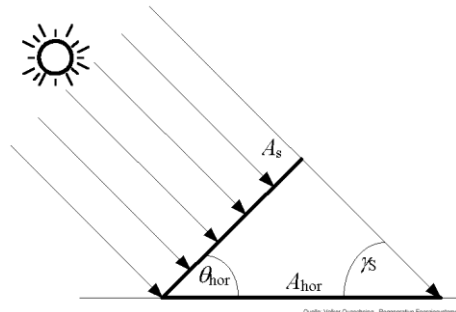
Unter **Globalstrahlung** versteht man die Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung. Der Diffusanteil erreicht die Erdoberfläche über Streuung an Wolken, Wasser- und Staubteilchen. An Tagen mit niedriger Globalstrahlung ist der Diffusanteil besonders hoch und kann bis zu 100 % betragen. Bei hoher Gesamtstrahlung sinkt der Diffusanteil auf Werte unter 20 %. In Mitteleuropa werden witterungsbedingt auch im Sommer Diffusanteile von über 50 % erreicht.



Das Diagramm zeigt den Verlauf der Tagessummen von Direkt- und Diffusstrahlung in Berlin. Es ist ersichtlich, dass bei hoher Globalstrahlung an klaren Sommertagen ein kleiner Diffusanteil vorhanden ist, der bei starker Bewölkung und niedriger Globalstrahlung auf 100 % ansteigen kann.

Die mittlere **Jahressumme der Globalstrahlung** beträgt in Deutschland ca. 1000 kWh/m². Dabei nimmt der Wert von Nord- nach Süddeutschland von 850 kWh/m² auf 1125 kWh/m² zu.

Eine kleinere, senkrecht zur Einfallsrichtung der direkten Strahlung ausgerichtete Fläche A_s erreicht die gleiche Strahlungsleistung Φ wie die horizontale Fläche A_{Hor} .



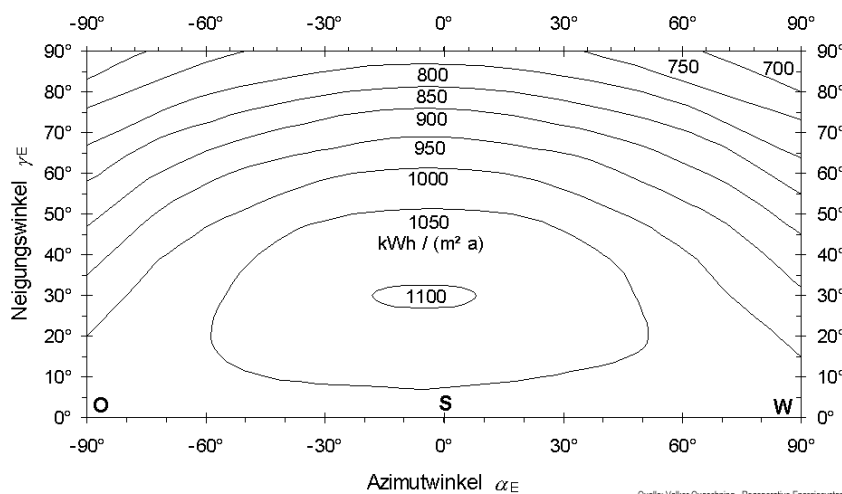
Somit ist die direkte Bestrahlungsstärke E_{Dir} auf der senkrecht zur Strahlung ausgerichteten Fläche A_s stets größer als auf der Horizontalen. Durch Neigung einer Photovoltaikanlage kann der zu erzielende Energieertrag erhöht werden.

γ_s ... Sonnenhöhe (Einstrahlungswinkel)

Wird eine Fläche der Sonne nachgeführt und so ausgerichtet, dass die Strahlung senkrecht einfällt, lässt sich der Energieertrag steigern. Hierfür ist zum großen Teil der höhere Anteil der direkten Strahlung verantwortlich. An Tagen mit hoher Einstrahlung und großem Direktanteil lassen sich durch Nachführung Strahlungsgewinne erzielen. Diese betragen im Sommer bis zu 50 % und im Winter bis zu 300 %. Bei ungünstigen Wetterverhältnissen mit hohem Anteil an diffuser Strahlung kann der Energieertrag einer geneigten Fläche auch reduziert werden, da der diffuse Strahlungsanteil hinter der geneigten Fläche nicht ausgenutzt werden kann. Der überwiegende Teil des Energiegewinns einer Nachführung wird jedoch im Sommer erzielt.

Es wird zwischen ein- und zweiachsiger Nachführung unterschieden. Die zweiachsige Nachführung lässt sich stets optimal zur Sonne ausrichten, ist aber technisch sehr aufwändig. Deshalb wird oft die einachsige Nachführung bevorzugt. Hierbei kann die Anlage entweder dem Tagesgang oder dem Jahresgang der Sonne nachgeführt werden. In Mitteleuropa lässt sich durch zweiachsige Nachführung ein Energiegewinn von ca. 30 % erzielen. Bei einachsiger Nachführung liegt der Energiegewinn bei ca. 20 %. Der höhere Energiegewinn kann bei Photovoltaikanlagen die Nachteile auf Grund des zusätzlichen technischen Aufwandes nicht kompensieren, sodass auf die Nachführung meist verzichtet wird.

Durch Neigung gegenüber der Horizontalen ist eine Steigerung des Energieertrages aber grundsätzlich möglich. Das Diagramm zeigt die Jahressumme der Globalstrahlung für verschieden orientierte und geneigte Flächen in Berlin.



Bei Photovoltaikanlagen, die ganzjährig genutzt werden, liegt der optimale Anstellwinkel in Mitteleuropa bei ca. 30° in Richtung Süden. Oft werden Anlagen auf Schrägdächern montiert, die nicht immer optimal nach Süden ausgerichtet sind. Dadurch kann der Energieertrag etwas niedriger ausfallen.

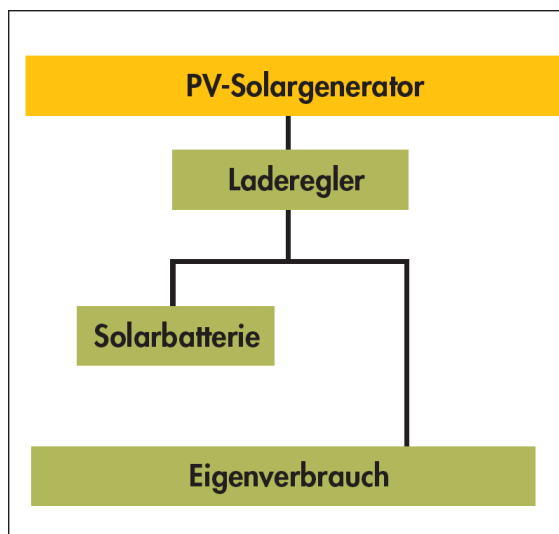
Auf Grund von **Abschattungen** durch Gegenstände in der Umgebung (Bäume, Sträucher, Gebäude, ...) in Abhängigkeit des Tages- bzw. Jahresgangs der Sonne wird die Bestrahlungsstärke in der Realität häufig reduziert. Dabei ist zu beachten, dass nicht alle Objekte der Umgebung das Sonnenlicht vollständig abschatten. Bäume lassen zum Beispiel in Abhängigkeit der Jahreszeit einen Teil der Strahlung durch, der über den Transmissionsgrad des Hindernisses erfasst wird. Somit erleiden Photovoltaikanlagen Abschattungsverluste.

Durch Anlagenneigung gegenüber der Horizontalen werden auch zusätzliche Verluste durch Verschmutzung der Oberfläche auf Grund von Luftverunreinigungen oder Vogelexkrementen vermieden. Durch Regen oder Schnee werden diese Verschmutzungen bei einer geneigten Anlage immer wieder abgewaschen, sodass sich ein Schmutzgleichgewicht einstellt. Je niedriger der Neigungswinkel, desto geringer ist die Reinigungswirkung von Regen und Schnee. Bei einem optimalen Neigungswinkel von ca. 30° muss unter mitteleuropäischen Verhältnissen mit Verlusten durch Verschmutzung in Höhe von 2 % bis 10 % gerechnet werden. Die Verluste nehmen bei geringerem Neigungswinkel deutlich zu. Bei starker Verschmutzung kann eine regelmäßige Reinigung der Oberflächen sinnvoll sein.

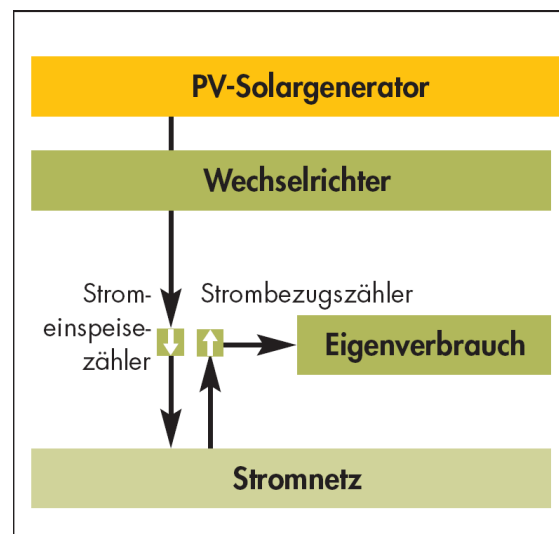
Bei aufgeständerten Anlagen kann es zu gegenseitigen Beschattungen von hintereinander aufgestellten Reihen kommen. Diese Abschattungsverluste werden durch die Wahl eines optimalen Reihenabstandes minimiert. Da die Festlegung des Reihenabstandes den Flächennutzungsgrad beeinflusst, ergibt sich für Photovoltaikanlagen meist ein hoher Flächenbedarf.

Begriff Photovoltaik

Es findet die direkte **Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie** statt. Im Jahr 1839 entdeckte Becquerel den Photoeffekt. 1954 wurde in den amerikanischen Bell-Laboratories die erste Silizium-Solarzelle für die Weltraumfahrt entwickelt. Ihr Wirkungsgrad betrug etwa 5 %. Die Halbleitertechnik hat sich seit dem kontinuierlich weiter entwickelt. Der Wirkungsgrad wurde auf über 20 % gesteigert und die Herstellungskosten konnten gesenkt werden. Dennoch liegen heute die Kosten von photovoltaisch erzeugter Energie deutlich über dem üblichen Preis. Durch den modularen Aufbau besitzen Photovoltaik-Anlagen vielseitige Einsatzmöglichkeiten. Es werden autonome und netzgekoppelte Anlagen unterschieden.



Prinzipieller Aufbau einer **autonomen Anlage**

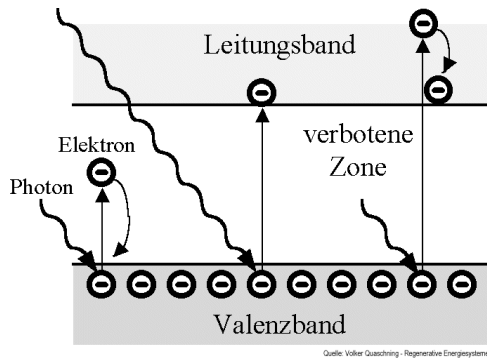


Aufbau einer **netzgekoppelten Anlage**

Innerer Photoeffekt

Beim **Bändermodell** werden für die einzelnen Energieniveaus der Elektronen Energiebänder eingeführt. Die verschiedenen Bänder können nur eine begrenzte Anzahl von Elektronen aufnehmen. Sie werden nacheinander mit Elektronen gefüllt. Das oberste vollständig gefüllte Band wird als **Valenzband** bezeichnet. Das nächst höhere Band kann entweder teilweise gefüllt oder vollständig leer sein und heißt **Leitungsband**. Der Raum dazwischen, der nicht erlaubte Energiezustände enthält, wird als verbotene Zone bezeichnet. Der Energieabstand zwischen den Bändern heißt **Bandabstand**. Je nach Anordnung und Besetzung der Bänder werden verschiedene Festkörper in elektrische Leiter, Halbleiter und nicht leitende Isolatoren eingeteilt.

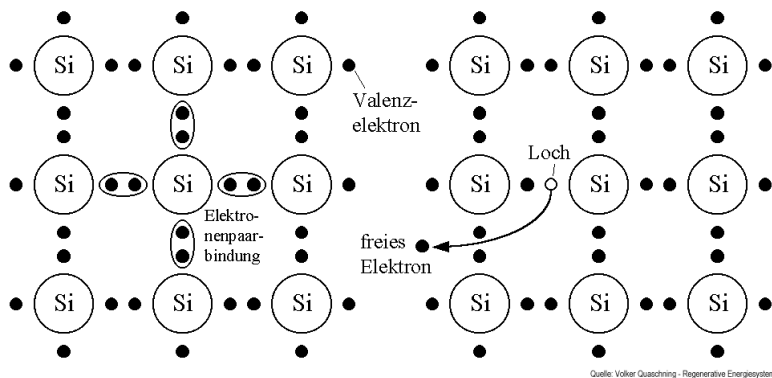
Leiter	Halbleiter	Isolatoren
Das Leitungsband ist nur teilweise mit Elektronen gefüllt oder Leitungs- und Valenzband überlappen sich. Die Elektronen können sich innerhalb des Festkörpers bewegen.	Das Leitungsband ist unbesetzt und der Bandabstand ist gering ($E < 5 \text{ eV}$). Elektronen können durch den Einfluss von Licht in das Leitungsband angehoben werden.	Das Leitungsband ist unbesetzt und der Bandabstand ist groß ($E \geq 5 \text{ eV}$). Elektronen können das Valenzband nur schwer verlassen.



Das Anheben von Elektronen durch Photonen in das Leitungsband wird als **innerer Photoeffekt** bezeichnet. Somit sind Halbleiter für die Photovoltaik von entscheidender Bedeutung. Ist die Energie des Photons geringer als der Bandabstand, kann das Elektron nicht ins Leitungsband gelangen. Ist die Energie des Photons zu groß, wird das Elektron ins Leitungsband angehoben und fällt anschließend an die Leitungsbandgrenze zurück.

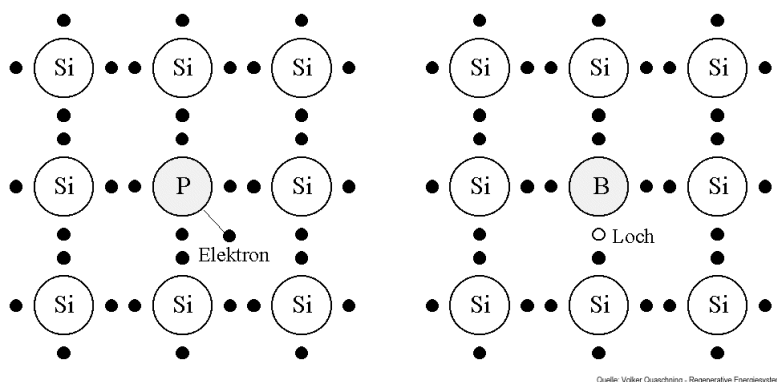
Funktionsweise von Solarzellen

Halbleiter verfügen in der Regel über vier Valenzelektronen. Elementarhalbleiter sind Elemente aus der IV. Gruppe des Periodensystems der Elemente. Ein häufig verwendetes Material ist Silizium (Si). Nach Sauerstoff ist Silizium das zweithäufigste Element in der Erdkruste. Es kommt aber meist in chemisch gebundener Form vor.



Im Silizium-Kristallgitter bilden jeweils zwei Elektronen von benachbarten Atomen eine Elektronenpaarbindung, um auf eine stabile Elektronenkonfiguration zu kommen. Das Valenzband ist somit voll besetzt und das Leitungsband ist leer. Durch Lichteinfluss kann ein Elektron ins Leitungsband angehoben werden

und ist im Kristallgitter frei beweglich. Im Valenzband bleibt ein Defektelektron (Loch) zurück. Durch die Defektelektronen entsteht die **Eigenleitung** des Halbleiters. Elektronen und Löcher treten paarweise auf. Elektronen- und Lochdichte sind immer gleich groß. Die Anzahl der freien Ladungsträger ist von der absoluten Temperatur und dem Bandabstand ($E_{Si} = 1,107 \text{ eV}$ bei $T = 300 \text{ K}$) abhängig. Bei tiefen Temperaturen sinkt die elektrische Leitfähigkeit ab.



n-Dotierung

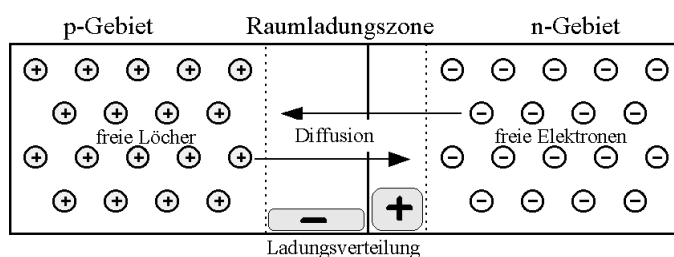
p-Dotierung

Für die Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie durch Solarzellen wird die **Störstellenleitung** angewendet.

Bei der **n-Dotierung** werden Atome mit fünf Valenzelektronen wie Phosphor (P) oder Antimon (Sb) aus der V. Gruppe des Periodensystems in das Siliziumgitter eingebaut. Diese Fremdatome heißen **Donatoren**. Das fünfte Elektron kann keine Elektronenpaarbindung eingehen und wird durch sehr geringe Energiezufuhr frei beweglich. Da bei der n-Dotierung mehr freie Elektronen als Löcher vorhanden sind, beruht die elektrische Leitung vor allem auf dem Transport von Elektronen. Der Halbleiter wird n-leitend.

Bei der **p-Dotierung** werden Atome mit drei Valenzelektronen wie Bor (B) oder Aluminium (Al) aus der III. Gruppe des Periodensystems in das Siliziumgitter eingebaut. Diese Fremdatome heißen **Akzeptoren**. Es fehlt ein Valenzelektron und es entsteht ein Loch als Störstelle. Durch geringe Energiezufuhr kann die Störstelle gelöst werden. Die elektrische Leitung beruht vor allem auf dem Transport von Löchern als positive Ladungsträger. Der Halbleiter wird p-leitend.

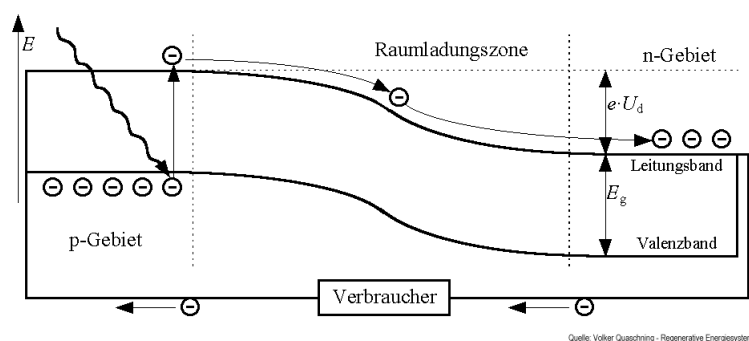
Werden ein p-dotierter und ein n-dotierter Halbleiter in Kontakt gebracht, entsteht ein **pn-Übergang**.



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Im n-Halbleiter existiert ein Überschuss an freien Elektronen. Im p-Halbleiter gibt es einen Überschuss an freien Löchern. Somit diffundieren die Elektronen vom n- ins p-Gebiet und die Löcher vom p- ins n-Gebiet. In der Übergangszone entsteht ein Gebiet mit wenigen freien Ladungsträgern.

Aus der positiven Raumladungszone sind die Elektronen abgewandert und es bleiben positiv ionisierte Dotieratome zurück. Aus der negativen Raumladungszone sind die Löcher abgewandert und es bleiben negativ ionisierte Dotieratome zurück. Zwischen dem n- und dem p-Gebiet entsteht ein elektrisches Feld, das der Bewegung der Ladungsträger entgegen gerichtet ist. Die Diffusion der Ladungsträger wird nicht endlos fortgesetzt und es stellt sich eine charakteristische **Diffusionsspannung** ein ($U_d = 0,73 \text{ V}$ für Silizium bei $T = 300 \text{ K}$).

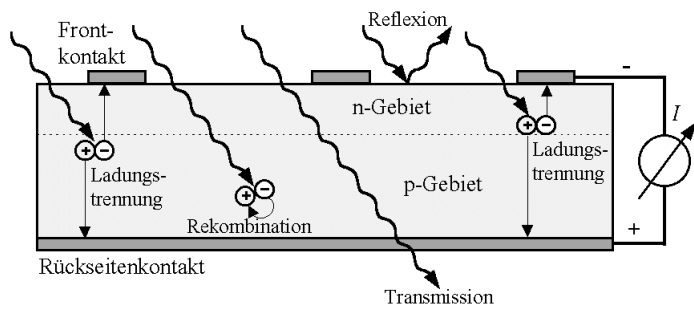


Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Somit lässt sich das Grundprinzip einer **Solarzelle** mit dem Energiebändermodell beschreiben. Durch Photonen werden in der Raumladungszone Elektronen gelöst und vom Valenz- in das Leitungsband gehoben. Diese werden durch das elektrische Feld in das n-Gebiet gezogen.

Die entstehenden Löcher wandern in das p-Gebiet. Über einen elektrischen Verbraucher wird der Stromkreis geschlossen.

Mit Solarzellen kann auf Grund von Reflexion sowie Transmission des Lichtes nur ein Teil der eintreffenden Strahlungsenergie in elektrische Energie umgewandelt werden. Nach Ladungstrennung durch Photonen im Halbleiter können Elektronen mit Löchern rekombinieren, sodass sie in das Valenzband zurückfallen. Der nutzbare Energiebetrag hängt im Wesentlichen von der Wellenlänge der Strahlung ab.



Werden beide Kontakte einer Solarzelle kurzgeschlossen, fließt der **Photostrom**. Dieser ist abhängig von der Solarzellenfläche, der spektralen Empfindlichkeit der Solarzelle in Abhängigkeit von der Wellenlänge und dem Spektrum des Sonnenlichtes.

Der Anteil der Bestrahlungsstärke, der durch die Solarzelle absorbiert wird, hängt von der Schichtdicke und dem materialbezogenen Absorptionskoeffizienten ab. Je höher der Absorptionskoeffizient ist, desto dünner kann die Schichtdicke ausgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Absorptionskoeffizient wellenlängenabhängig ist.

Herstellung von Solarmodulen

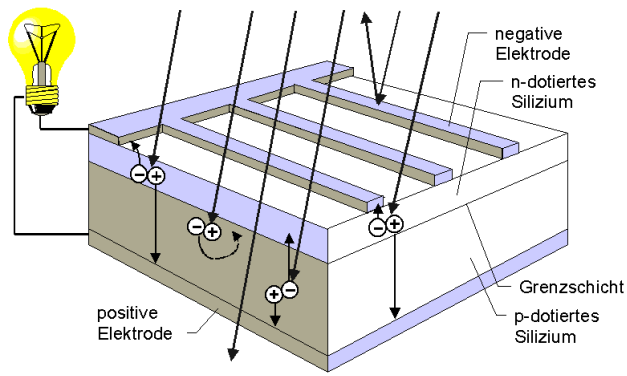
Der bisher am häufigsten verwendete Halbleiterwerkstoff ist Silizium. Er wird aus Quarzsand (SiO_2) durch eine Reduktionsreaktion bei hohen Temperaturen über 1000°C gewonnen. Das Reaktionsprodukt wird als metallurgisches Silizium bezeichnet und besitzt eine Reinheit von 98 %. Für die Verwendung in Solarzellen muss dieses Rohsilizium einen Reinigungsprozess durchlaufen. Für die Herstellung von hochreinem **Solarsilizium** gibt es verschiedene Verfahren. Diese Verfahren sind auf Grund mehrerer aufwändiger Zwischenschritte der energieintensivste Teil bei der Produktion von Solarmodulen. Bei polykristallinem Silizium sind die Kristalle unterschiedlich ausgerichtet. Zwischen den Bereichen unterschiedlicher Ausrichtung entstehen Korngrenzen, an denen bei der Solarzelle Verluste auftreten. Um den Wirkungsgrad zu steigern, wird monokristallines Material verwendet. Diese Einkristalle werden im Tiegel- oder Zonenziehverfahren bei hohen Temperaturen hergestellt.



Tiegelziehverfahren

Zonenziehverfahren

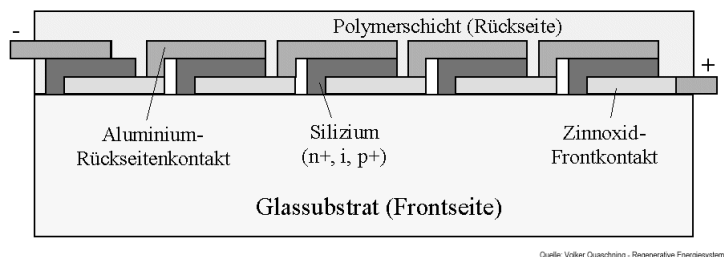
Die etwa 2 m langen hochreinen monokristallinen Siliziumstäbe mit einem Durchmesser bis zu 300 mm werden in 200 bis $500\ \mu\text{m}$ dicke Scheiben geschnitten. Hierbei treten hohe Zerspanungsverluste von 30 bis 50 % auf. Die Rohscheiben werden als **Wafer** bezeichnet und müssen an der Oberfläche gereinigt werden. Anschließend werden sie dotiert und mit Kontakten versehen. Für die Dotierung mit Fremdatomen wie Phosphor oder Bor kommt das Gasdiffusionsverfahren zur Anwendung. Die Dotierungsstoffe strömen mit einem Trägergas (z.B. Stickstoff) bei Temperaturen zwischen 800 und 1200°C über die Siliziumscheiben und die Fremdatome diffundieren in Abhängigkeit der Gasmischung, der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit in den Halbleiter.



Im Siebdruckverfahren werden die Front- und Rückseitenkontakte aus Legierungen auf der Basis von Aluminium oder Silber aufgebracht. Die Frontkontakte sind in Form von dünnen Streifen ausgeführt, damit sie wenig Fläche abschatten. Zum Schluss wird die Solarzelle noch mit einer Antireflexionsschicht aus Titandioxid (TiO_2) versehen.

Mehrere kristalline Solarzellen werden in einem **Modul** zusammengefasst. Die Modulgröße ist variabel und den Anforderungen anpassbar. Die Solarzellen werden durch Laminieren in Kunststoff eingebettet und die vorderseitige Abdeckung erfolgt mit Glasscheiben. Die fertigen Solarmodule werden noch mit einem Rahmen versehen.

Dünnschichtzellen bestehen aus amorphem Silizium oder anderen Halbleitermaterialien. Vorteile sind der geringere Materialeinsatz und die kostengünstigere Herstellung. Nachteilig ist, dass die verwendeten Stoffe zum Teil hoch toxisch sind. Deshalb spielen hier Produktionssicherheit und Recycling eine große Rolle. Bestimmte Rohstoffe sind nur in begrenztem Umfang verfügbar.

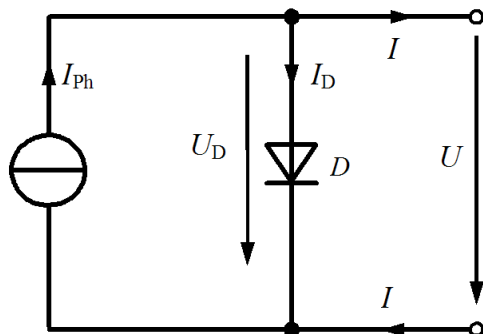


Bei amorphem Silizium kommt es zur Modifikation des Kristallgitters. Die Atome sind unregelmäßig angeordnet. Das amorphe Silizium verfügt über ein hohes Absorptionsvermögen von elektromagnetischen Wellen im optischen und infraroten Spektralbereich und eignet sich somit für Dünnschichtzellen.

Auf einen Glasträger wird eine dünne Schicht aus transparentem Zinnoxid im Sprayverfahren aufgebracht. Mit einem Laser werden daraus die Frontkontakte geschnitten. Silizium und Dotierungsstoffe werden danach bei hohen Temperaturen aufgedampft. Im Siebdruckverfahren werden die Rückseitenkontakte aus Aluminiumpulver hergestellt und zum Schutz in eine Polymerschicht eingebettet. Der Wirkungsgrad bei amorphen Solarzellen ist mit 6 bis 8 % deutlich niedriger als bei kristallinen Solarzellen, die einen Wirkungsgrad bis zu knapp 20 % erreichen. Bei amorphen Solarzellen ist zusätzlich ein Degradationsprozess zu beachten, der den Wirkungsgrad während der Betriebszeit absinken lässt.

Elektrische Beschreibung

Eine unbestrahlte Solarzelle verhält sich wie eine Diode. Bei einer bestrahlten Solarzelle kann zu der Diode eine Stromquelle parallel geschaltet werden.

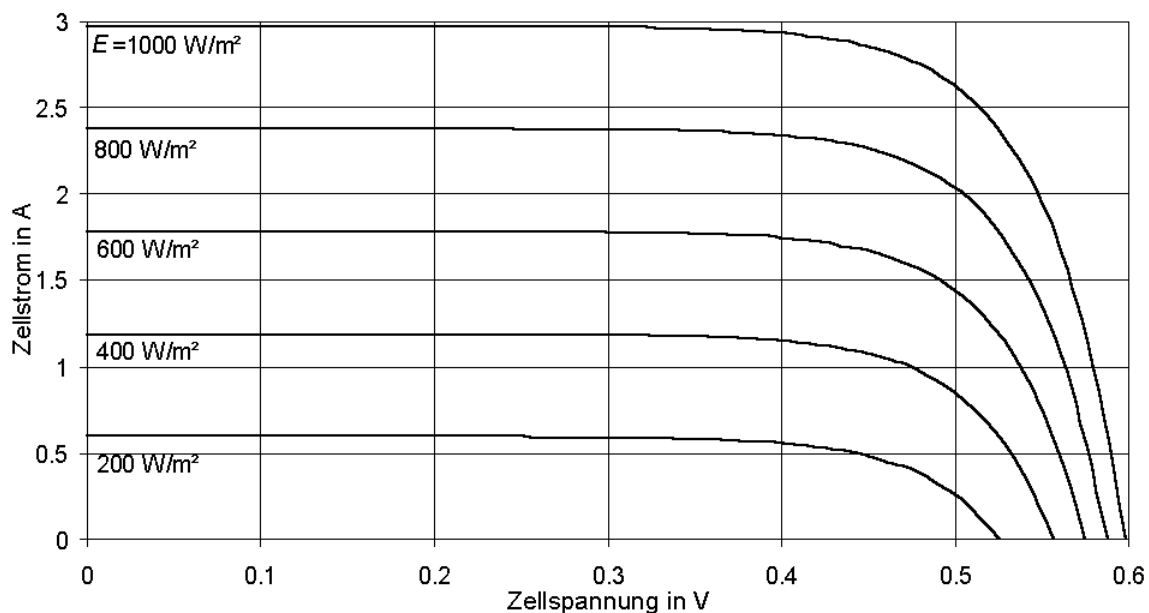


Ersatzschaltbild einer Solarzelle

(idealisierte Darstellung)

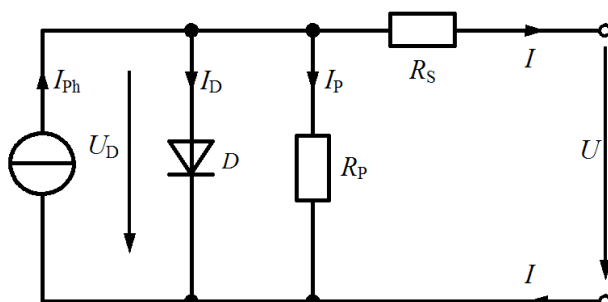
- D ... Diode
- I_D ... Diodenstrom in Durchlassrichtung
- U_D ... Diodenspannung
- I_{Ph} ... Photostrom bei Bestrahlung
- I ... Zellstrom
- U ... Zellspannung

Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss der Bestrahlungsstärke auf den Verlauf der I – U – Kennlinie einer Solarzelle:



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

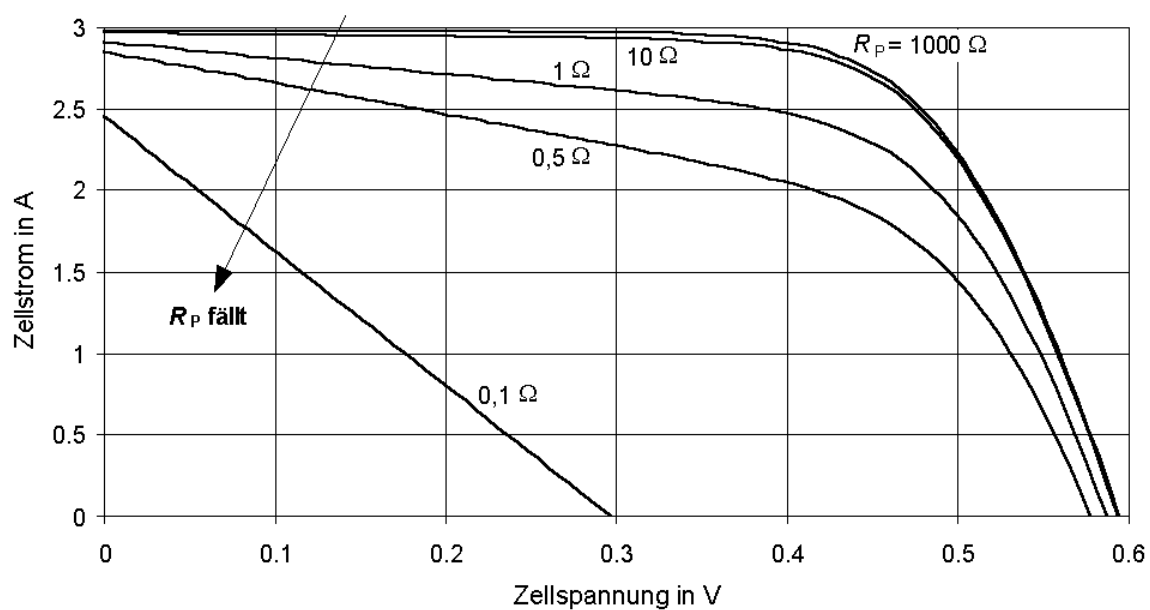
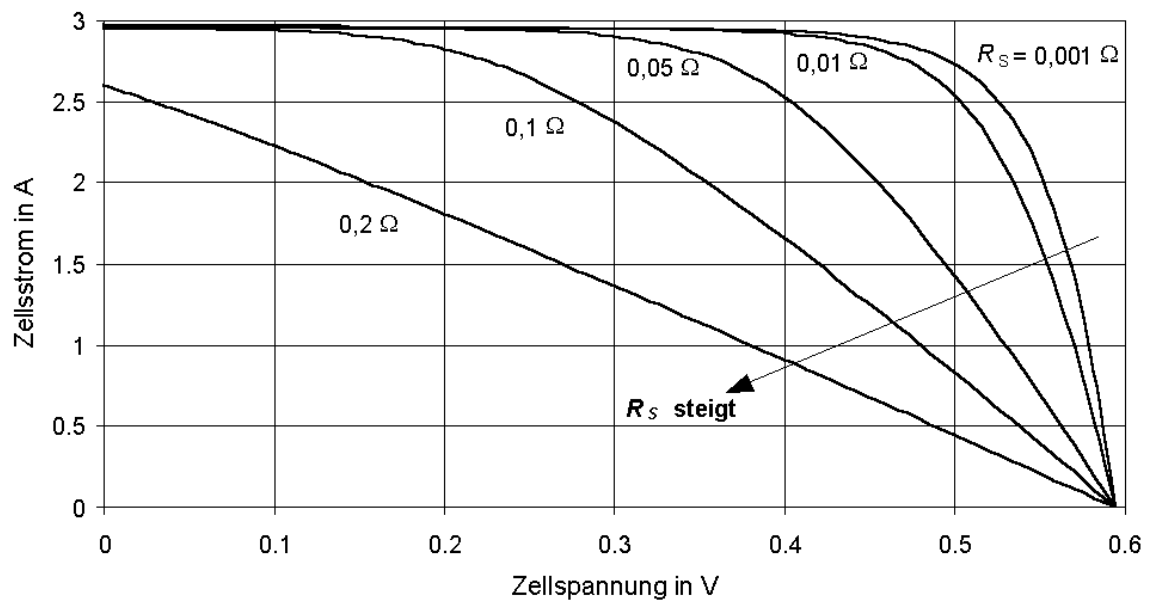
Für die Beschreibung einer realen Solarzelle muss die idealisierte Darstellung erweitert werden. Es kommt zu einem Spannungsabfall auf dem Weg der Ladungsträger vom Halbleiter zu den externen Kontakten. Dieser Spannungsabfall lässt sich durch den Serienwiderstand R_S beschreiben. Weiterhin treten Leckströme längs der Kanten der Solarzelle auf, die durch den Parallelwiderstand R_P erfasst werden. Der Serienwiderstand R_S liegt bei realen Zellen im Bereich einiger Milliohm. Der Parallelwiderstand R_P ist in der Regel deutlich größer als 10Ω .



Erweitertes Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle (Eindiodenmodell)

- I_P ... Leckstrom
- R_P ... Parallelwiderstand
- R_S ... Serienwiderstand

Serienwiderstand R_S und Parallelwiderstand R_P beeinflussen den Verlauf der I – U – Kennlinie:

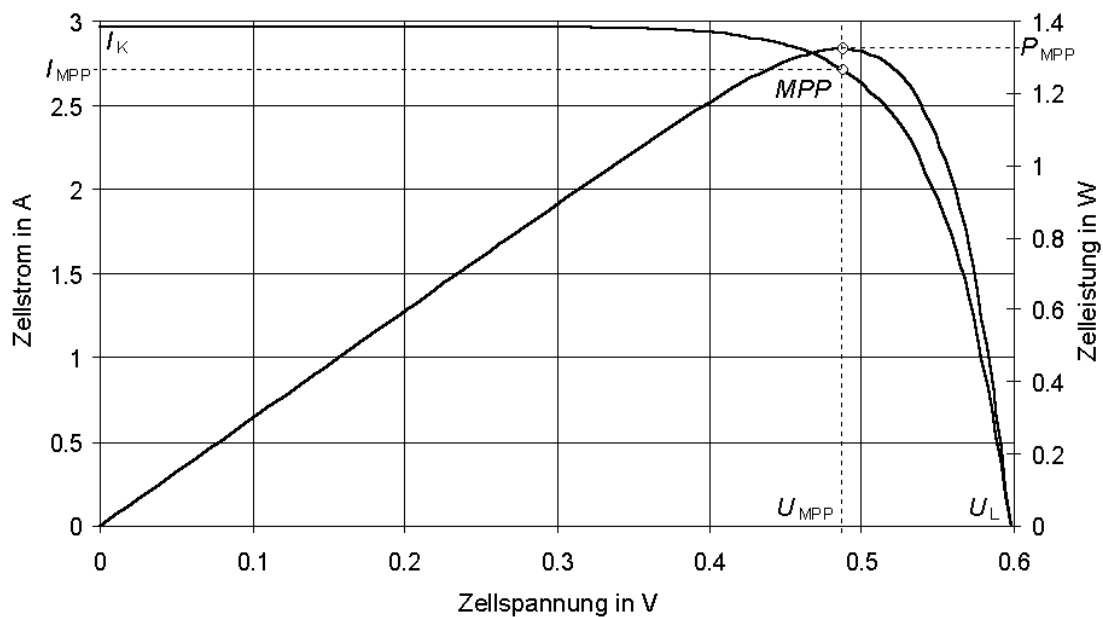


Wird die Solarzelle kurzgeschlossen, ist die Klemmspannung an der Zelle gleich null und es fließt der Kurzschlussstrom I_K , der in guter Näherung dem Photostrom I_{ph} entspricht. Dieser ist proportional zur Bestrahlungsstärke. Mit steigender Temperatur nimmt der Kurzschlussstrom zu. Dieser wird bezogen auf die Normaltemperatur $\vartheta = 25\text{ °C}$ angegeben.

Beindet sich die Solarzelle im Leerlauf, ist die Stromstärke gleich null und es liegt die Leerlaufspannung U_L an. Mit steigender Temperatur sinkt die Leerlaufspannung schneller als der Kurzschlussstrom steigt.

Die maximale Leistung kann der Solarzelle bei einer bestimmten Spannung entnommen werden. Die P – U – Kennlinie (Leistungskurve) besitzt einen Maximalpunkt, der als **Punkt maximaler Leistung** (MPP ... Maximum Power Point) bezeichnet wird. Die Spannung U_{MPP} am Punkt maximaler Leistung ist kleiner als die Leerlaufspannung U_L und der Strom I_{MPP} ist kleiner als der Kurzschlussstrom I_K .

Die maximale Zelleistung berechnet sich: $P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} < U_L \cdot I_K$



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Da die Stromstärke proportional zur Bestrahlungsstärke ist, nimmt die maximale Zelleistung mit der Bestrahlungsstärke zu. Bei Temperaturanstieg sinkt die maximale Zelleistung ab. Um verschiedene Solarmodule miteinander vergleichen zu können, wird die MPP – Leistung unter Standardtestbedingungen ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $\vartheta = 25 \text{ °C}$, AM 1,5) ermittelt. Unter natürlichen Bedingungen ist die abgegebene Leistung von Solarmodulen fast immer geringer.

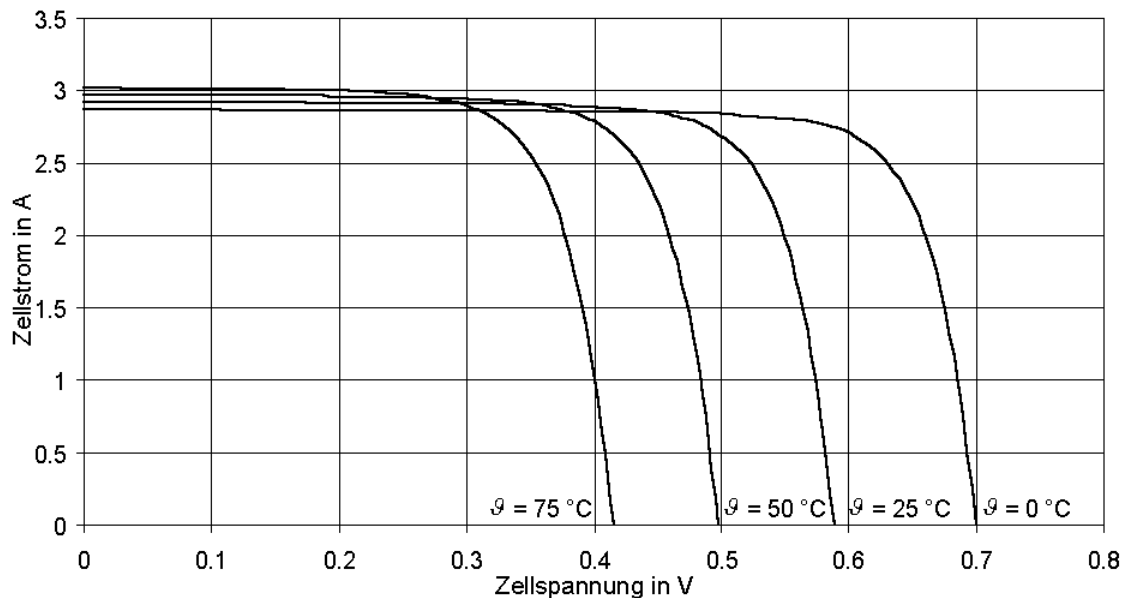
Als Qualitätskriterium für Solarzellen dient der **Füllfaktor** FF. Dieser beschreibt, wie gut die I – U – Kennlinie der Solarzelle dem Rechteck aus Leerlaufspannung U_L und Kurzschlussstrom I_K angenähert ist. Der Wert ist stets kleiner als eins und liegt in der Regel zwischen 0,75 und 0,85.

Der **Wirkungsgrad** η einer Solarzelle berechnet sich aus der MPP – Leistung P_{MPP} , der Bestrahlungsstärke E und der Solarzellenfläche A :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot U_L \cdot I_K}{E \cdot A}$$

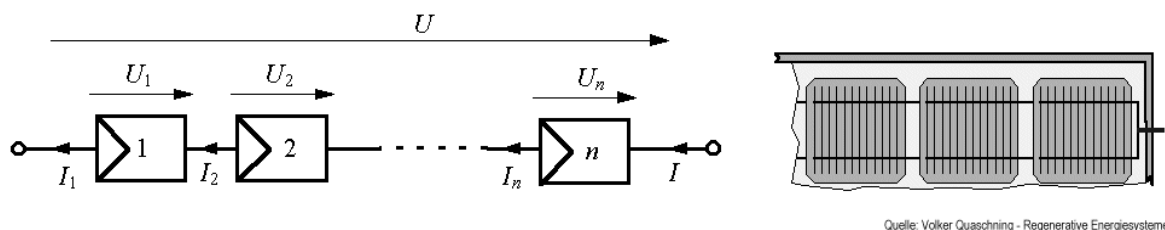
Temperaturabhängigkeit der Solarzellenkennlinien:

In der folgenden Abbildung ist der Verlauf der I – U – Kennlinien bei sich ändernder Temperatur ϑ dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Leerlaufspannung mit zunehmender Temperatur stark sinkt. Der Kurzschlussstrom steigt hingegen nur leicht an. Daraus resultiert eine Reduzierung der MPP – Leistung bei steigender Temperatur.



Reihenschaltung von Solarzellen:

Aufgrund der niedrigen Spannungen werden Solarzellen nicht einzeln betrieben, sondern in Reihe geschaltet. Diese Reihenschaltung wird als **Photovoltaik – Modul** bezeichnet. Mehrere Module werden zu einem Photovoltaik – Generator kombiniert. Dabei können die Module in Reihe, parallel oder in Parallel-/Reihen-Kombination zusammengeschaltet werden.



Bei einer Reihenschaltung von n Zellen ist der Strom I_i durch alle Zellen i gleich groß. Die Zellspannungen U_i addieren sich zur Modulspannung U.

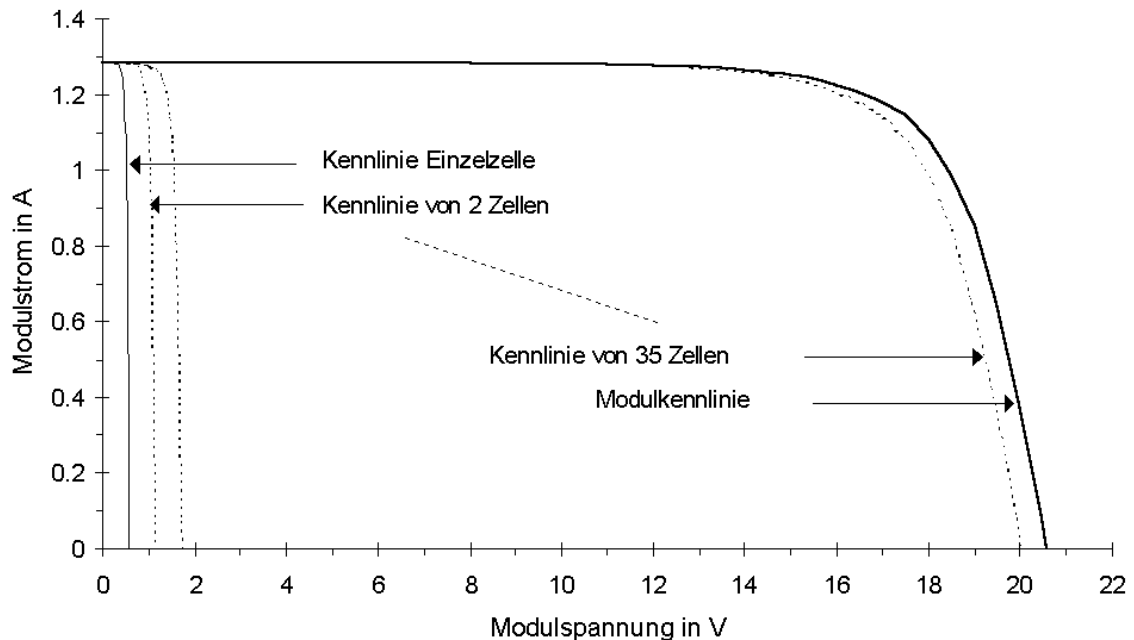
$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$U = \sum_{i=1}^n U_i$$

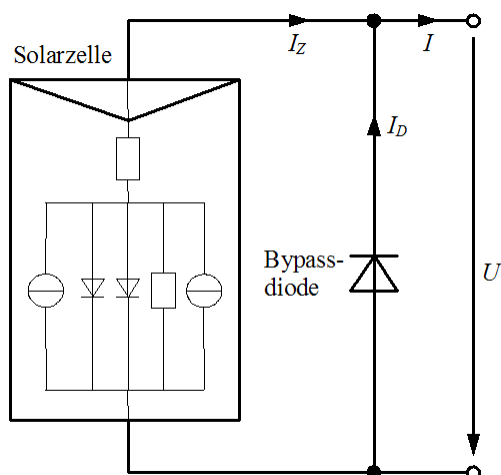
Sind alle Zellen identisch und herrschen für alle Zellen gleiche Bedingungen, gilt für die Modulspannung:

$$U = n \cdot U_i$$

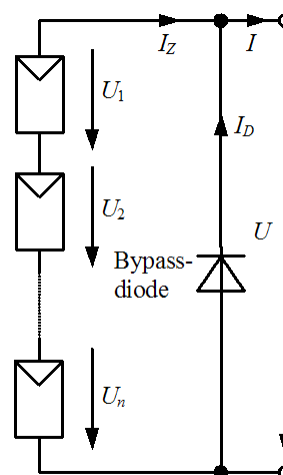
Bei Modulen, die für einen 12 V – Betrieb zum Laden von Akkumulatoren ausgelegt sind, hat sich eine optimale Zellenzahl von 36 bis 40 als Standard durchgesetzt. Die folgende Abbildung zeigt die Konstruktion einer Modulkennlinie mit 36 Zellen aus den Zellkennlinien für eine Bestrahlungsstärke $E = 400 \text{ W/m}^2$ und eine Temperatur $T = 300 \text{ K}$:



Im realen Betrieb herrschen nicht bei allen Zellen gleiche Bedingungen. Durch Verschmutzung oder Witterungseinfluss kann es zur Abschattung einzelner Zellen kommen. Dadurch wird der Verlauf der idealen Modulkennlinie stark beeinflusst. Die Modulleistung wird durch Zellabschattung drastisch reduziert, da abgeschattete Zellen als Verbraucher betrieben werden. Bei hoher Bestrahlungsstärke steigt die Verlustleistung von abgeschatteten Zellen stark an und es tritt an diesen Stellen eine starke Erwärmung auf, die bis zur thermischen Zerstörung der betroffenen Zellen führen kann. Dieser Effekt wird als Hot – Spot bezeichnet. Um einzelne Zellen oder Zellstränge im Solarmodul vor Hot – Spots zu schützen, werden **Bypassdioden** parallel zu den Zellen integriert. Nur im Abschattungsfall kommt es über die Bypassdioden zum Stromfluss. Verlustleistung und Zelltemperatur werden so begrenzt.



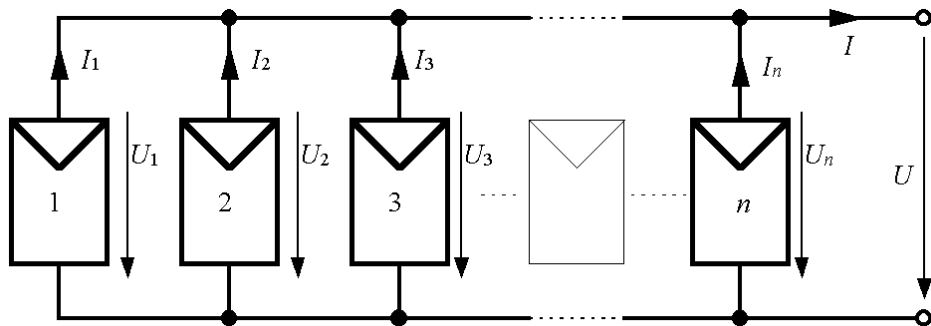
Bypassdiode über eine einzelne Solarzelle



Bypassdiode über einen Zellstrang

Parallelschaltung von Solarzellen:

Werden Solarzellen parallel geschaltet, treten große Stromstärken auf. Damit sind hohe Leitungsverluste verbunden und die reine Parallelschaltung findet praktisch kaum Anwendung.



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

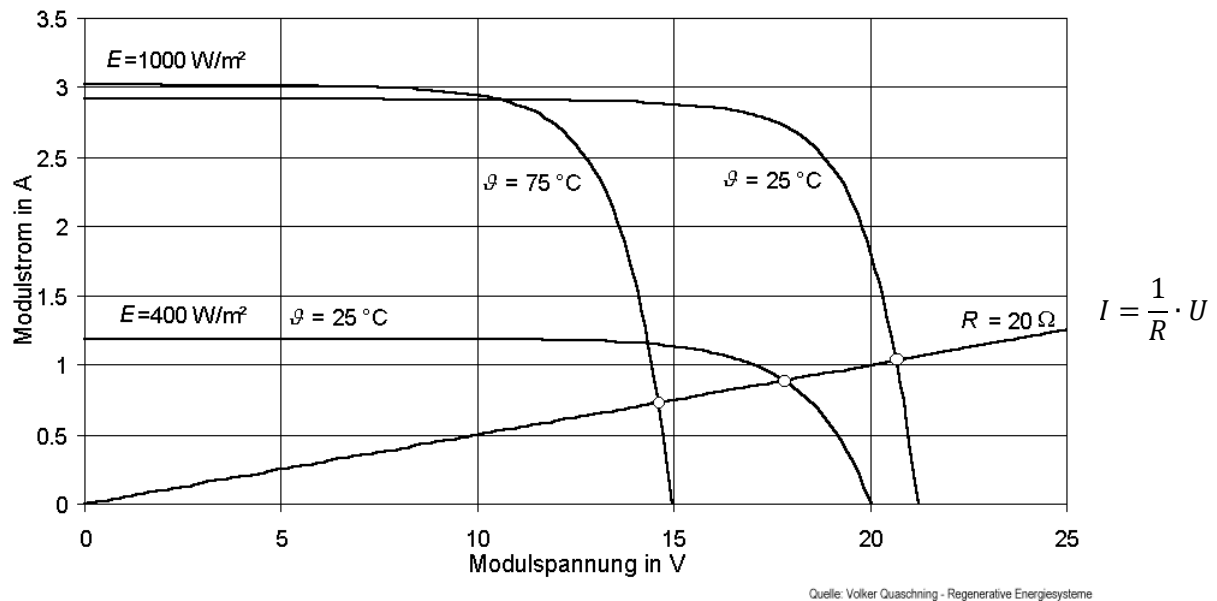
Bei der Parallelschaltung liegt an allen Zellen die gleiche Spannung U an. Die Zellströme I_i addieren sich zum Gesamtstrom I .

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$I = \sum_{i=1}^n I_i$$

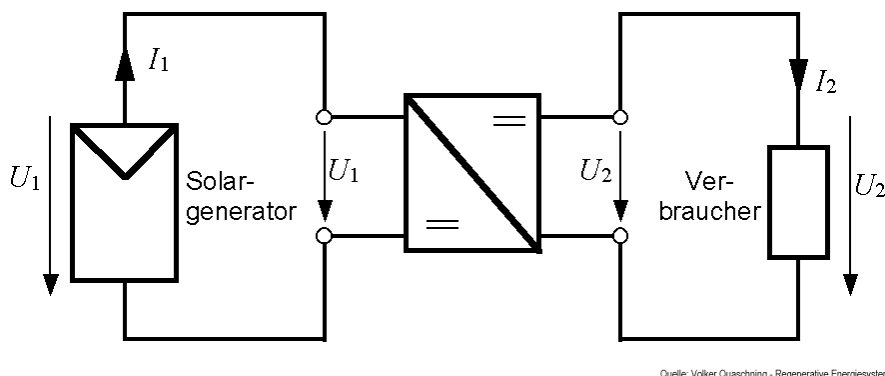
Solargenerator

In der Praxis wird der Solargenerator mit einer **Widerstandslast** betrieben.

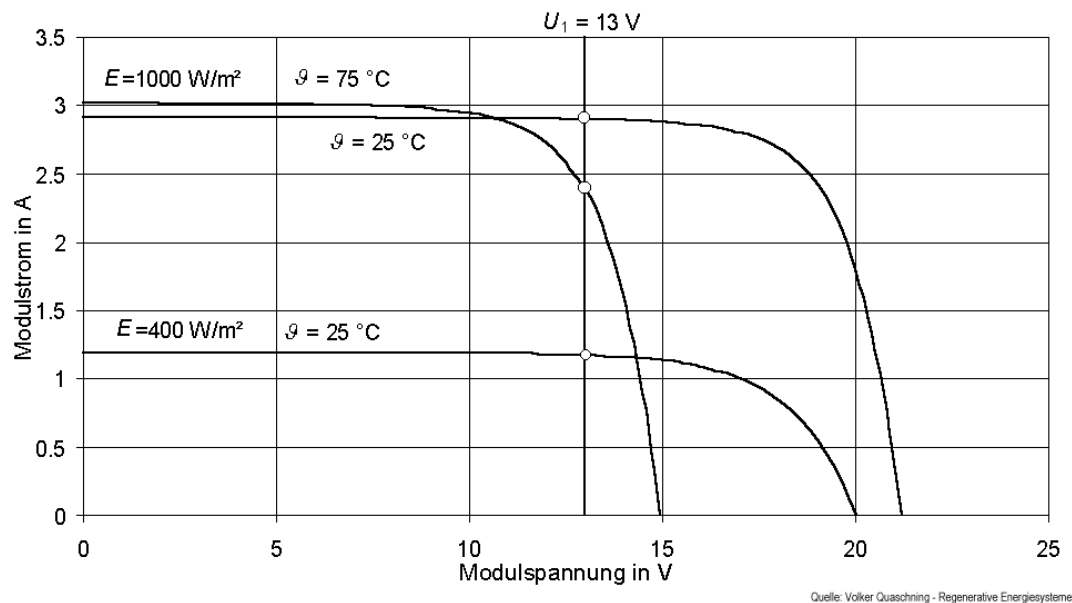


Am Arbeitspunkt ist der Strom durch Solarmodul und Widerstand gleich groß und es stellt sich eine gemeinsame Spannung ein. Bei der grafischen Bestimmung des Arbeitspunktes werden die Widerstandsgerade und die $I - U$ – Kennlinie des Solarmoduls in ein Diagramm gezeichnet. In dem Schnittpunkt beider Kennlinien liegt der Arbeitspunkt. Der Arbeitspunkt variiert je nach Betriebszustand des Solarmoduls. Einflussgrößen sind die Bestrahlungsstärke und die Temperatur. Der Arbeitspunkt sollte nahe dem Punkt der maximalen Leistung (MPP) liegen. Somit wird die höchst mögliche Leistung an den Widerstand des Verbrauchers abgegeben.

Die Leistungsausbeute des Solargenerators lässt sich steigern, wenn zwischen Verbraucher und Solargenerator ein **Gleichspannungswandler** geschaltet wird. Dieser ermöglicht, dass am Solargenerator eine andere Spannung eingestellt werden kann als am Verbraucher. Zusätzlich kann die Spannung am Solargenerator in Abhängigkeit von der Temperatur variiert werden. Es ist sinnvoll, bei niedriger Temperatur eine höhere Spannung am Solargenerator zu wählen. Gleichspannungswandler erreichen Wirkungsgrade von über 90 %. Nur ein geringer Anteil der Leistung geht am Wandler in Wärme über.



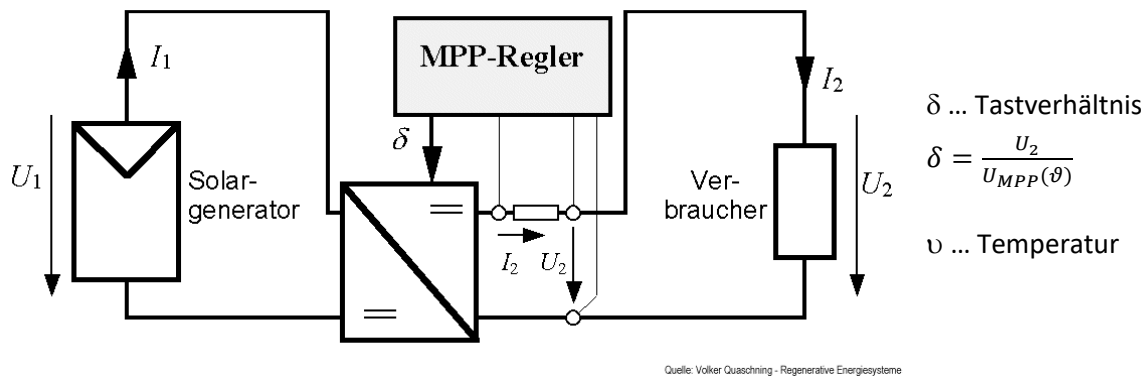
Das folgende Diagramm zeigt ein Solarmodul bei verschiedenen Betriebszuständen mit einer Konstantspannungslast:



Ist am Solargenerator eine feste Spannung eingestellt, treten bei Schwankungen von Bestrahlungsstärke und Temperatur Verluste auf, da der Arbeitspunkt nicht der maximal möglichen Leistung entspricht. Besitzt der Spannungswandler eine Regelung für die Spannung am Solargenerator in Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke und Temperatur, lässt er sich in den meisten Fällen im Punkt der maximalen Leistung betreiben. Ein Wandler mit der entsprechenden Regelung wird als **MPP – Tracker** bezeichnet.

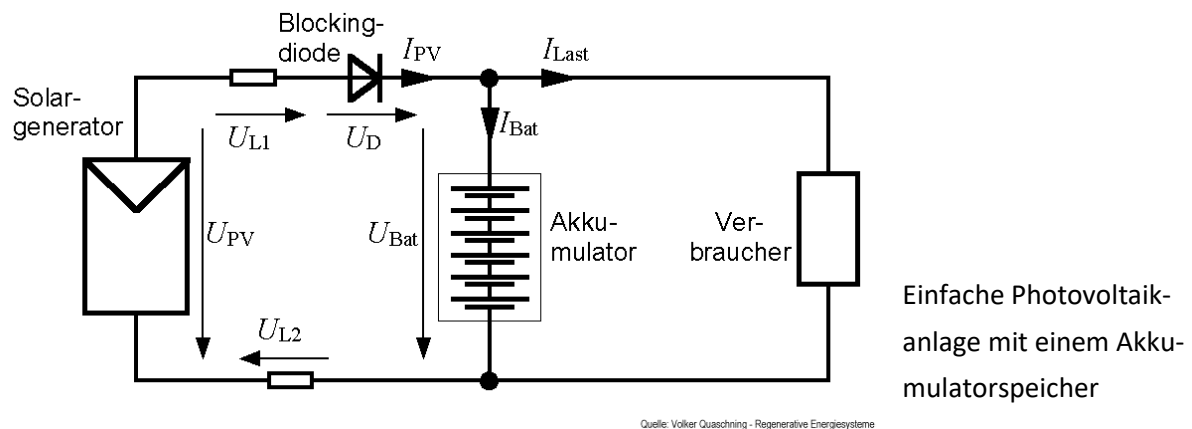
Sensorgesteuerte Regelung	Regelung mit Hilfe einer Referenzzelle	Regelung über das Suchschwingverfahren
Die MPP – Spannung wird mit Hilfe von Temperatur- und Strahlungssensoren berechnet.	Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom einer Referenzzelle, die in der Nähe des Solargenerators montiert ist, werden messtechnisch aufgenommen. Aus den Messwerten lässt sich die MPP – Spannung des Solargenerators ermitteln.	Spannung und Stromstärke werden am Ein- oder Ausgang des Spannungswandlers gemessen. Die Leistung wird berechnet. Durch Veränderung des Tastverhältnisses am Spannungswandler wird die Leistung optimiert.
Regelung mit dem Nulldurchgangsverfahren	Regelung mit Hilfe der differentiellen Änderung	Regelung nach dem Kennlinienverfahren
Aus den Messwerten von Strom und Spannung wird die Leistung des Solargenerators berechnet. Mit Hilfe eines Differenzierers wird die Generatorspannung variiert.	Stromstärke und Spannung werden gemessen und deren differentielle Änderung bestimmt. Es wird das Gleichgewicht beider Größen geregelt.	Stromstärke und Spannung werden gemessen. Durch sich abwechselnde Veränderung von Spannung und Strom wird der Arbeitspunkt dem MPP angenähert.

Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau eines **MPP – Trackers** mit einer Regelung über das Such-schwingverfahren:



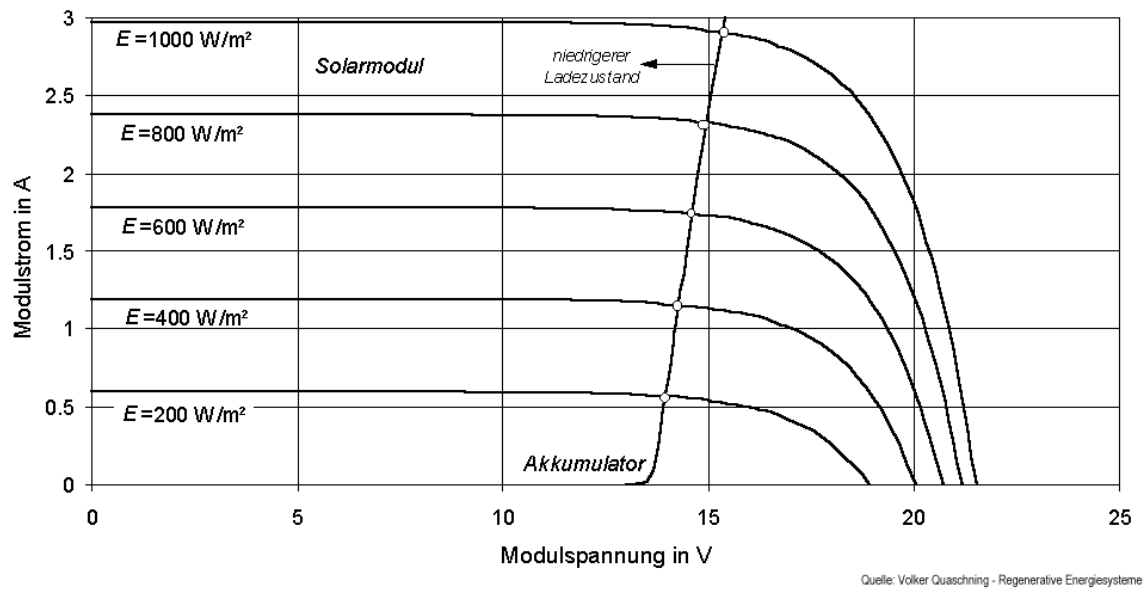
Bei Abschattungen von Teilen des Solargenerators kann es zu Schwierigkeiten bei der MPP – Regelung kommen, den optimalen Arbeitspunkt zu finden. Dadurch treten bei häufiger Abschattung große Leistungseinbußen auf.

Der direkte Betrieb von elektrischen Verbrauchern mit einem Solargenerator ist selten. Bei einer autonomen Photovoltaikanlage ohne Netzanschluss ist ein **Speicher** notwendig, damit Energie unabhängig von der solaren Einstrahlung zur Verfügung steht. Bei der Speicherung wird zwischen der Kurzzeitspeicherung über wenige Stunden oder Tage zum Überbrücken der Nacht oder von Schlechtwetterperioden und der Langzeitspeicherung über mehrere Monate zum Ausgleich von jahreszeitlichen Schwankungen unterschieden.

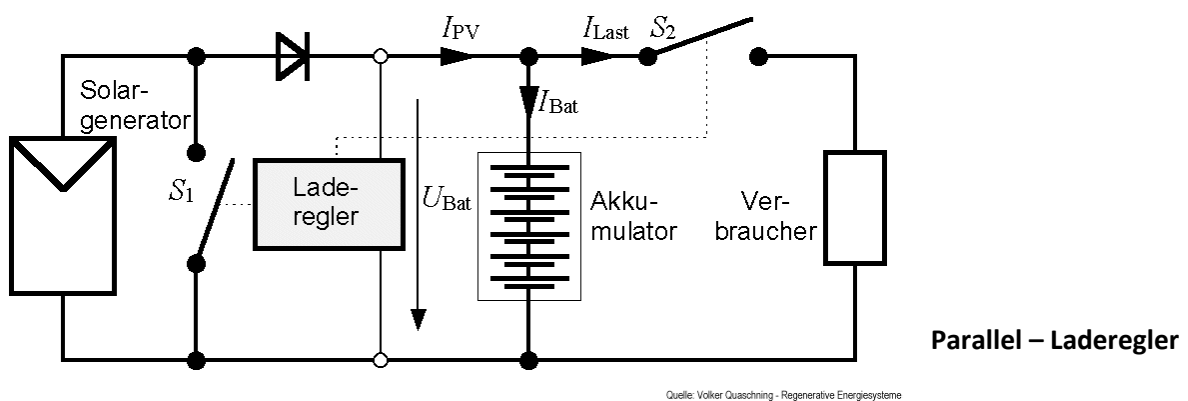
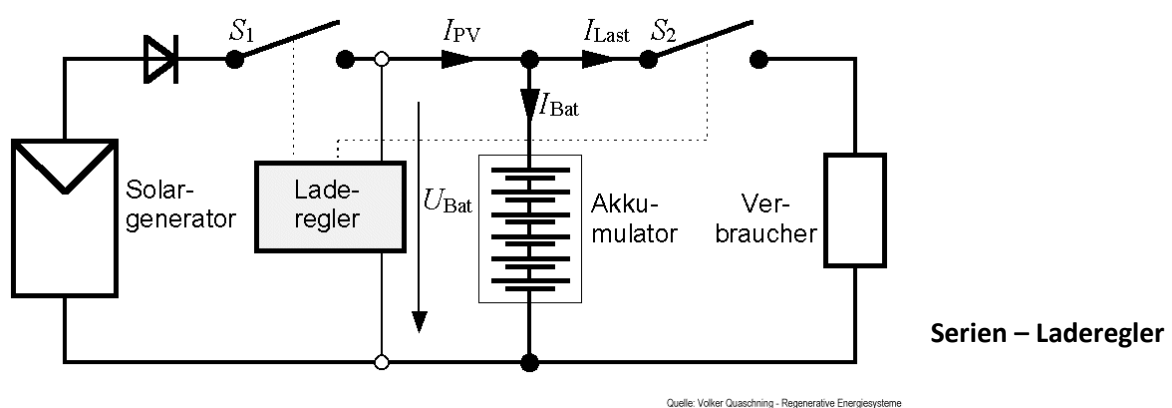


Die Blockingdiode verhindert ein Entladen des Akkumulators über den Solargenerator bei geringer Bestrahlungsstärke. Zur Reduzierung von Verlusten sollten die Zuleitungskabel möglichst kurz und die Leitungsquerschnitte groß gewählt werden. Bei einer direkten Kopplung des Solargenerators mit dem Akkumulator wird in der Regel ein guter Arbeitspunkt auch bei Änderung der Bestrahlungsstärke erreicht.

Das folgende Diagramm zeigt die Arbeitspunkte eines Solargenerators mit Akkumulatorspeicher und Blockingdiode ohne Last bei einem Leitungswiderstand von $0,1 \Omega$.

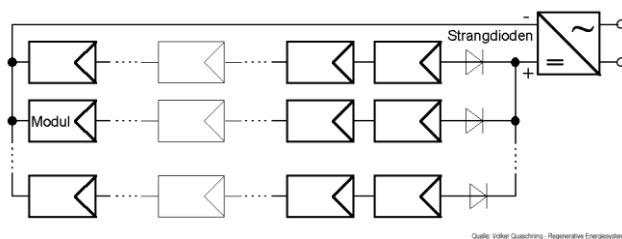


Ein **Laderegler** schützt den Akkumulator gegen Überladung und Tiefentladung. Bei Bleiakkumulatoren funktioniert der Laderegler meist auf der Basis einer Spannungsüberwachung. Es werden Serien – und Parallel – Laderegler unterschieden. Als Schalter werden Leistungshalbleiter verwendet.



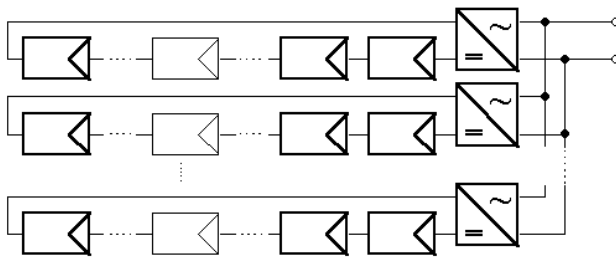
Es besteht die Möglichkeit einen Photovoltaikgenerator mit anderen Energieumwandlungssystemen (z. B. Windenergieanlage) zu kombinieren. Somit können Kosten gespart und die Versorgungssicherheit erhöht werden. Für den **Hybridbetrieb** ist aber ein Energiemanagementsystem notwendig.

Sind bei einer autonomen Anlage Wechselstromverbraucher einzubinden, wird zusätzlich ein **Inselwechselrichter** benötigt. Für den Betrieb einer netzgekoppelten Anlage kommt ein **Netzwechselrichter** zur Anwendung. Hier muss die Spannung mit dem Netz synchronisiert sein. Bei einem **Wechselrichter** muss der Strom periodisch von einem Zweig zum anderen übergeleitet werden. Dieser Vorgang wird als **Kommutieren** bezeichnet. Zur Umschaltung des Stromflusses werden **Halbleiter – Thyristoren** verwendet. Es gibt verschiedene Schaltungsvarianten. Die gesamte Photovoltaikanlage, bestehend aus mehreren Modulsträngen, kann mit einem Großwechselrichter ausgerüstet werden. Bei Teilabschattungen erweist sich diese Schaltungsvariante als negativ. Um die daraus resultierenden Verluste zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, die Stränge zu entkoppeln und Strangwechselrichter zu verwenden. Die optimale Lösung bei Teilabschattungen sind einzelne Modulwechselrichter. Dadurch lässt sich an jedem Modul eine unterschiedliche Spannung einstellen. Als vorteilhaft erweist sich bei der Verwendung von Modulwechselrichtern die einfache Erweiterbarkeit einer bestehenden Photovoltaikanlage.

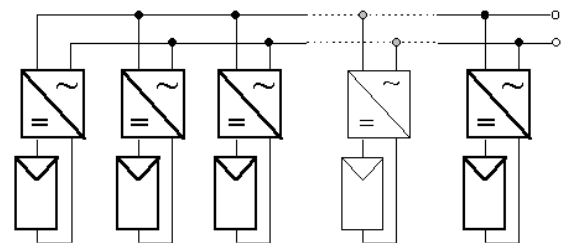


Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Großwechselrichter



Strangwechselrichter



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Modulwechselrichter