

Inhaltsverzeichnis

Darstellungsverzeichnis	1
1. Einleitung.....	2
2. Der photovoltaische Effekt.....	4
3. Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle	7
4. Arten von Solarzellen	8
4.1 Kristallin-Silizium Solarzellen	9
4.1.1. Monokristalline Solarzellen	10
4.1.2 Polykristalline Solarzellen	11
4.2 Dünnschicht-Solarzellen	12
4.2.1 Amorph-Solarzellen.....	12
4.2.2 CIS-, CGIS-Solarzellen	14
4.2.3. CdTe-Solarzellen	15
5. Einflussfaktoren auf den Wirkungsgrad von Solarzellen.....	17
5.1 Standard-Test-Bedingungen	17
5.2 Einflussfaktoren des Wirkungsgrades.....	18
5.2.1 Strahlung des Sonnenlichtes	19
5.2.1.1 Was ist Sonnenstrahlung	19
5.2.1.2 Strahlung und Wellenlänge.....	20
5.2.1.3 Leistung in Bezug auf Strahlung einer Solarzelle.....	23
5.2.2 Energielücke und Absorption des Materials	25
5.2.3 Temperatur	26
5.2.4 Orientierung	27
5.2.5 Fläche der Solarzelle	28
5.2.6 Alterung.....	28
6. Vor- und Nachteile von Kristallin-Silizium Solarzellen gegenüber Dünnschicht-Solarzellen	28
7. Anwendungen	30
7.1. Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen	30
7.2 Netzunabhängige Inselsysteme	31
7.3 Kleinsysteme.....	32
8. Zusammenfassung	33
Literaturverzeichnis	37



Darstellungsverzeichnis

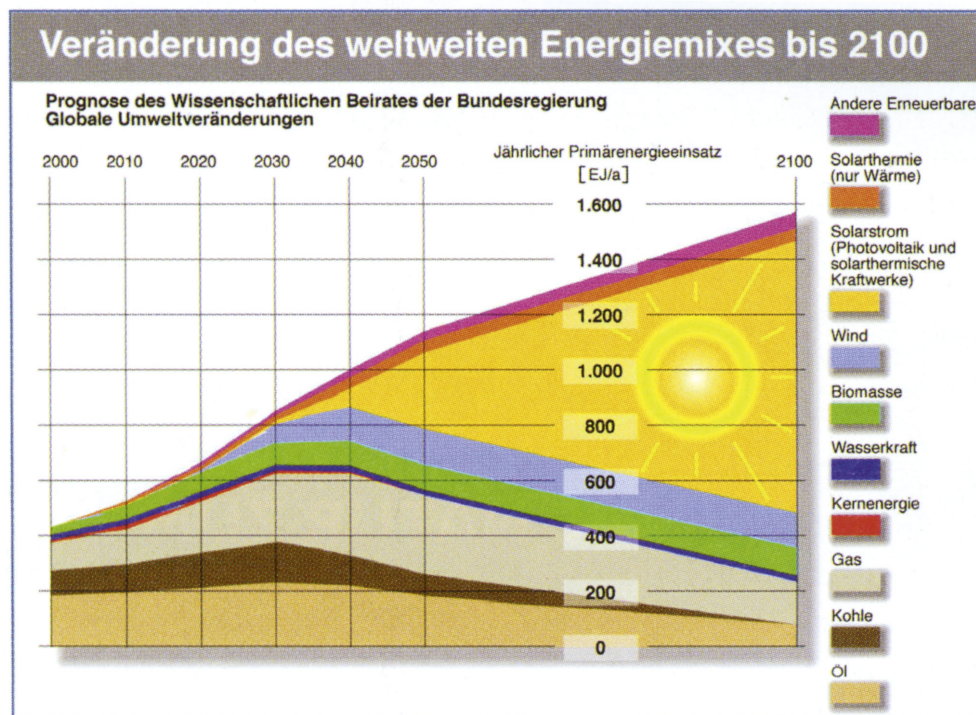
Darstellung 1: Veränderung des weltweiten Energiemixes bis 2100.....	2
Darstellung 2: Atomen und frei laufende Elektronen.....	4
Darstellung 3: n-Schicht und p-Schicht	6
Darstellung 4: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Kristallin-Silizium Solarzelle...7	
Darstellung 5: Arten von Solarzellen.....	9
Darstellung 6: Aufbau einer Kristallin-Silizium Solarzelle	10
Darstellung 7: Monokristallin-Silizium Solarzelle.....	10
Darstellung 8: Polykristallin-Silizium Solarzelle.....	11
Darstellung 9: Amorphe Silizium-Solarzelle.	12
Darstellung 10: Aufbau einer Amorphen Silizium-Solarzelle	13
Darstellung 11: CIS-, CGIS-Solarzelle	14
Darstellung 12: CIS-, CGIS-Solarzelle	15
Darstellung 13: CdTe-Solarzelle	16
Darstellung 14: Höchste Sonnenstände und AM-Werte.....	
für ausgewählte Tage am Standort Berlin	18
Darstellung 15: Globale Strahlung	19
Darstellung 16: Übersicht zur Einschätzung der Einstrahlungsintensität	20
Darstellung 17: Strahlungstyp und Wellenlänge	21
Darstellung 18: Strahlungstyp und Wellenlänge	22
Darstellung 19: Abbildung Spektrale Verteilung des Sonnenlichtes für AM 1,5 22	
Darstellung 20: Verlauf der Solarzellen-Materialien in Abhängigkeit der Wellenlänge und Strahlungsintensität.....	23
Darstellung 21: Leistung einer Solarzelle in Bezug auf die Strahlung.....	24
Darstellung 22: I-U Kennlinie einer Solarzelle bei konstanter Temperatur.....	24
Darstellung 23: Theoretisch mögliche Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Energielücke	25
Darstellung 24: I-U Kennlinie einer Solarzelle bei variabler Temperatur und konstanter Einstrahlung	27
Darstellung 25: Azimutwinkel	27
Darstellung 26: Nach- und Vorteile der Kristallin-Silizium Solarzelle	29
Darstellung 27: Nach- und Vorteile der Dünnschicht-Solarzelle.....	30
Darstellung 28: Prinzip einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage.....	30
Darstellung 29: Integrierte Solarzelle in einem Gebäude.....	31
Darstellung 30: Netzunabhängige Inselsysteme	32
Darstellung 31: Kleinsysteme. Quelle: eigene Ausarbeitung.....	32



1. Einleitung

Unsere Gesellschaft und Industrie lebt in einem permanenten Wandel. Besonders das Thema Umwelt und Energie hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Aufgrund des Treibhauseffektes durch die Emission von Schadstoffen in die Luft und der Steigerung des Energiekonsums weltweit (besonders Länder in Osteuropa und Asien) ist die Suche nach erneuerbaren Energien ein aktuelles Thema geworden.

Die gewonnene Energie aus der Sonne wird in den nächsten Jahren am meisten Bedeutung haben (siehe Darstellung 1).



Darstellung 1: Veränderung des weltweiten Energiemixes bis 2100.

Quelle: Zeitschrift Solarindustrie Mai 2007, S. 74.

Mit dem Ziel, in der Zukunft Marktstudien im Bereich der Sonnenenergie mit Schwergewicht Solarstrom erarbeiten zu können, möchte ich zuerst ein Verständnis über die Photovoltaik-Technik schaffen. Die Photovoltaik-Technik wandelt die Sonnenenergie in elektrischen Strom um.



Neben dem Literaturstudium habe ich auch 5 unterschiedliche Leitfadeninterviews bei Fachleuten aus der photovoltaischen Industrie und Forschung durchgeführt. Diese Interviews bei vier Firmen und einer Universität im Bereich Photovoltaik erlaubten mir ein abgerundetes Bild über die Photovoltaik zu bekommen.

In dieser Bakkalaureatsarbeit werden die wichtigsten industriell gefertigten Solarzellen betrachtet, die am deutschsprachigen Markt angeboten werden. Bei diesen Solarzellen werden sowohl ihre Hauptmerkmale und ihr Aufbau als auch die unterschiedlichen Herstellungsverfahren kurz beschrieben.

Dazu wird auch auf die verschiedenen Wirkungsgrade und die Hauptfaktoren des Wirkungsgrades eingegangen. Anschließend werden die Nach- und Vorteile der Solarzellen und die Anwendungen in der Praxis behandelt.



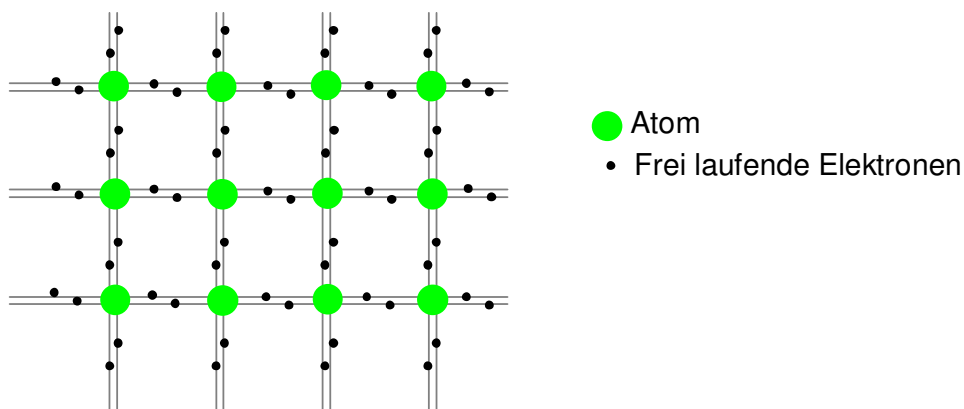
2. Der photovoltaische Effekt

Zwei wichtige Tatsachen sind entscheidend, um zu verstehen, wie eine Solarzelle funktioniert:¹

- das Sonnenlicht besteht aus Photonen
- Photonen können mit Atomen interagieren, d.h. wenn ein Photon genug Energie hat, kann es eine Bindung zwischen Elektronen und einem Atom trennen

Im Folgenden werden anhand einer Monokristallin-Silizium Solarzelle die wichtigen Funktionsprinzipien des photovoltaischen Effekts erklärt.

Damit eine Solarzelle Strom produzieren kann, müssen die Elektronen von ihren Atomen getrennt werden. Diese Trennung setzt die Elektronen in Bewegung.²



Darstellung 2: Atome und frei laufende Elektronen.

Quelle: In Anlehnung an Vignola 2000, S. 1.

Silizium besteht aus einem Atom und vier Valenzelektronen. Jedes Valenzelektron ist mit einem Valenzelektron des Nachbaratoms gebunden.³ Diese Elektronenbindung zu den Nachbaratomen

¹ Vgl. Vignola, F.: Photovoltaic in schools, S. 1.

² Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 13.

³ Vgl. Vignola, F.: Photovoltaic in schools, S. 2.



ist sehr stark und deshalb gibt es keine freien beweglichen Valenzelektronen.

Elektronen binden sich immer in Paaren. Das Sonnenlicht mit genug Energie kann durch die Trennung von Elektronen und Atomen die Entstehung sowohl eines positiven Loches (Bindung ohne Elektron) als auch eines freien negativen Elektrons verursachen. Diese negativen und positiven Ladungen, die sich frei während einer Zeit im Gitter bewegen, sind die Basis der Stromerzeugung.⁴

Damit Silizium leitend wird, müssen ihre Atome mit vier Valenzelektronen, sowohl durch Boratome mit drei Valenzelektronen als auch durch Phosphoratome mit fünf Valenzelektronen substituiert werden. Diesen Prozess nennt man Dotierung.⁵

Wenn das Siliziumatom durch ein Phosphoratom ersetzt wird, binden sich vier von den fünf Valenzelektronen stark mit den näheren Valenzelektronen und das übrige Valenzelektron bewegt sich frei um das Kristallgitter (dieses Valenzelektron wird von dem positiven Phosphoratom angezogen). Silizium mit mehreren Atomen und einem zusätzlichen Valenzelektron wird als n-Silizium (n für negativ) bezeichnet.⁶

Wenn das Siliziumatom durch ein Boratom substituiert wird, binden sich die drei Valenzelektronen stark mit den näheren Siliziumelektronen. Es gibt aber ein Siliziumelektron, das ein dazugehöriges Elektron sucht. Dieses Elektron wird als Loch bezeichnet. Silizium mit mehreren Atomen und einem vermissten Valenzelektron wird als p-Silizium (p für positiv) bezeichnet.⁷

⁴ Vgl. Vignola, F.: Photovoltaic in schools, S. 2.

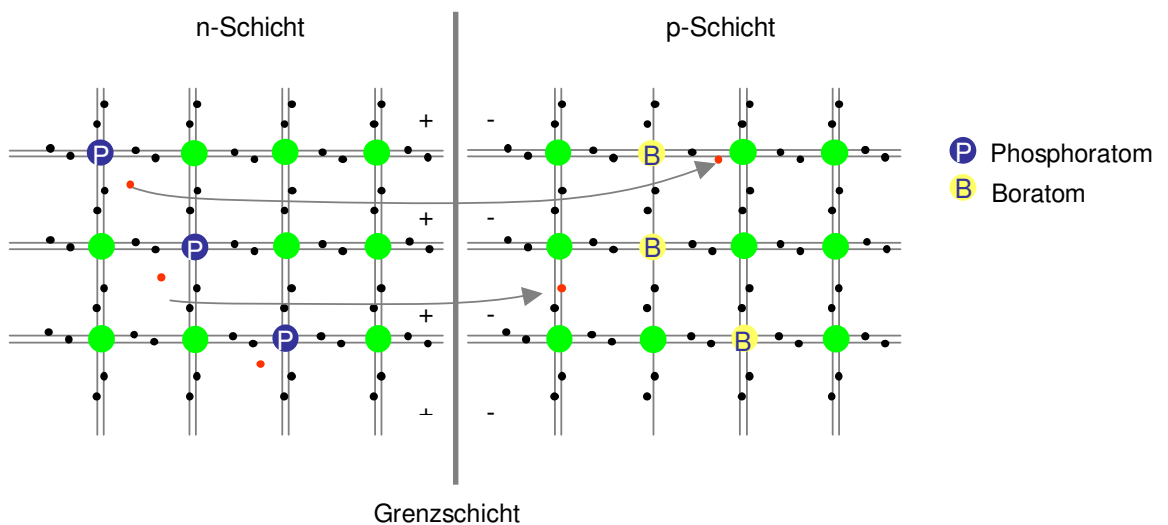
⁵ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 21.

⁶ Vgl. Vignola, F.: Photovoltaic in schools, S. 2.

⁷ Vgl. Vignola, F.: Photovoltaic in schools, S. 2.



Bei einer Kristallin-Silizium Solarzelle werden n- und p-dotiertes Silizium nebeneinander gelegt. Die freien Valenzelektronen von dem Phosphoratom werden von den Löchern der Boratome angezogen, weil die Anziehungskraft zwischen Valenzelektronen und Löcher größer als die Anziehungskraft zwischen Valenzelektronen und Phosphoratomen ist. Löcher der p-Schicht werden mit Valenzelektronen der n-Schicht gefüllt. Rund um das Phosphor- und Boratom gibt es jetzt nur positive Protonen (es gibt keine freie Löcher oder Valenzelektronen mehr).⁸



Darstellung 3: n-Schicht und p-Schicht.

Quelle: In Anlehnung an Vignola 2000, S. 2.

Die Grenzschicht ist nur einige Atome breit und erzeugt ein elektromagnetisches Feld, das einen zusätzlichen Übergang von Löcher und Valenzelektronen vermeidet.⁹

Wenn das Licht auf die Solarzelle fällt, dringen die Photonen des Lichtes in das Siliziummaterial ein und trennen die negativen Valenzelektronen

⁸ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 13.

⁹ Vgl. Vignola, F.: Photovoltaic in schools, S. 3.



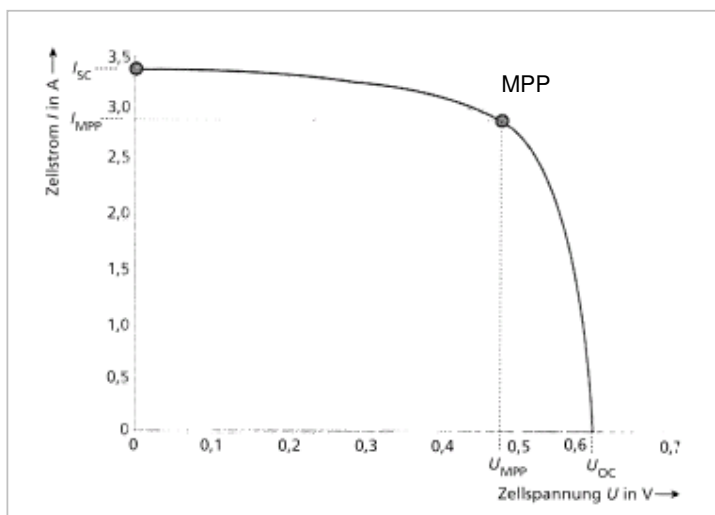
Einflussfaktoren auf Wirkungsgrad der wichtigsten Solarzellen

und die positiven Löcher. Die notwendige minimale Energie, um die Bindung Elektron-Loch zu trennen, wird als Energielücke bezeichnet.¹⁰

Wenn es kein elektrisches Feld bzw. keine Energielücke gäbe, würden die Valenzelektronen und die Löcher rekombinieren, d.h. wieder zusammenkommen.¹¹ Dank diesem elektrischen Feld, gehen die negativen Elektronen bzw. Valenzelektronen in eine Richtung und die positiven Löcher in die andere. So wird der Strom erzeugt.

3. Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle

Die elektrischen Eigenschaften von Solarzellen werden mit Hilfe der Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie) dargestellt.



Darstellung 4: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Kristallin-Silizium Solarzelle.

Quelle: Sandner, Thomas. (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 18.

Die drei wichtigsten Kennwerte einer Solarzelle sind:¹²

- Kurzschlussstrom I_k (auch I_{sc} , SC für Englisch Short Circuit)
- Leerlaufspannung (U_L oder U_{oc} , OC für Englisch Open Circuit)
- Maximum-Power-Point (MPP) mit den zugehörigen Strom- und Spannungswerte (I_{MPP} , U_{MPP})

¹⁰ Vgl. Meissner, D.: Solarzellen, S. 30.

¹¹ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 12.



Der Kurzschlussstrom I_k ist der Strom, den eine Solarzelle beim Kurzschluss und Nullspannung erzeugt.¹³ In der Darstellung 4 hat I_k einen Wert von 3.5 Ampere. Die Leerlaufspannung U_L ist die Spannung, die eine Solarzelle ohne Anschluß eines Verbrauchers liefert.¹⁴ Dabei ist der Strom gleich Null. In der Darstellung 4 hat U_L einen Wert von 0.6 Volt.

Die Spannung U_{MPP} liegt ungefähr 20% (0.48 Volt) unter der Leerlaufspannung U_L . Der Strom I_{MPP} liegt ungefähr 5% (2.9 Ampere) unter des Kurzschlussstroms I_k .

Maximum-Power-Point MPP bezieht sich auf die größte Leistung im Verbraucher, die eine Solarzelle bei einer gegebenen Spannung und Stromstärke erzeugt. Die Leistung MPP ergibt sich aus der Multiplikation von U_{MPP} und I_{MPP} und ihre Einheit ist $\text{Watt}_{\text{peak}}$.¹⁵ In der Darstellung 4 hat MPP einen Wert von ungefähr 1.39 $\text{Watt}_{\text{peak}}$.

4. Arten von Solarzellen

Die Solarzellen können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden. Diese werden sowohl am Markt angeboten als auch im Labor für wissenschaftliche Zwecke verwendet. Die Solarzellen sind in 4 Hauptgruppen aufgegliedert: Kristallin-Silizium Solarzellen, Dünnschichtsolarzellen, Weltraumsolarzellen und organische Solarzellen.¹⁶

Die Kristallin-Silizium Solarzellen gliedern sich in monokristalline und polykristalline Solarzellen. Die Dünnschicht-Solarzellen werden in Amorph- Silizium Solarzellen, CIS-(Kupfer-Indium-Diselenid), GIGS-(Kupfer-Indium-Disulfid) Solarzellen, CdTe (Cadmium-Tellurid) Solarzellen, Farbstoff-Solarzellen und Tandem-Solarzellen aufgeteilt.

¹² Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 32.

¹³ Vgl. Führer, A., Heidemann K., Nerreter, W.: Elektrotechnik, S. 50

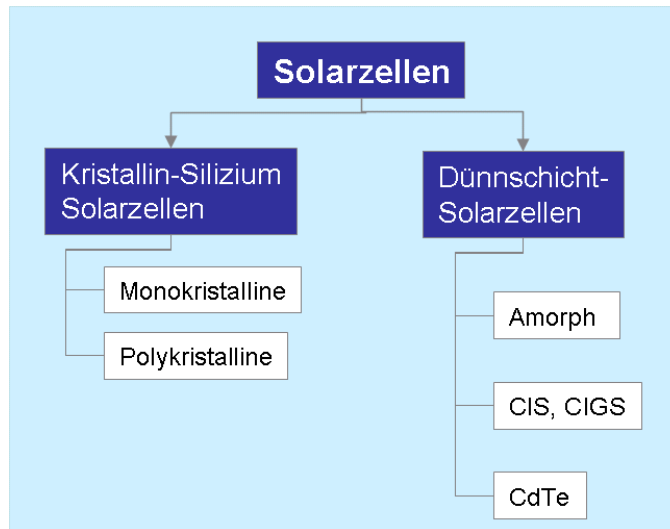
¹⁴ Vgl. Führer, A., Heidemann K., Nerreter, W.: Elektrotechnik, S. 50

¹⁵ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 36.

¹⁶ Vgl. Markvart, T., Castaner, L.: Photovoltaics, S. 1.



In dieser Bakkalaureatsarbeit werden nur die wichtigsten industriell gefertigten Solarzellen betrachtet, die kommerziell am deutschsprachigen Markt angeboten werden (siehe Darstellung 5).



Darstellung 5: Arten von Solarzellen.

Quelle: eigene Ausarbeitung.

4.1 Kristallin-Silizium Solarzellen

Silizium ist das zweithäufigste Material der Erde und ist weder giftig noch hat es die Eigenschaft zu korrodieren. Die meisten kommerziellen Solarzellen werden aus Kristallin-Silizium hergestellt.¹⁷

Kristallines Silizium ist das Basismaterial der Halbleitertechnologie. Das Rohsilizium wird durch die Reduktion von Quarz in Lichtbogenöfen auf einen Reinheitsgrad von 96% gebracht.¹⁸ Dieser Reinheitsgrad wird durch eine Reaktion mit Chlorwasserstoff und anschließender Destillation erreicht. Dieses chemische Verfahren wird als Czochralski-Verfahren¹⁹ bezeichnet. Das dadurch gewonnene Material ist das Ausgangsmaterial für die Herstellung von zwei Arten von kristallinen Solarzellen: monokristalline und polykristalline Solarzellen. Monokristalline Solarzellen weisen eine regelmäßige Kristallstruktur und eine homogene Fläche auf.

¹⁷ Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 23.

¹⁸ Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 25.

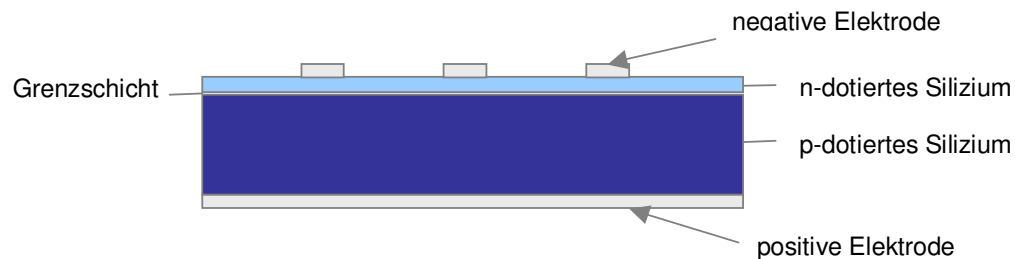
¹⁹ Vgl. Markvart, T., Castaner, L.: Photovoltaics, S. 144.



Bei polykristallinen Solarzellen lässt sich eine unterschiedliche Kristallstruktur erkennen.²⁰ Eine Kristallin-Silizium Solarzelle besteht aus einer p-dotierten und einer n-dotierten Schicht (siehe Darstellung 6). Diese Solarzelle ist zwischen 0.18 und 0.28 mm Breit.²¹ Die n-Schicht ist sehr dünn, damit der energiereiche Anteil des Sonnenlichtes in der Raumladungszone am p-n-Übergang möglichst viel absorbiert wird.

Die Fläche des p-dotierten Siliziums muss genug dick sein, um zwei Hauptziele zu erreichen:

- die eindringenden Sonnenstrahlen absorbieren
- eine mechanische Stabilität gewährleisten



Darstellung 6: Aufbau einer Kristallin-Silizium Solarzelle.

Quelle: eigene Ausarbeitung.

4.1.1. Monokristalline Solarzellen

Monokristalline Solarzellen bestehen aus einer Scheibe eines hochreinen, gezogenen Silizium-Einkristalls und haben eine einheitliche, dunkelblaue bis schwarze Färbung.²² Eine monokristalline Solarzelle hat in der Regel ein Durchmesser von 10 oder 15 cm.



Darstellung 7: Monokristallin-Silizium Solarzelle.

Quelle: <http://www.hupra.com>.

²⁰ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 25-26.

²¹ Vgl. Markvart, T., Castaner, L.: Photovoltaics, S. 139.

²² Muther, K. (2007): Persönliches Interview. Rankweil, 23. März 2007.



Monokristallines Silizium wird entweder durch das Zonenschmelzverfahren des multikristallinen Rohsiliziums im Vakuum, im Schutzgas oder durch das Tiegelziehen hergestellt.²³ Aus der Silizium-Schmelze wird in einem Quarz- oder Kohlenstofftiegel der bereits p-dotierten Einkristall gezogen.

Die monokristallinen Solarzellen weisen einen Wirkungsgrad von 22% im Labor und kommerziell 15% auf.²⁴ Der Wirkungsgrad gibt an wie viel Prozent der empfangenen Solarenergie in elektrische Energie umgewandelt wird (siehe S. 20, Kapitel 5.1).

4.1.2 Polykristalline Solarzellen

Eine günstige Alternative zu monokristallinen Solarzellen sind polykristalline Solarzellen, weil der Prozess zur Herstellung des Einkristalls entfällt. Bei multikristallinen Solarzellen werden gegossene Siliziumblöcke abgekühlt und dabei eine bestimmte Erstarrung erzielt.²⁵ Aus diesen Blöcken werden die dünnen Wafer geschnitten. Bei diesen kann man unterschiedliche Kristallbereiche erkennen.



Darstellung 8: Polykristallin-Silizium Solarzelle.

Quelle: <http://www.hupra.com>.

Polykristalline Solarzellen sind blau gefärbt und heller als die monokristallinen Solarzellen. Der Wirkungsgrad der polykristallinen Solarzellen liegt zwischen 15.8% im Labor und kommerziell bei 14%.²⁶ Wegen der Korngrenzen haben polykristalline Solarzellen einen geringeren Wirkungsgrad als die monokristallinen Solarzellen.

²³ Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 23.

²⁴ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 11.

²⁵ Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 23.



4.2 Dünnschicht-Solarzellen

Dünnschicht-Solarzellen werden nicht aus kristallinen Grundstoffen hergestellt, sondern basieren auf Dünnschichten von photovoltaischen Materialien.²⁷ Diese Solarzellen sind kostengünstiger aus zwei Gründen:

- es ist viel weniger photovoltaisches Material erforderlich
- die Montagekosten sind geringer. Diese Solarzellen sind großflächige Module und nicht individuelle Solarzellen, die übereinander montiert werden sollten wie z.B. dies bei den herkömmlichen Kristallin-Silizium Solarzellen der Fall ist.

Die bekannteste Solarzelle in der Dünnschichttechnologie ist die Amorph-Solarzelle.²⁸ Andere Arten von Solarzellen im Bereich der kommerziellen Dünnschichttechnologie werden mit Cadmium-Tellurit (CdTe) und Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) gefertigt.

4.2.1 Amorph-Solarzellen

Amorphe Solarzellen kann man an ihrer dunkelbraunen Färbung erkennen. Diese Solarzellen bestehen aus einer dünnen amorphen Siliziumschicht, die auf eine Glasscheibe aufgedampft wird. Amorphe Solarzellen weisen keine Kristallstruktur auf; alle Atome sind völlig ungeordnet.²⁹



Darstellung 9: Amorphe Silizium-Solarzelle.

Quelle: <http://www.solarintegration.de>.

²⁶ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 11.

²⁷ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 28.

²⁸ Vgl. Baumgartner, F.: Persönliches Interview, Buchs, 13. April 2007.

²⁹ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 28.

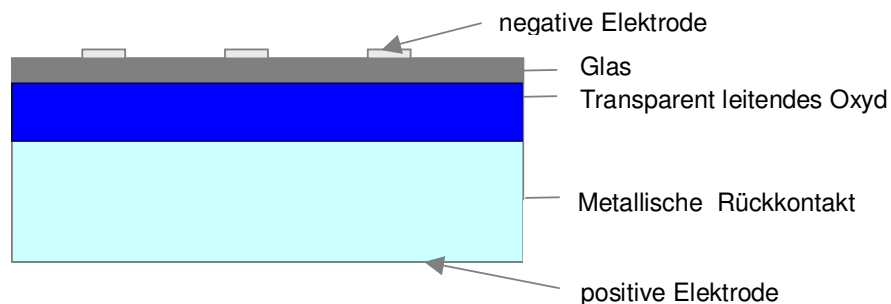


Zur Erreichung des photovoltaischen Effektes sind sehr dünne Siliziumschichten notwendig (ca. 0,01 mm), da ihre Absorptionsfähigkeit sehr groß ist.³⁰ Dadurch sind sie auch günstiger zu produzieren.

Bei amorphem Silizium sind die Siliziumatome komplett ungeordnet.³¹ Das amorphe Silizium hat einen geringeren Reinheitsgrad als kristalline Solarzellen.

Amorphes Silizium wird mit dem PECVD-Verfahren (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) durch Zerlegung von Silan (SiH_4) und Wasserstoff hergestellt.³² Danach werden während der Beschichtung von amorphem Silizium die einzelnen Schichten dotiert. Diese Dotierung erfolgt durch das Zumischen von Gasen. Die Produktion läuft bei Temperaturen von ca. 200 °C, sodass Materialien wie Glas aber auch Metall- und Kunststofffolien eingesetzt werden können.

Der Aufbau ist in sich einfach. Auf einem transparent leitenden Oxyd wird eine amorphe Silizium-Schicht aufgedampft.



Darstellung 10: Aufbau einer Amorphen Silizium-Solarzelle.

Quelle: eigene Ausarbeitung.

Amorph-Solarzellen haben einen Wirkungsgrad im Labor von 11,5% und kommerziell von 7,4%.³³

³⁰ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 28.

³¹ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 21.

³² Vgl. Meissner, D.: Solarzellen, S. 61.

³³ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 11.



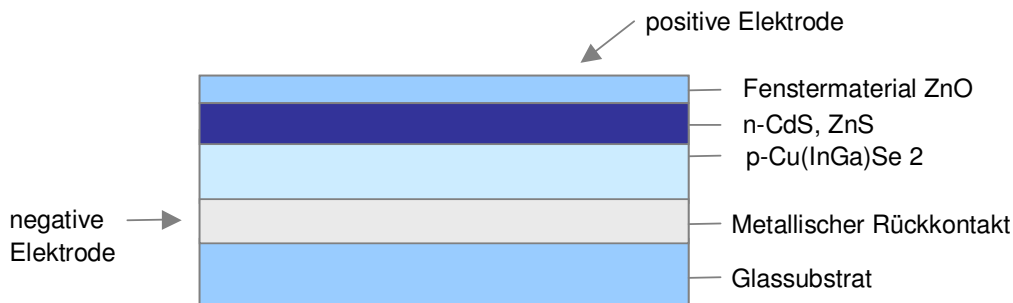
4.2.2 CIS-, CGIS-Solarzellen

CIS steht für Chalkopyrit-Kupfer-Indium-Diselenid und CGIS steht für Chalkopyrit Kupfer-Indium-Disulfid. Diese Solarzellen sind Halbleiter, welche eine sehr hohe Absorption im Bereich des sichtbaren Lichtes haben (siehe Kapitel 5.5.2, S. 24). Aus diesem Grund sind diese Materialien sehr dünn. Ihre Schichtdicken betragen 2 bis 3 μm .³⁴

Für die Herstellung von CIS- und CGIS-Solarzellen wird das Hochvakuum-Simultanverdampf-Verfahren angewendet: auf einer Glasscheibe wird durch das Sputtern eine Schicht aus Molybdän aufgebracht.³⁵ Diese Schicht entspricht dem Rückkontakt und wird durch Laserstrahl in Streifen aufgeteilt. Später wird diese Schicht gereinigt und die Materialien Kupfer, Indium, Gallium und Diselenid werden plaziert.

Es folgt eine zweite Schicht, die mit Zink Oxyd (ZnO) dotiert wird. Danach kommt eine dritte Strukturierungsschicht für den Frontkontakt. Anschließend werden auf beiden Seiten der Solarzelle die Kontakte aufgebaut.³⁶

CIS ist durch Eigendotierung p-leitend und wird mit einem n-leitenden Fenstermaterial aus Zinkoxid (ZnO) zu einer Solarzelle verarbeitet. Als Rückkontakt dient eine dünne Schicht aus Molybdän (siehe Darstellung 11).



Darstellung 11: CIS-, CGIS-Solarzelle.

Quelle: In Anlehnung an Markvart & Castañer, 2003, S. 376.

³⁴ Vgl. Markvart, T., Castaner, L.: Photovoltaics, S. 375.

³⁵ Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 24.

³⁶ Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 25.



Das Fenstermaterial der CIS-Solarzelle besteht aus dem elektrischen leitenden Zink-Oxid (ZnO). Zusätzlich wird eine Schicht aus Cadmium-Selenid (CdS) oder Zink-Selenit (ZnS) eingebaut. Im Bereich des Absorbers (d.h. bei der CIS-, oder CIGS-Schichten) findet die tatsächliche Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie statt. Diese elektrische Energie wird durch den metallischen Rückkontakt weiter transportiert.

CIS-, CIGS-Solarzellen haben einen Wirkungsgrad im Labor von 18,2% und kommerziell von 12,1%.³⁷



Darstellung 12: CIS-, CIGS-Solarzelle.

Quelle: <http://www.solarintegration.de>.

4.2.3. CdTe-Solarzellen

CdTe steht für Cadmium-Tellurit. Diese Solarzelle ist zwischen zwei Glasscheiben hermetisch eingebettet. Cadmium-Tellurit (CdTe) ist ein natürlich p-leitender Halbleiter. Er besitzt eine sehr hohe Absorptionsfähigkeit und deshalb sind diese Schichten wenige Mikrometer dick.³⁸

Für die Herstellung von CdTe-Solarzellen gibt es mehrere Verfahren: Close-Spaced-Sublimation, chemisches Sprühverfahren, Galvanische Abscheidung, Siebdruck, chemische oder physikalische Gasphasenabscheidung und Hochvakuumverdampfung.³⁹ Das Siebdruckverfahren und das chemische

³⁷ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 11.

³⁸ Vgl. Markvart, T., Castaner, L.: Photovoltaics, S. 334.

³⁹ Vgl. Meissner, D.: Solarzellen, S. 121-122.

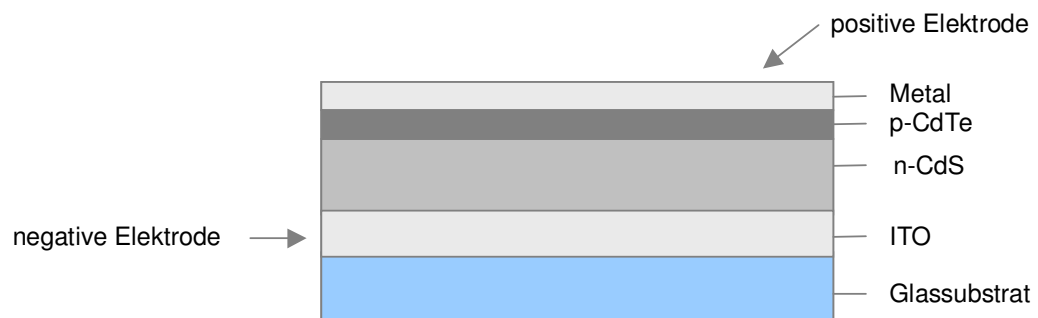


Sprühverfahren sind derzeit kommerziell eingesetzt und werden deshalb hier kurz erläutert.

Beim Siebdruckverfahren werden Aufschlämmungen aus Cd- und Te-Pulver auf ein Substrat gebracht und zu Schichten von 30µm nacheinander aufgedruckt, getrocknet und gesintert. Cd und Te reagieren zu CdTe.⁴⁰ Bei diesem Verfahren werden Temperaturen von über 700°C benötigt. Dies erfordert die Anwendung von teuren Materialien.

Beim chemischen Sprühverfahren werden wasserlösliche Verbindungen auf eine leitende Oxidschicht gesprüht, die auf ein geheiztes Glassubstrat liegt. Diese wasserlöslichen Verbindungen enthalten Cd und Te.⁴¹ Durch die Reaktion auf die Oxidschicht entstehen die CdTe-Verbindungen und demzufolge wächst ein CdTe Film auf.

Die Hauptstruktur einer CdTe-Solarzelle kann in Darstellung 13 gesehen werden.



Darstellung 13: CdTe-Solarzelle.

Quelle: In Anlehnung an Meissner, 1993, S. 123.

Das Metall ganz oben besteht meistens aus Aluminium. Die Cadmium-Tellurite-Schicht ist polykristalliner Natur und p-dotiert. Diese Schicht absorbiert Energie und ist die p-Seite der Grenzschicht. Zur Herstellung des p-n-Übergangs wird die n-leitende Schicht mit Cadmiumsulfid (CdS)

⁴⁰ Vgl. Meissner, D.: Solarzellen, S. 122.



dotiert. Zusätzlich wird auf eine Glasscheibe eine transparente leitende ITO-Schicht gelegt. ITO steht für Indium-Tin-Oxid. Das Glassubstrat schützt die unterschiedlichen Schichten vor Schmutz und anderen Umwelteinwirkungen.

Bei der CdTe-Solarzellen sind im Labor 16 % und in der Praxis ein Wirkungsgrad von 10.9% erreicht worden.⁴²

5. Einflussfaktoren auf den Wirkungsgrad von Solarzellen

5.1 Standard-Test-Bedingungen

Der Wirkungsgrad gibt an wie viel Prozent der empfangenen Solarenergie in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Angaben der Solarzellenproduzenten für den Wirkungsgrad betrachtet man unter der so genannten Standard-Test-Bedingungen (auf englisch Standard-Test-Conditions), kurz STC.⁴³ Diese Bedingungen sind:⁴⁴

- Eingestrahlte Leistung von der Sonne: 1000 Watt/m²
- Spektrale Verteilung des Sonnenlichtes: AM 1,5
- Temperatur an der Zellen-Oberfläche: 25°C

Die Sonne liefert kontinuierlich riesige Mengen von Strahlungen in das Solarsystem. Auf die Erde wird eine Strahlung von 1.367 Watt/m², geliefert.⁴⁵ Diese Strahlung kommt nicht direkt auf die Erdoberfläche, sondern wird durch die Atmosphäre absorbiert und reflektiert. Die Strahlung, die die Erdoberfläche um 12 Uhr bei hellem Himmel erreicht, ist 1000 Watt/m². Diese wird als AM 1,5 (Air Mass) bezeichnet.⁴⁶ AM ist die Wellenlänge des Lichtes beim Eindringen in die Atmosphäre. Wenn die Sonne nach 12 Uhr im Horizont sinkt, sinkt auch die Strahlung, da die Luftdicke grösser wird.⁴⁷

⁴¹ Vgl. Meissner, D.: Solarzellen, S. 121.

⁴² Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 11.

⁴³ Vgl. Muther, K.: Persönliches Interview. Rankweil, 23. März 2007.

⁴⁴ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 36.

⁴⁵ Vgl. Markwart, T., Castaner, L.: Photovoltaics, S. 10.

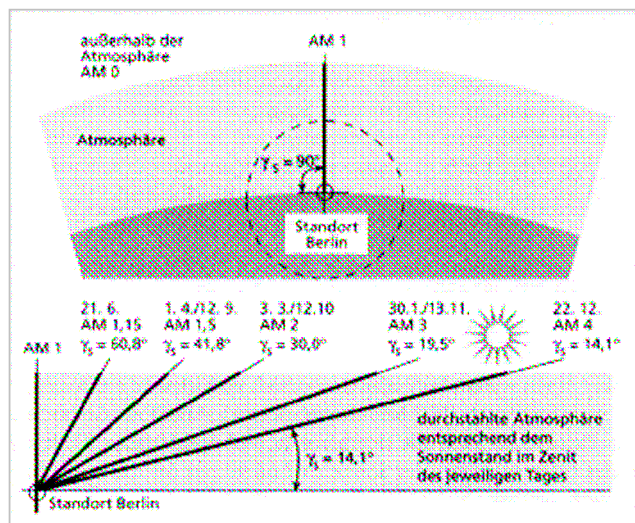
⁴⁶ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 38.

⁴⁷ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 38.



Einflussfaktoren auf Wirkungsgrad der wichtigsten Solarzellen

Das Spektrum des Sonnenlichtes hat einen standardisierten Wert von AM 1,5, der in unseren Breitengraden in der Mittagszeit im Monat Juni erreicht wird. Je kleiner der Wert AM ist, desto senkrechter steht die Sonne. Bei senkrechten Sonneneinstrahlung ist die eingestrahelte Sonnenenergie auf die Erdoberfläche am größten (siehe an der Darstellung 14 die AM-Werte am Standort Berlin).



Darstellung 14: Höchste Sonnenstände und AM-Werte.
für ausgewählte Tage am Standort Berlin.

Quelle: Sandner, Thomas. (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 38.

5.2 Einflussfaktoren des Wirkungsgrades

Der Wirkungsgrad einer Solaranlage hängt nicht ausschließlich von dem Wirkungsgrad der Solarzellen, sondern auch von den unterschiedlichen Komponenten einer Solaranlage selbst.⁴⁸ In dieser Bakkalaureatsarbeit werden nur die Einflussfaktoren betrachtet, die einen direkten Zusammenhang mit den Solarzellen haben.

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle wird durch die folgenden Faktoren beeinflusst: Strahlung des Sonnenlichtes, Energielücke und Absorption des Materials, Temperatur, Fläche der Solarzelle, Orientierung der Solarzellen und Veralterung.

⁴⁸ Vgl. Rinderer, A. (2007): Persönliches Interview. Feldkirch, 7. Mai 2007.



5.2.1 Strahlung des Sonnenlichtes

5.2.1.1 Was ist Sonnenstrahlung

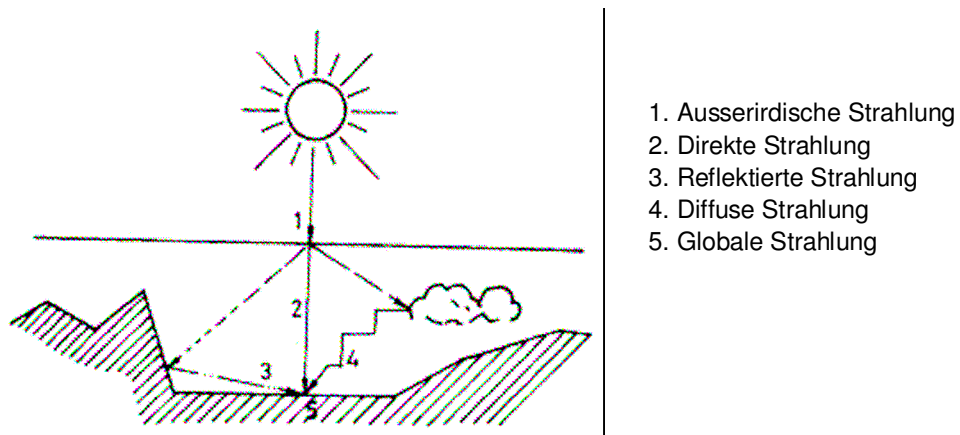
Die Sonnenstrahlung auf die Erde wird auf 2 verschiedene Weisen gemessen:⁴⁹

- Die Anzahl der Sonnenstunden pro Tag, Monat oder Jahr
- Die globale Strahlung

Eine Sonnenstunde ist gegeben, wenn die Sonnenstrahlung größer als 200 W/m^2 ist. Die Anzahl Sonnenstunden auf die Erde variiert von Region zu Region.⁵⁰

Um eine Solaranlage zu planen, ist die Anzahl vorgegebenen Solarstunden unzureichend. Der Grund dafür liegt darin, dass die Sonnen- und Globalstrahlung unterschiedliche Werte haben. Die globale Strahlung besteht aus vier unterschiedlichen Strahlungen: Ausserirdische Strahlung, direkte Strahlung, reflektierte Strahlung und diffuse Strahlung.⁵¹

Die Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche besteht aus direkter und diffuser Strahlung. Die diffuse Strahlung besteht ihrerseits aus Himmelstrahlung und reflektierten Strahlung (siehe unten Darstellung 15).



Darstellung 15: Globale Strahlung.

Quelle: Bansal, N.K. (2003): Photovoltaic systems. New Dehli, S. 6.

⁴⁹ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 6.

⁵⁰ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 6.

⁵¹ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 6.



Solarzellen empfangen sowohl direkte Strahlung als auch diffuse Strahlung, um diese in elektrische Energie umzuwandeln. Diese elektrische Energie ist proportional zu der Intensität der globalen Strahlung. Darstellung 16 zeigt eine Einschätzung der Einstrahlungsintensität in Raum Berlin.

Wetterbedingungen	Geschätzte Einstrahlungsintensität
Dämmerung (z.B. Strassenbeleuchtung wird eingeschaltet)	30 W/m ²
Trüber Novembertag	60 W/m ²
Hohe Bewölkung in April	150 W/m ²
Freier Himmel im Winter über die Mittagszeit	600 W/m ²
Freier Himmel im Sommer über die Mittagszeit	1000 W/m ²

Darstellung 16: Übersicht zur Einschätzung der Einstrahlungsintensität.

Quelle: Sandner, Thomas. (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 37.

Wissenschaftler haben den Wert von AM1.5 G (G für Global) als standardisierte spektrale Verteilung der Sonne definiert. Dies entspricht eine Strahlungsintensität von 1000 W/m² (Standard-Test-Bedingungen).

5.2.1.2 Strahlung und Wellenlänge

Die Sonnenstrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung. Die elektromagnetische Strahlung umfasst verschiedene Wellenlängen.

Bei den Wellenlängen unterscheidet man zwischen kurzwelligen und langwelligen Wellenlänge (siehe Darstellung 17). Die kurzwellige Wellenlänge enthält sowohl unsichtbare (ultraviolett) als auch sichtbare Bereiche. Die langwellige Wellenlänge enthält nur unsichtbare Bereiche (Infrarot). Im sichtbaren Bereich entsprechen den Wellenlängen unterschiedliche Farben, von violett bis rot.



Strahlungsmessungen			
Länge	Strahlungstyp	Wellenlänge	Merkmal
Kurz-wellig	Ultraviolett C	200 - 280 nm	<ul style="list-style-type: none"> • Abgestrahlt von der Sonne • Wird durch die Erdatmosphäre absorbiert • Erreicht nicht die Erdoberfläche
	Ultraviolett B	280 - 315 nm	<ul style="list-style-type: none"> • Abgestrahlt von der Sonne • Wird durch die Erdatmosphäre nur teilweise absorbiert • Verursacht Sonnenbrand auf der menschlichen Haut
Lang-wellig (Infrarot)	Ultraviolett A	315 - 380 nm	<ul style="list-style-type: none"> • Abgestrahlt von der Sonne • biologisch nicht sehr aktiv
	Sichtbar	380 – 780 nm	<ul style="list-style-type: none"> • sichtbares Licht von violett bis rot

Darstellung 17: Strahlungstyp und Wellenlänge.

Quelle: http://www.rg-messtechnik.de/auszug_solarstrahlung.pdf.

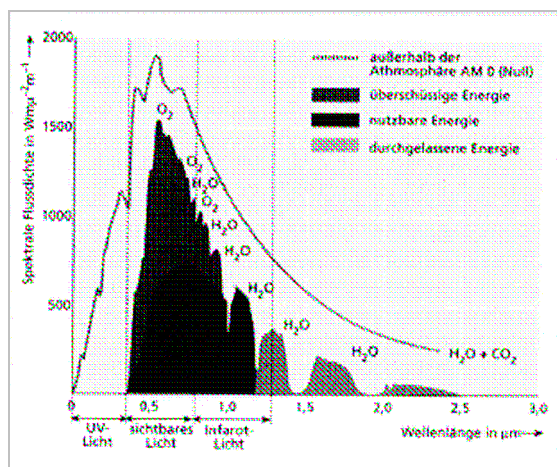


Strahlungsmessungen			
Länge	Strahlungstyp	Wellenlänge	Merkmal
Langwellig (Infrarot)	NIR (Near Infrared)	780 – 3000 nm	• Wärmestrahlung
	FIR	3000 – 50000 nm	• Wärmestrahlung abgestrahlt von der Erde

Darstellung 18: Strahlungstyp und Wellenlänge.

Quelle: http://www.rg-messtechnik.de/auszug_solarstrahlung.pdf.

Die Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Wellenlänge wird als Sonnenlichtspektrum bezeichnet.⁵² Sowohl der sichtbare Bereich der Energie als auch ein Teil der Infrarot-Energie werden von den Solarzellen erfasst und in elektrische Energie umgewandelt. Diese beiden Bereiche des Sonnenlichtspektrums entsprechen den Wellenlängenwerten von 300 bis 1200 nm. Jede Solarzelle ist für ein Bereich des Sonnenlichtspektrums empfindlich und trägt demzufolge zum photovoltaischen Effekt bei (siehe Darstellung 19).



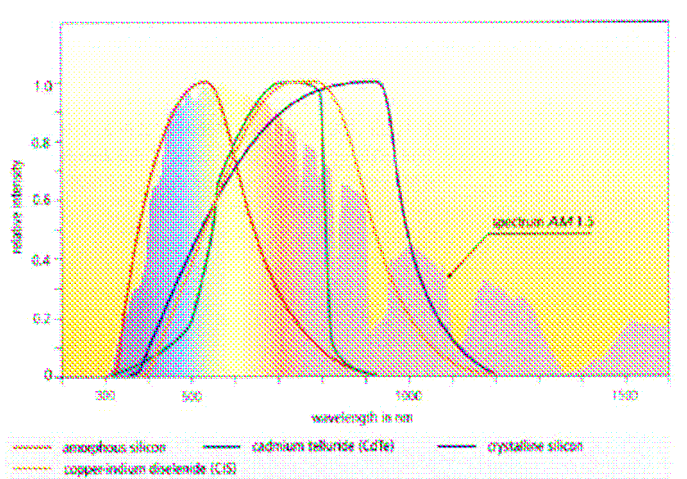
Darstellung 19: Abbildung Spektrale Verteilung des Sonnenlichtes für AM 1,5.

Quelle: Sandner, Thomas. (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 39.



Einflussfaktoren auf Wirkungsgrad der wichtigsten Solarzellen

In Darstellung 20 ist der unterschiedliche Absorptionsverlauf von Solarzellen-Materialien in Abhängigkeit der relativen Strahlungsintensität und der Wellenlängen ersichtlich. Die relative Strahlungsintensität wird in Prozent gemessen. 100% (in der unteren Darstellung 1.0) ist gegeben, wenn die STC-Bedingungen vollkommen erfüllt sind.⁵³ CIS- und Kristallin-Silizium Solarzellen können Energie in einem grösseren Bereich des Sonnenlichtspektrums aufnehmen, als dies amorph Silizium oder CdTe-Solarzellen können. Diese Werte gelten für eine spektrale Verteilung der Sonne von 1,5 AM.



Darstellung 20: Verlauf der Solarzellen-Materialien in Abhängigkeit der Wellenlänge und Strahlungsintensität. Quelle: GE Global Research Centre.

5.2.1.3 Leistung in Bezug auf Strahlung einer Solarzelle

Im Kapitel 3 wurden die wichtigsten Kennwerte einer Solarzelle und die Strom-Spannung-Kennlinie dargestellt. Diese 3 Kennwerte waren:

- Kurzschlussstrom I_k (auch I_{sc} , SC für Englisch Short Circuit)
- Leerlaufspannung U_L (auch U_{oc} , OC für Englisch Open Circuit)
- Maximum-Power-Point (MPP) mit den dazugehörigen Strom- und Spannungswerte (I_{MPP} , U_{MPP})

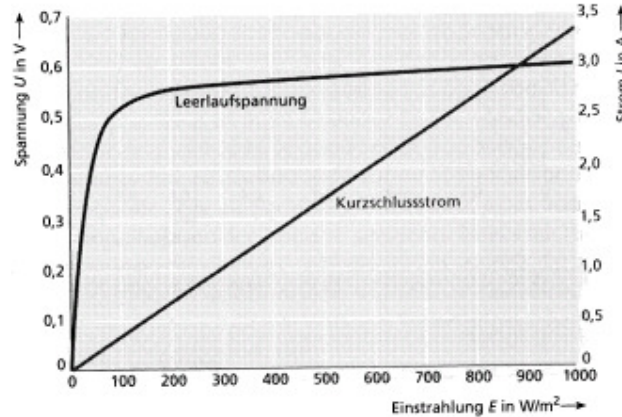
Der Kurzschlussstrom I_k (siehe Darstellung 21) ist linear proportional zur Strahlung. Der Leerlaufspannung U_L hingegen erreicht bei geringer

⁵² Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 7.

⁵³ Vgl. Huld, T.: Assessment of solar energy systems, S. 5.

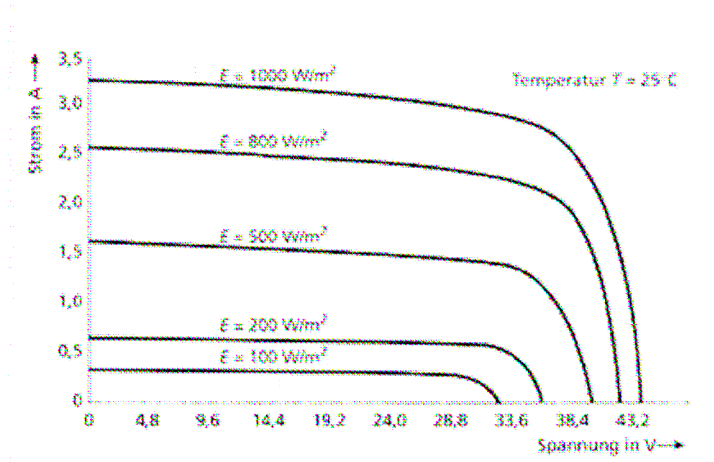


Strahlung schon fast den maximalen Wert und bleibt danach annähernd konstant.



Darstellung 21: Leistung einer Solarzelle in Bezug auf die Strahlung. Quelle: Sandner, Thomas (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 34.

Eine andere Art und Weise, die Wirkung der Strahlung auf den Wirkungsgrad zu veranschaulichen, ist durch die I-U-Kennlinie (Strom-Spannungs-Kennlinie) eines typischen Photovoltaikmoduls mit der spektralen Verteilung des Sonnenlichtes von AM 1.5 und eine Zelltemperatur von 25°C (siehe Darstellung 22).



Darstellung 22: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle bei konstanter Temperatur.

Quelle: Sandner, Thomas. (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 41.

Bei steigender Strahlung, steigt auch der Kurzschlussstrom annähernd proportional, während die Leerlaufspannung eher konstant bleibt.



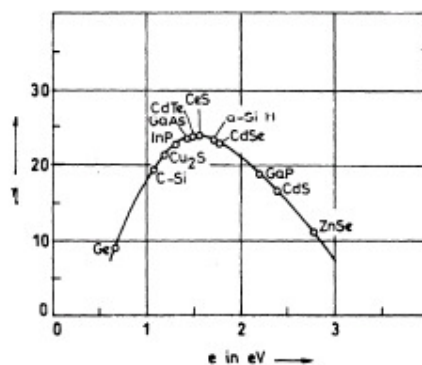
5.2.2 Energielücke und Absorption des Materials

Wenn das Licht auf die Solarzelle fällt, dringen die Photonen des Lichtes in das Silizium-Material ein und trennen die negativen Valenzelektronen und die positiven Löcher. Die notwendige minimale Energie, um die Bindung Elektron-Loch zu trennen, wird als Energielücke bezeichnet.

Die Solarzellen aus unterschiedlichen Materialien haben auch eine unterschiedliche Energielücke und Absorptionsfähigkeit. Die Energielücke im Infrarot-Bereich und in den langwelligen Wellenlängen ist zu niedrig, um Strom durch den photovoltaischen Effekt erzeugen zu können, weil das Licht unvollständig absorbiert wird.⁵⁴

Im Bereich der kurzwelligen Wellenlängen könnte man sich die Erzeugung von Strom vorstellen. Viel dieser Energie ist aber leider nicht brauchbar, weil diese als Wärme verloren geht.

Darstellung 23 zeigt, dass die größten Wirkungsgrade in einem Energielückenbereich von 1 bis 2 eV bestehen. In diesem Bereich weisen die kommerziell eingesetzten CdTe-Solarzellen die größten Wirkungsgrade auf (24%). Kristallin-Silizium Solarzellen haben in dem erwähnten Energielückenbereich 20% Wirkungsgrad und die amorphen Solarzellen 24%.



Darstellung 23: Theoretisch mögliche Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Energielücke.

Quelle: Bansal, N.K. (2003): Photovoltaic Systems. Neue Dehli, S. 20.

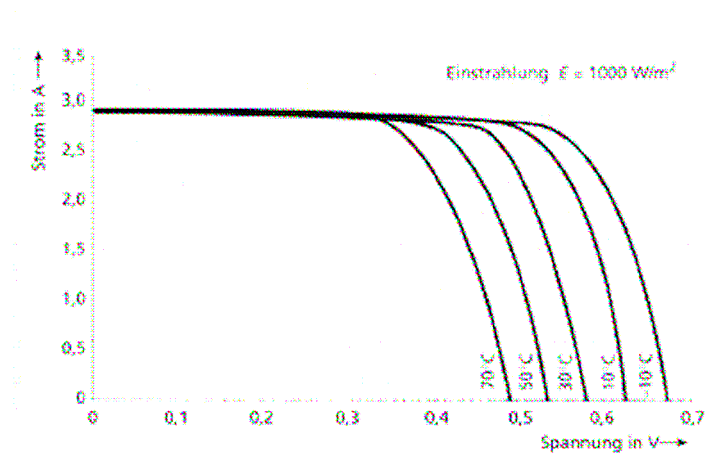
⁵⁴ Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 25.



5.2.3 Temperatur

Wenn das Licht auf die Solarzelle fällt, dringen die Photonen des Lichtes in das Siliziummaterial ein und trennen die negativen Valenzelektronen und die positiven Löcher. Werden die Solarzellen aufgrund der Temperatur wärmer, so sinkt der Wirkungsgrad.⁵⁵ Der Grund liegt darin, dass die Elektronen und Atome schneller vibrieren und demzufolge sinkt die Effektivität der Trennung von negativen Valenzelektronen und positiven Löchern.⁵⁶

Der Wirkungsgrad einer Kristallin-Silizium Solarzelle sinkt um 0.06% pro Anstieg der Temperatur der Solarzelle um 1 °C. Eine Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 16% bei einer Temperatur von 25 °C wird ein Wirkungsgrad von 14% bei einer Temperatur von 60 °C erreichen.⁵⁷ Es wurde im Kapitel 3 erwähnt, dass die maximale Leistung (Maximum-Power-Point MPP) sich aus der Multiplikation von U_{MPP} und I_{MPP} ergibt. Sinkt die Leerlaufspannung bei konstanter Sonneneinstrahlung, dann sinkt auch die Leistung. Eine steigende Temperatur bewirkt eine niedrigere Spannung (siehe Darstellung 24) und dementsprechend eine niedrige Leistung. Wenn die Leistung der Solarzelle sinkt, sinkt auch den Wirkungsgrad.



Darstellung 24: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle bei variabler Temperatur und konstanter Einstrahlung. Quelle: Sandner, Thomas. (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 41.

⁵⁵ Vgl. Jungwirth, F. : Persönliches Interview. Hörbranz, 4. Mai 2007.

⁵⁶ Vgl. Vignola, F.: Photovoltaic in schools, S. 4.

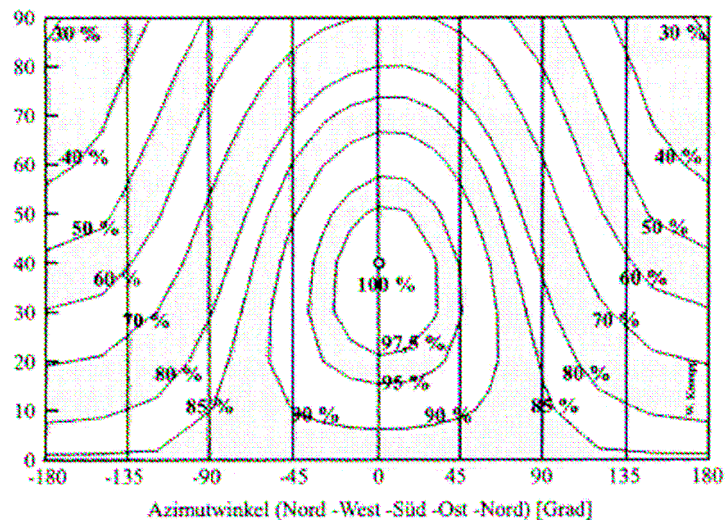
⁵⁷ Vgl. Sandner, T.: Photovoltaikanlagen, S. 42.



5.2.4 Orientierung

Die Orientierung der Solarzelle bedeutet, wie diese zur Sonne ausgerichtet ist. Die Orientierung der Solarzelle spielt auch eine wichtige Rolle beim Wirkungsgrad. Je besser eine Solarzelle zur Sonne ausgerichtet werden kann, desto höher ist der Stromertrag. Eine optimale Energieausbeute erreicht man durch eine optimale Neigung und optimale Ausrichtung der Solarzelle zur Bahn der Sonne.

Wichtig bei der Orientierung der Solarzelle sind die Azimut- und Neigungswinkel. Der Azimutwinkel gibt an, wie viel Grad die Fläche der Solarzelle von der Südausrichtung abweichen sollte. Der Neigungswinkel bezieht sich auf die Abweichung von der Horizontalen (siehe Darstellung 25).



Darstellung 25: Azimutwinkel.

Quelle: Knaupp, W, Staiss, F, (2000): Photovoltaik. Ein Leitfaden für Anwender. 4., überarbeitete Auflage. Rheinland/Berlin-; Brandenburg: Berlin, S. 64.

Das Optimum an Energieertrag erreicht man, wenn man eine Solarzelle nach Süden mit einem Neigungswinkel von 30° bis 40° orientiert (gemäß Darstellung 25). Eine Abweichung um 45° aus der Südrichtung vermindert den Ertrag lediglich um 5 bis 10%. Eine Fassade mit einem Neigungswinkel von 90° kann noch bis zu 70% Ertrag bringen. Je flacher die Solarzelle ist, desto mehr kann die Ausrichtung von Süden entfernt sein.



5.2.5 Fläche der Solarzelle

Die Größe der Fläche einer Solarzelle hat auch einen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Das Verhältnis Größe der Solarzelle zum Wirkungsgrad ist linear; d.h. eine Solarzelle vom 1 m^2 hat einen Kurzschlussstrom (z.B. 2 A), der doppelt so groß im Vergleich zu einer Solarzelle von 0.5 m^2 ist (1 A).⁵⁸

Die Leerlaufspannung hingegen ist nicht abhängig von der Größe der Fläche der Solarzelle. Die größten Solarzellen haben eine Fläche von ca. 1 m^2 mit einem Kurzschlussstrom von 3A bei einer Temperatur von $25\text{ }^\circ\text{C}$. Dies bedeutet eine Leistung von $1.5\text{ Watt}_{\text{peak}}$.

5.2.6 Alterung

Die Alterung einer Solarzelle hat eine Wirkung auf den Wirkungsgrad und demzufolge auf die Leistung. Bei monokristallinen und polykristallinen Solarzellen ist dieses Problem eher gering. Also Solarzellen, die richtig verkapselt sind, haben eine lange Lebensdauer und ihre Wirkungsgrad sinkt ganz wenig. Alterung hat eine große Wirkung bei den amorphen Solarzellen.⁵⁹ Man muss hier auch betonen, dass gemäß den letzten wissenschaftlichen Erkenntnissen der Wirkungsgrad einer amorphen Solarzelle nach 2 Monaten sinkt und dann für den Rest des Lebens bleibt konstant.⁶⁰

6. Vor- und Nachteile von Kristallin-Silizium Solarzellen gegenüber Dünnschicht-Solarzellen

In diesem Kapitel sieht man die Vor- und Nachteile von Kristallin-Silizium und Dünnschicht-Solarzellen (siehe Darstellungen 26 und 27). Diese Vor- und Nachteile beziehen sich auf die wesentlichen Aspekte, die aus dem Literaturstudium und den Interviews bekannt sind.

⁵⁸ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 16.

⁵⁹ Vgl. Bansal, N.K.: Photovoltaic, S. 16.

⁶⁰ Vgl. Baumgartner, F.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Buchs (CH), 13. April 2007.



Kristallin-Silizium Solarzelle	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrung von mehr als 30 Jahren mit diesen Solarzellen • Höhere Wirkungsgrade im Vergleich zu Dünnschicht-Solarzellen • Lange Garantie der Hersteller bezüglich der Leistung (25 Jahre) • Lange Lebensdauer (25-30 Jahre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Teuer in der Herstellung; v.a. die Monokristallin-Solarzellen • Probleme bei der Abschattung: Leistung sinkt so tief wie das schwächste Glied des Solarmoduls⁶¹

Darstellung 26: Nach- und Vorteile der Kristallin-Silizium Solarzelle.

Quelle: eigene Ausarbeitung.

Dünnschicht-Solarzelle	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Viel günstiger zu produzieren als herkömmliche Kristallin-Silizium Solarzellen • Eine Abschattung der Solarzelle wirkt nicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedriger Wirkungsgrad im Vergleich zu Kristallin-Silizium Solarzellen • Nach 2 Monaten sinkt die Leistung (z.B. bei amorphen Solarzellen)

⁶¹ Muther, K.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Rankweil, 23. März 2007.



<p>so stark negativ in der Leistung wie bei Kristallin-Silizium Solarzellen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfache Technologie, Materialersparnis • Viel Entwicklung wird in diese Solarzelle investiert und dadurch werden die Wirkungsgrade erhöht. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kurze Lebensdauer (<20 Jahre)
--	--

Darstellung 27: Nach- und Vorteile der Dünnschicht-Solarzelle.

Quelle: eigene Ausarbeitung.

7. Anwendungen

In der Anwendung von Solarzellen unterscheidet man zwischen Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlage, Netzunabhängige Inselsysteme und Kleinsysteme.⁶²

Bei den netzunabhängigen Inselsystemen und den Kleinsystemen erzeugen die Solarzellen Strom für das System selbst. Dieser Strom wird meistens in einem Speicher gespeichert.⁶³

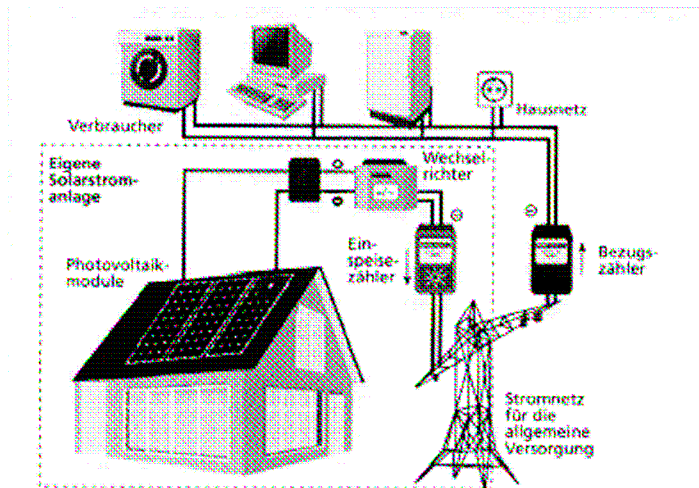
Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen können den Strom ins öffentliche Netz einspeisen. Meist werden diese Systeme in ein Gebäude integriert.

7.1. Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen

Diese Anlagen arbeiten als „kleine Kraftwerke“ innerhalb des Netzes für die allgemeine Versorgung. Wenn Strom in das Netz eingespeist wird, wird dieser je nach Förderungsprogrammen in den jeweiligen Ländern vergütet. Darstellung 28 zeigt eine Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. Diese photovoltaische Solaranlage besteht aus unterschiedlichen Komponenten. Die Hauptkomponenten sind: Solarmodule, Wechselrichter und Einspeisezähler.

⁶² Vgl. Knaupp, W., Staiß, F.: Photovoltaik, S. 9.

⁶³ Hutter, R.: Persönliches Interview. Hörbranz, 20. April 2007.



Darstellung 28: Prinzip einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage.

Quelle: Sandner, Thomas. (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlage. München; Heidelberg: Berlin, S. 56.

Die Solarzellen, die am meisten für den netzgekoppelten Anlagen verwendet werden sind monokristalline und polykristalline Silizium-Solarzellen. Immer häufiger werden auch Dünnschicht solarzellen auf Glasfassaden verwendet, da diese auf Glas platziert sowohl für Stromerzeugung als auch als Sonnenschutz verwendet werden.



Darstellung 29: Integrierte Solarzelle in einem Gebäude.

Quelle: <http://www.energieschweiz.ch>.

7.2 Netzunabhängige Inselsysteme

Netzunabhängige Inselsysteme werden dort implementiert, wo ein Strombedarf vorhanden ist aber leider keine Stromversorgung. Bei diesen netzunabhängigen Inselsystemen sind zahlreiche Beispiele vorhanden und immer wieder werden neue Anwendungen gefunden. Sowohl Kristallin-Silizium Solarzellen als auch Dünnschicht solarzellen werden verwendet.




Beispiele von Anwendungen	Arten von Solarzellen	Beispiele: visuelle Darstellung
<ul style="list-style-type: none"> • Parkuhren • Telefonkabinen • Straßenbeleuchtung • Informationstafeln • Verkehr-Signalanlagen 	Kristallin-Silizium Solarzellen, CIS- und CdTe- Solarzellen	
<ul style="list-style-type: none"> • Kommunikationsanlagen, • Camping-Geräte • Wasserpumpen • Solarventilatoren • Solarkühlschränke • Solarwagen und Solarboote 	Kristallin-Silizium Solarzellen, CIS- und CdTe- Solarzellen.	

Darstellung 30: Netzunabhängige Inselsysteme.

Quelle: eigene Ausarbeitung.

7.3 Kleinsysteme

Hier kommen eine Vielzahl elektrischer Geräte zur Anwendung, wie Uhren, Taschenrechner, etc. Üblicherweise werden kleine Energiespeicher verwendet, um Dunkelzeiten zu überbrücken.

Beispiele von Anwendungen	Arten von Solarzellen	Beispiele: visuelle Darstellung
<ul style="list-style-type: none"> • Uhren, Taschenrechner • Waagen, Radios • Kameras 	Vorwiegend Solarzellen aus amorphem Silizium	

Darstellung 31: Kleinsysteme. Quelle: eigene Ausarbeitung.



8. Zusammenfassung

Ziel dieser Bakkleuratsarbeit ist, einen Überblick über die wichtigsten industriell gefertigten Solarzellen zu geben, die am Österreichischen Markt angeboten werden. Dieser Überblick umfasst den Aufbau der Solarzellen, die Einflussfaktoren auf den Wirkungsgrad der Solarzellen und die Anwendungen von Solarzellen in der Praxis.

Die wichtigsten Solarzellen überhaupt sind die Kristallin-Silizium Solarzellen. Diese haben im deutschsprachigen Markt für netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen und netzunabhängige Inselsysteme einen Marktanteil von 80 bis 90%.⁶⁴ Man hat mit diesen Solarzellen mehrjährige Erfahrungswerte und deshalb sind sie auch auf dem Österreichischen Markt etabliert. Der Grund liegt darin, dass die Hersteller und Händler von Photovoltaik-Systemen die Wirkungsgrade über Jahre hinweg (bis zu 25 Jahre) gewährleisten können. Nach 12 Jahren werden 90% der Leistung und nach 25 Jahren 80% der Leistung garantiert.⁶⁵

Die Herstellung von Kristallin-Silizium Solarzellen ist aber aufwendig und der Preis ist aufgrund der steigenden Nachfrage nicht im erwarteten Ausmass gesunken.

Dünnschicht solarzellen waren in der Vergangenheit bei Händlern und Installateuren von netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen und Netzunabhängigen Inselsystemen nicht sehr beliebt, da die Verluste von Wirkungsgraden erheblich waren.⁶⁶ In den letzten zehn Jahren hat sich aber Vieles geändert.

⁶⁴ Baumgartner, F.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Buchs (CH), 13. April 2007.

⁶⁵ Muther, K.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Rankweil, 23. März 2007.

⁶⁶ Muther, K.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Rankweil, 23. März 2007.



Bei der Weiterentwicklung der Dünnschichtsolarzellen hat sich der Wirkungsgrad stabilisiert. Heutzutage weiss man, dass diese Solarzellen innerhalb der ersten zwei Monate einen Verlust des Wirkungsgrades erfahren, dieser aber dann über 10 Jahre (z.B. amorphes Silizium) konstant bleibt. Da diese Dünnschichtsolarzellen in der Herstellung wesentlich günstiger (die Hälfte im Vergleich zu Kristallin-Silizium Solarzellen) und zuverlässiger geworden sind, wird in den nächsten 10 Jahren im deutschsprachigen Markt ein Marktanteil von bis zu 20% erwartet.⁶⁷

Neben den Arten von Solarzellen wurde auch gezeigt, wie unterschiedliche Faktoren auf den Wirkungsgrad von diesen einen Einfluss haben. Die Erkenntnisse bezüglich den unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Wirkungsgrad, die aus den Interviews herauskristallisiert wurden, sind beeindruckend. Ich möchte die wichtigsten in dieser Zusammenfassung nochmals erläutern.

Der versprochene Wirkungsgrad einer Solarzelle ist bei den Herstellern von Solarzellen und –modulen unter den so genannten Standard-Test-Bedingungen (STC) zu verstehen. Bei der STC werden 3 Kriterien berücksichtigt: eingestrahelte Leistung von der Sonne von 1000 Watt/m², spektrale Verteilung des Sonnenlichtes von AM 1,5 und Temperatur an der Zellen-Oberfläche von 25 °C. Da diese STC Werte selten in der Praxis vorkommen, ist es wichtig sich über die Werte zu erkundigen, die in unseren Breitengraden gegeben sind.

Die Strahlung, die die Erdoberfläche um 12 Uhr bei hellem Himmel erreicht, ist 1000 Watt/ m². Je kleiner die Strahlung, desto kleiner ist auch der Wirkungsgrad.

Es wurde auch gezeigt, dass das Spektrum des Sonnenlichtes einen standardisierten Wert von AM 1,5 hat (Air Mass). Bei senkrechter

⁶⁷ Baumgartner, F.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Buchs (CH), 13. April 2007.



Einflussfaktoren auf Wirkungsgrad der wichtigsten Solarzellen

Sonneneinstrahlung ist die eingestrahlte Sonnenenergie auf der Erdoberfläche am größten und somit auch der Wirkungsgrad der Solarzellen am größten.

Das Sonnenlicht strahlt nicht nur Licht sondern auch Wärme aus. Es wurde auch diskutiert, dass diese Wärme einen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Solarzelle hat. Mehrmals ist man der Meinung, dass in Südländischen Wärme-Gebieten die Solarzellen bei gleicher Anzahl Sonnenstunden und Strahlung einen größeren Wirkungsgrad aufweist als in unseren Breitengraden. Dies ist aber in der Praxis umgekehrt der Fall. Eine Solarzelle weist zum Beispiel einen größeren Wirkungsgrad bei 0°C auf 1200 Meter über dem Meerspiegel auf als die gleiche Solarzelle bei 50°C auf 200 Meter über dem Meerspiegel.⁶⁸ Deshalb ist es wichtig in Wärmeregionen der Welt hinter den Solarzellen eine Lüftung aufzubauen.⁶⁹

Wenn ein Teil eines Solarmoduls im Schatten steht, bedeutet dies auch für den Wirkungsgrad erhebliche Stromeinbussen. Wenn ein Teil einer Solarzelle mit Schatten bedeckt ist, sinkt der Wirkungsgrad so tief wie das schwächste Glied der Solarzelle. Die bedeckte Solarzelle wandelt sich in einen Verbraucher und kann aufgrund der Spannung zerstört werden. Um das zu vermeiden, haben Solarzellen Überbrückungen (Bypass-Dioden) aufgebaut. Viele der günstigen Solarzellen aus China enthalten diese Überbrückungen nicht. Um einen guten Wirkungsgrad zu erreichen, sind auch die Herstellung und die entsprechenden Zertifikate zu überprüfen.⁷⁰

Der Wirkungsgrad in Verhältnis zum Solarzellen-Material ist auch sehr interessant anzuschauen. Kristallin-Silizium Solarzellen können mit weniger Fläche den gleichen Strom als größere Dünnschicht-Solarzellen erzeugen. Ein

⁶⁸ Muther, K.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Rankweil, 23. März 2007

⁶⁹ Hutter, R. (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Hörbranz, 20. April 2007.

⁷⁰ Muther, K.: Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Rankweil, 23. März 2007



amorphe Solarzelle muss 3 Mal so gross wie eine Kristallin-Silizium Solarzellen sein, um den gleichen Strom zu erzeugen.⁷¹

Es gibt vielfältige Anwendungen im Bereich der Photovoltaik und man findet immer wieder neue. Die Anwendungen können in 3 Hauptgruppen aufgegliedert werden: netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen, netzunabhängige Inselsysteme und Kleinsysteme. Bei netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen und netzunabhängigen Inselsystemen werden derzeit hauptsächlich Solarzellen aus kristallinem Material; d.h. mono- und polykristalline Solarzellen verwendet. In diesem Bereich aber ist die Dünnschichttechnologie in der Zukunft aufgrund der letzten Entwicklungen viel versprechend.⁷² Bei den Kleinsystemen werden mehrheitlich amorphe Silizium-Solarzellen verwendet.

Photovoltaik ist heutzutage eine Industrie geworden und man rechnet, dass diese im Jahr 2050 30% des erzeugten Stroms ausmachen wird (siehe S. 5 in der Einleitung). Während vor 20 Jahren sich nur einige Idealisten mit dem Thema Photovoltaik beschäftigt haben, investieren heute vielen Firmen viel Geld in diese Tehnologie (z.B. Britisch Petroleum). Ausserdem sind viele Hersteller von Solarzellen-Modulen an der Börse und versprechen ihren Kapitalgebern bis 30% Rendite.⁷³ Im Jahr 2006 wurde gleich viel Silizium in der Photovoltaikindustrie wie in der Halbleiterindustrie eingesetzt.

Photovoltaik ist ein absoluter Trend geworden. Am 16 Juni 2007 wurde in Vorarlberg eine Petition beim Land Vorarlberg eingereicht, um den Klimaschutz in der Vorarlbergischen Verfassung zu verankern.⁷⁴ Darunter wird es auch nach mehr Geldförderungen für die Photovoltaik als erneubare Energie gefragt.

⁷¹ Jungwirth, F. (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Hörbranz, 4. Mai 2007.

⁷² Baumgartner, F.(2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Buchs (CH), 13. April 2007.

⁷³ Baumgartner, F.(2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Buchs (CH), 13. April 2007.

⁷⁴ Rinderer, A. (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Buchs (CH), 7. Mai 2007.



Literaturverzeichnis

Bansal, N.K. (2003): Photovoltaic Systems. New Delhi: Omega Scientific Publishers.

Baumgartner, F. (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Buchs (CH) , 13. April 2007.

Brendel, Rolf (2003): Thin-Film Crystalline Silicon Solar Cells. Physics and Technology. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Führer, A.; Heidemann K.; W. Nerreter (2005), W.: Elektrotechnik. Grundgebiete der Elektrotechnik 1. Stationäre Vorgänge. 7. überarb. u. erw. Aufl. München: Hanser Verlag.

Hanus, Bo; Ulrich E. Stempel (2004): Das große Solar- und Windenergie Werkbuch. Poing: Franzis Verlag.

Huld, F.; Sári, M; Dunlop, E (2006): a GIS-based system for performance assessment of solar energy over large geographical regions. Zugleich Online im Internet: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/doc/paper/2006-denver_Solar2006.pdf

Hutter, R. (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Hörbranz, 20. April 2007.

Jungwirth, F. (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Hörbranz, 4. Mai 2007.

Knaupp, W.; F. Staiß (2000): Photovoltaik. Ein Leitfaden für Anwender. 4. überarb. u. völlig erw. Aufl. Rheinland/Berlin-Brandenburg; Köln: TÜV-Verlag.

Marvart, Tom; Luis Castañer (2003): Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Oxford: Elsevier Advance Technology.



Mayer, O.H. (2006). Interview und schriftliche Befragung. Germany: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH.

Meissner, Dieter (1993): Solarzellen. Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Photovoltaik. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.

Muther, Klaus (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Rankweil, 23. März 2007.

Muther, Klaus (2007): Schlungsunterlagen Photovoltaik der Firma Stromaufwärts.

Rinderer, Albert (2007): Persönliches Interview, geführt vom Verfasser. Rankweil, 7. Mai 2007.

Sun, Sam-Shajing; Niyazi Serdar Sariciftci (2005): Organic Photovoltaics. Mechanism, Materials and Devices. Boca Raton Florida: Taylor & Francis Group, LLC.

Sandner, Thomas (2001): Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen. Planung, Errichtung und Verkauf für den Handwerksprofi. München; Heidelberg; Berlin: Hüthig & Pflaum Verlag GmbH & Co.

Schwarzburger, Heiko (2007): „Regierung will mehr Wärme von der Sonne.“ In: Solarindustrie. Sonderpublikation der Solarpraxis AG, 1. Jg. (2007), S. 74

Vignola, Frank; Hocken, John; Gary Grace (2000): PV in schools. PV lesson plan 1 – Solar cells. Lesson at the University of Oregon. Zugleich Online im Internet:

<http://solardat.uoregon.edu/download/Lessons/PVLessonPlan1SolarCells.doc>



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Dornbirn, am 28. Juni 2007

Felix Garayo