

Ausarbeitung des Vortrags

Photovoltaik

im Rahmen des Hauptseminars in Experimentalphysik

Universität Duisburg-Essen

Campus Duisburg

„Physikalische Grundlagen der Energieumwandlung“

im WS 05/06

Datum des Vortrags: 19.01.06

von Sonja Hartner

Betreuer: Prof. Dr. A. Lorke

Dr. H. Clemens

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation
 2. Geschichte
 3. Sonneneinstrahlung
 4. Absorptionsbereiche des Sonnenspektrums
 5. Luftmasse
 6. Theoretische Grundlagen
 - 6.1. Halbleiter
 - 6.2. Der pn-Übergang
 - 6.3. Belasteter pn-Übergang
 - 6.4. Kennlinie des pn-Übergangs
 - 6.5. Theorie der Solarzelle
 7. Grober Aufbau einer Siliziumsolarzelle
 8. Herstellung von Siliziumsolarzellen
 - 8.1. Verluste
 - 8.2. Reduzierung der Verluste
 - 8.3. Silizium
 - 8.4. Vom Rohsilizium zum Solarsilizium
 - 8.5. Kristallsäulen
 - 8.6. Wafer
 - 8.7. Herstellung des pn-Übergangs
 - 8.8. Solarzellen
 - 8.8.1. Siebdrucksolarzelle
 - 8.8.2. Buried-Contact-Solarzelle
 - 8.9. Modulbildung
 - 8.10. Solarzellensysteme
 9. Vorteile und Nachteile der kristallinen Siliziumsolarzelle
 10. Zukunft
 - 10.1. Tandemsolarzelle
 11. Daten
 12. Kostenkalkulation
- Quellenangaben

1. Motivation

Solarzellen erfüllen zwei wichtige Aufgabenfelder bei der Umwandlung von Sonnenlicht in nutzbare Energie. Dazu gehört zum einen die Umwandlung von Sonnenlicht in Wärme, die sogenannte Solarthermie. Zum anderen kann man aus Sonnenlicht auch direkt elektrische Energie gewinnen, das ist der Bereich der Photovoltaik. Dieser Vortrag beschäftigt sich mit dem Gebiet der Photovoltaik.

2. Geschichte

Der photovoltaische Effekt ist erstmals 1839 von dem Physiker Alexandre Edmond Becquerel beobachtet worden. Becquerel tauchte zwei Platinelektroden in ein Säurebad und beleuchtete eine davon mit Licht. Daraufhin floss ein Strom. Die heutigen Solarzellen beruhen zwar nicht auf der Einwirkung von Licht auf zwei Elektroden, sondern auf dem Potentialunterschied, der beim Auftreffen von Licht auf die Raumladungszone zwischen unterschiedlich dotierten Schichten eines Halbleiters entsteht.

Willoughby Smith entdeckte 1873, dass sich der elektrische Widerstand von Selen bei Belichtung ändert. Das war die Geburtsstunde der Photozelle.

Albert Einstein lieferte die theoretische Erklärung zum Verständnis des photovoltaischen Effektes 1905.

Shockley, Brattain und Bardeen stellten den ersten pn-Übergang her, welcher Grundlage zur Herstellung einer modernen Solarzelle ist.

Die Firma Bell machte durch Zufall die Entdeckung, dass ein Siliziumgleichrichter bei Beleuchtung Strom erzeugt, und entwickelten eine Siliziumsolarzelle mit einem Wirkungsgrad von 4 %, die damals ca. 500 US\$ kostete.

1958 wurden erste Tests im Weltall mit sensationellen Ergebnissen durchgeführt: Im Weltall hatte die Solarzelle einen Wirkungsgrad von fast 10 %, was auf der Erde bis dahin noch nicht erreicht wurde.

Bis zum Beginn der Ölkrise wurde der Entwicklung von Solarzellen nicht mehr so starke Beachtung geschenkt. Mit Beginn der Ölkrise suchte man allerdings nach neuen Energiereserven und arbeitete dann wieder weiter an der Verbesserung von Siliziumsolarzellen und stellte neue Solarzellen basierend auf anderen Materialien her.

Heutzutage kostet eine Solarzelle mit 1 W Leistung ca. 3 €.

3. Sonneneinstrahlung

Auf der nördlichen Halbkugel der Erde hat man eine Sonneneinstrahlung zwischen ca. 1500 kWh/m², zum Beispiel in Schweden und Norwegen, und rund 6000kWh/m² in Nordafrika. Die Sonne ist eine von Natur aus gegebene Energiequelle. Diese „Energiequelle“ kann man mithilfe von Solarzellen nutzen, um die eingestrahlte Lichtleistung in elektrischen Strom umzuwandeln.

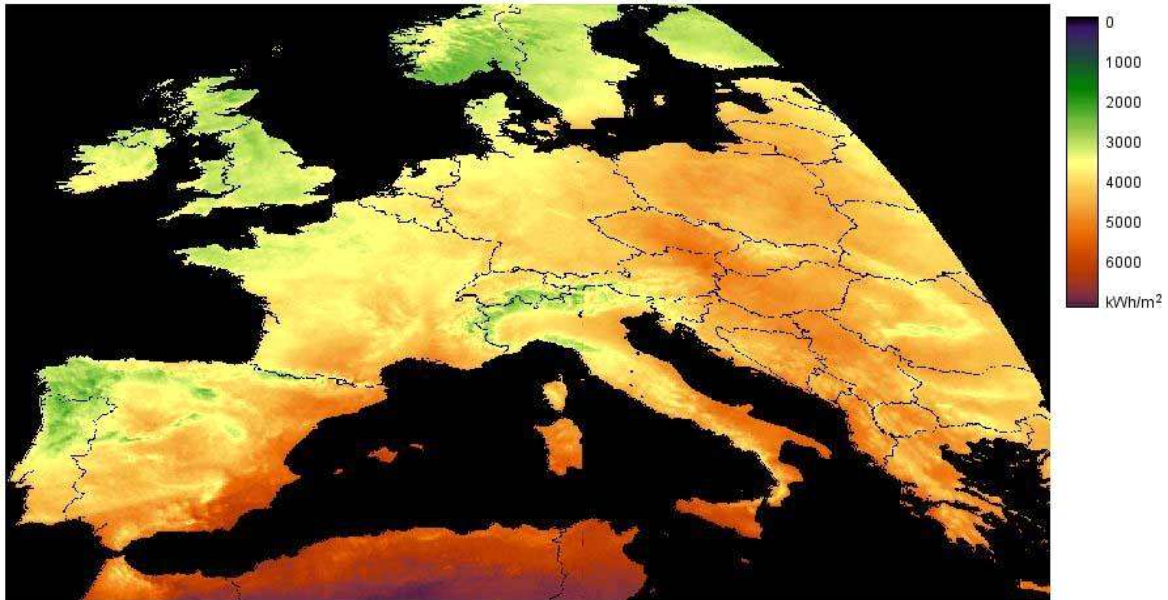
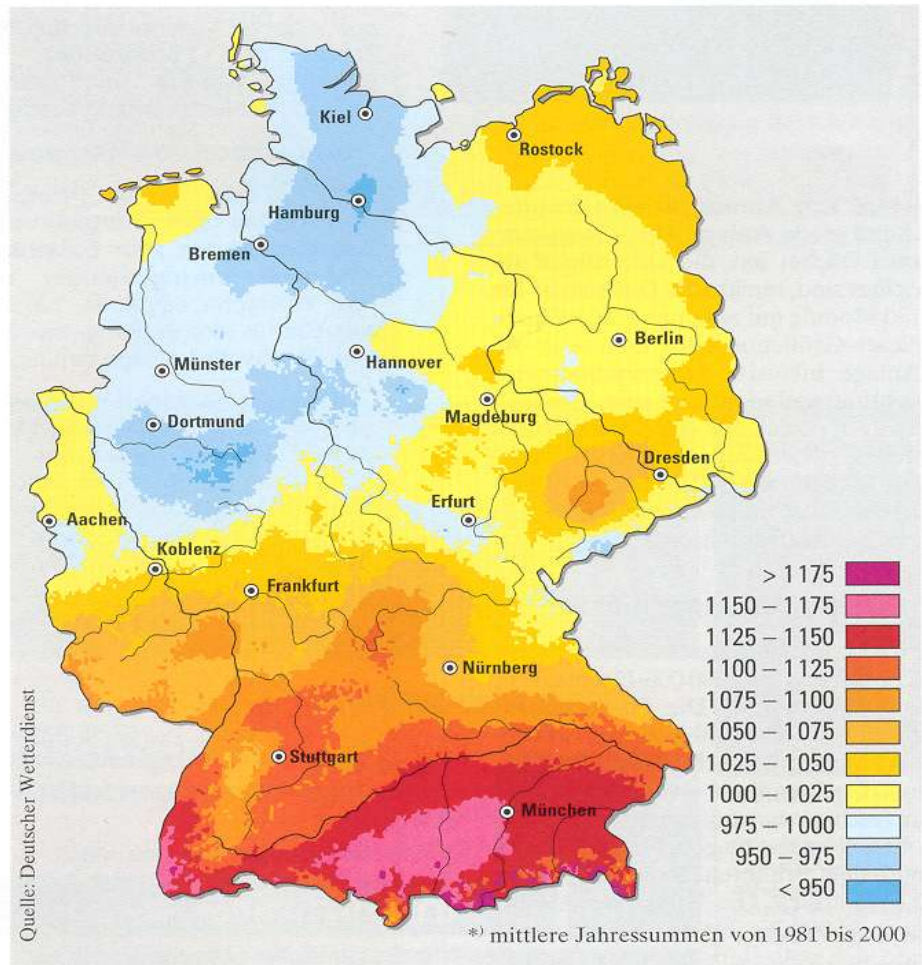


Abb.1: Sonneneinstrahlung in kWh/m²

Betrachtet man die Sonneneinstrahlung in Deutschland, die einer Energiedichte von ca. 4000 kWh/m^2 entspricht, bietet sich ein enorm großes Potential zur Nutzung dieser Energiequelle an. Die durchschnittliche Sonnenscheindauer in Deutschland liegt zwischen 950 Stunden pro Jahr im Norden und bei 1175 Stunden pro Jahr im Süden des Landes.

Abb. 2: Sonnenstunden in Deutschland



4. Absorptionsbereiche des Sonnenspektrums

In Abbildung 3 ist die Strahlungsleistungsdichte als Funktion der Wellenlänge aufgetragen. Die rötliche Kurve stellt die Leistungsdichte eines schwarzen Strahlers mit der Temperatur der Sonne dar. Die bläulich gepunktete Kurve unterhalb der des schwarzen Strahlers gibt die Strahlungsleistungsdichte des Sonnenspektrums auf der Erde

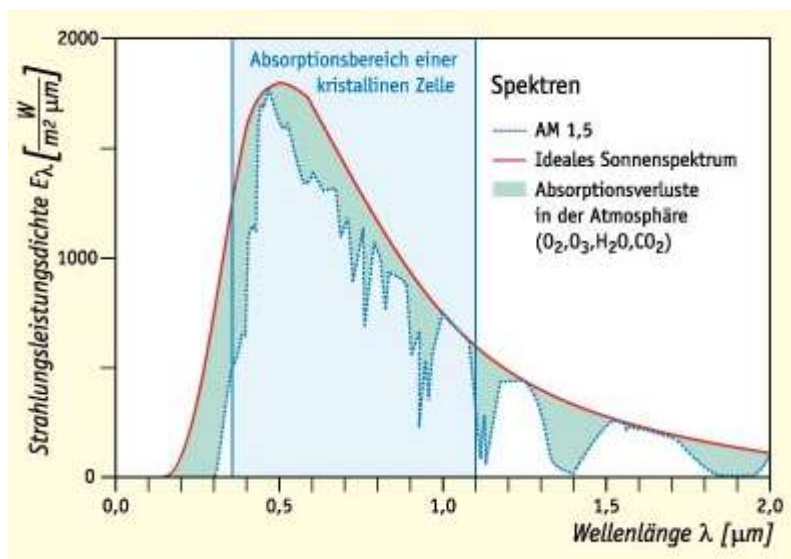


Abb.3: Sonnenspektrum

nach Durchlaufen der Lufthülle an. Es ist zu erkennen, dass die Kurve einen ähnlichen Verlauf besitzt, die Strahlungsleistungsdichte allerdings durch deutliche Absorptionsbanden vermindert wird.

Die Absorptionen innerhalb der Lufthülle werden im Bereich $\lambda > 0,5 \mu\text{m}$ im Wesentlichen durch Wasserdampf verursacht, im Bereich $\lambda < 0,5 \mu\text{m}$ durch Ozon.

Der markierte hellblaue Spektralbereich kann zum Betrieb einer kristallinen Si-Solarzelle genutzt werden.

Abbildung 4 zeigt die optimale Leistungsdichte verschiedener Solarzellen als Funktion der Wellenlänge im Vergleich mit dem Sonnenspektrum (hier das Sonnenspektrum auf der Erde). Kristallines Silizium und eine CuInSe_2 - Zelle, eine so genannte Chalkopyrit-Solarzelle, besitzen ungefähr dasselbe optimale Absorptionsspektrum (siehe rote Kurve in Abbildung 4).

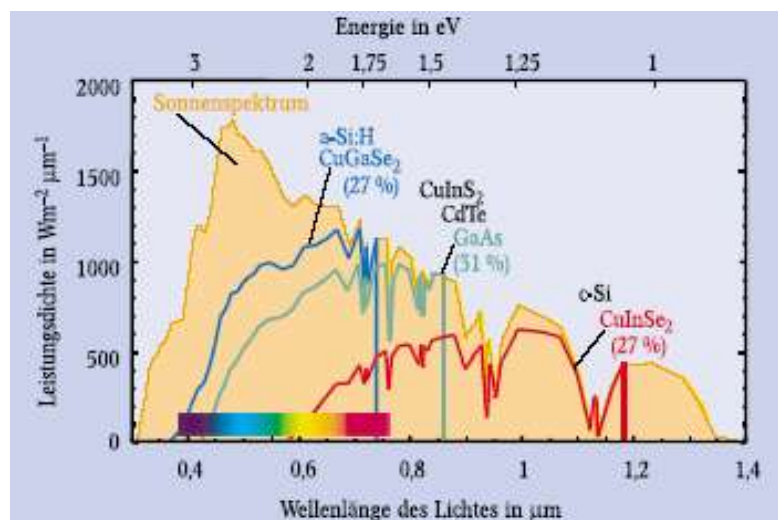


Abb. 4: Absorptionsspektren verschiedener Solarzellen

Das Absorptionsspektrum von amorphem Silizium ist ähnlich dem einer anderen Chalkopyrit-Solarzelle aus CuGaSe_2 . Den maximalen Wirkungsgrad (31 %) besitzt eine Solarzelle, wenn ihre niederenergetische Absorptionskante etwa 1,4 eV beträgt.

Auffällig ist bei Vergleichen mit den zwei Chalkopyrit-Zellen, dass die realen Wirkungsgrade von Solarzellen aus Silizium weit unterhalb der Wirkungsgrade der anderen beiden Zellen liegen; so hat man bei kristallinen Silizium- Solarzellen einen Wirkungsgrad von nur bis zu 19 % erreicht und bei amorphen

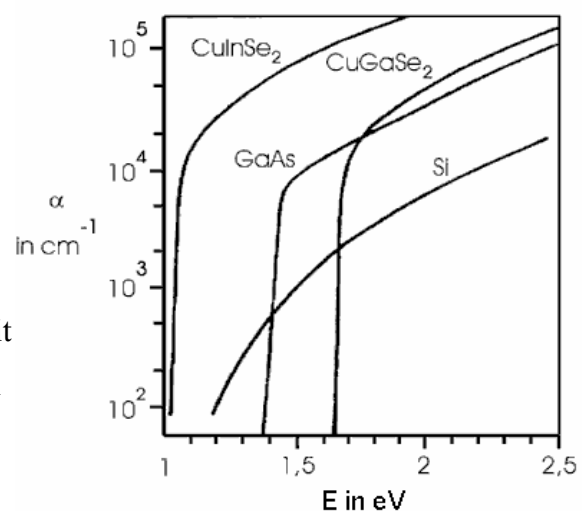


Abb. 5: Absorptionskoeffizient

Silizium-Zellen sogar nur Wirkungsgrade um die 8 %. Diese extremen Unterschiede zwischen den Wirkungsgraden, obwohl die jeweils verglichenen Solarzellen nahezu gleiche Absorptionsbereiche besitzen, lässt sich mit Abbildung 5 leicht verstehen. In Abbildung 5 ist der Absorptionskoeffizient gegen die Energie in eV aufgetragen. Vergleicht man die Verläufe von kristallinem Silizium und von CuInSe_2 , erkennt man einen um den Faktor 100 grösseren Absorptionskoeffizienten der CuInSe_2 -Zelle gegenüber dem einer kristallinen Silizium-Zelle.

5. Luftmasse

Die Luftmasse, die die Sonnenstrahlung durchlaufen muss, um auf die Erde zu treffen, wird als „Air Mass“ bezeichnet und mit AM abgekürzt.

Die Air Mass wird mit folgender Formel berechnet: $AM = \frac{1}{\sin(\gamma_s)}$. Anhand von Abbildung 6

kann man sich die verschiedenen Stärken der Sonnenstrahlung klar machen. So ist die Sonneneinstrahlung in Berlin im Juni weitaus größer als Ende Januar, wo sich ein Air-Mass-Richtwert von 3 aufgrund des Winkels der Sonneneinstrahlung zum Boden hin ergibt.

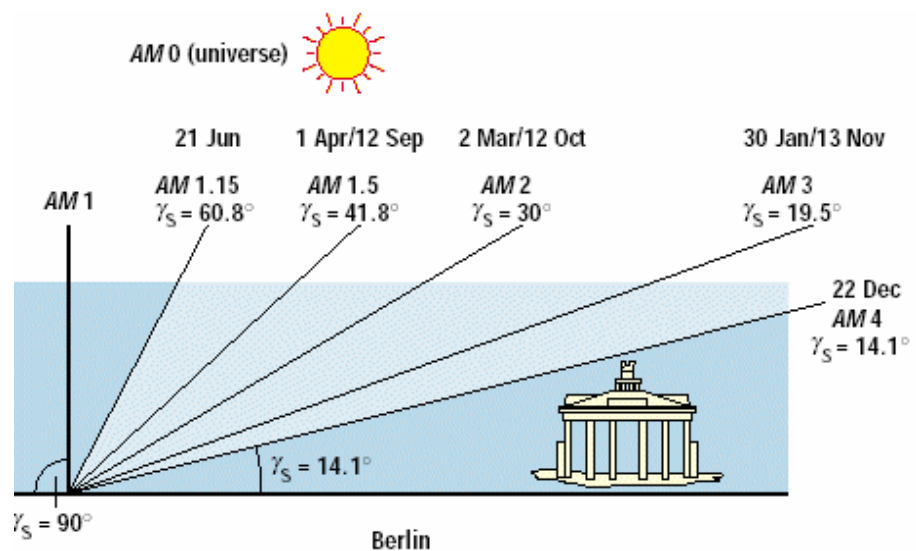


Abb. 6: Air-Mass-Werte bei verschiedenen Einstrahlwinkeln

An der Äquatorlinie und dann, wenn die Sonnenstrahlung senkrecht auf den Boden auftrifft, erhält man einen Air-Mass-Wert von 1.

In europäischen Breitengraden wird für Solarzellen der Normwert $AM = 1,5$ angenommen, um die Wirkungsgrade zu vergleichen. Aufgrund dessen wird auch ersichtlich, dass die Solarzellen, die im Labor ausgemessen werden, in der Realität, zum Beispiel auf einem Hausdach, nicht so hohe Wirkungsgrade erbringen können.

6. Theoretische Grundlagen

6.1. Halbleiter

Ein Halbleiter ist ein Festkörper, dessen elektrische Leitfähigkeit stark temperaturabhängig ist. Durch Einbringen von Fremdatomen lässt sich die elektrische Leitfähigkeit steuern. Wenn der Bandabstand zwischen Valenzband und Leitungsband nicht allzu groß ist (unter 1 eV), macht sich bei nicht zu tiefen Temperaturen die „Aufweichung“ der Fermiverteilung bemerkbar, so dass ein Teil der Elektronen ins Leitungsband gelangt. Sowohl die Elektronen als auch die Löcher tragen zum Stromtransport bei. Bei Belichtung des halbleitenden Materials, z. B. durch Sonneneinstrahlung, werden durch Photonen, die genügend Energie besitzen, zusätzlich Elektronen aus dem Valenzband herausgeschlagen und ins Leitungsband

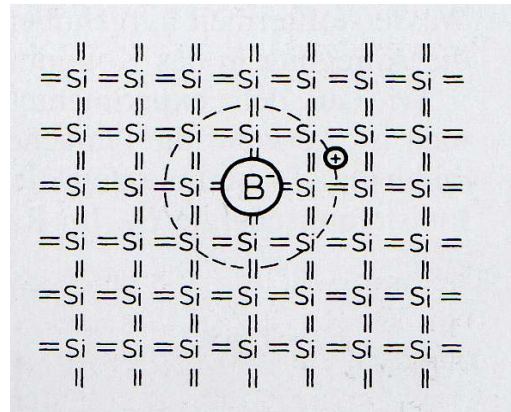


Abb. 7: p-dotiertes Silizium

gehoben, dadurch erniedrigt sich der elektrische Widerstand. Der Vorteil bei halbleitenden Materialien besteht darin, dass man durch Dotierung die Leitfähigkeit noch weiter erhöhen kann. Eine Dotierung wird bei Silizium, welches 4 Valenzelektronen auf der Außenschale besitzt, durch Elemente der dritten und fünften Hauptgruppe vorgenommen.

Bei Dotierung des Siliziums mit einem Element aus der dritten Hauptgruppe, wie z.B. Bor oder Aluminium, erhält man p-dotiertes Silizium (Abbildung 7). Solche Elemente besitzen nur drei Valenzelektronen. Jedes dotierende Atom nimmt ein zusätzliches Elektron aus dem Silizium-Gitter auf. Dadurch entsteht ein Loch im Valenzband und das Material ist p-dotiert.

Baut man in das Silizium-Gitter ein fünfwertiges Element ein, ist das Silizium n-dotiert (Abbildung 8).

Fünfwertige Elemente sind zum Beispiel Phosphor oder Antimon. Das fünfte Elektron wird nicht zur Bindung benötigt und ist nur schwach an das fünfwertige Element gebunden.

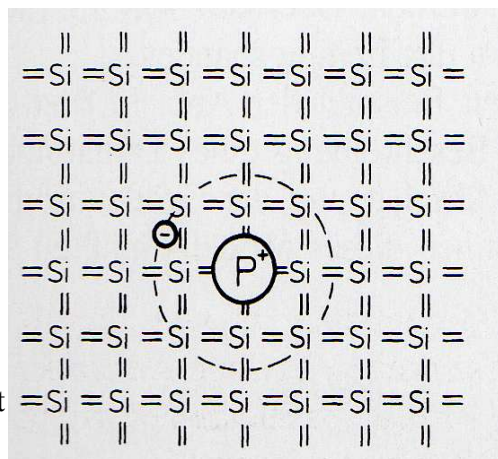


Abb. 8: n-dotiertes Silizium

Zu beachten sind die Bedingungen zur Anhebung eines Elektrons aus dem Valenzband ins Leitungsband. Dabei ist zwischen einer direkten und einer indirekten Bandlücke zu unterscheiden.

Bei einer direkten Bandlücke liegen das Minimum des Leitungsbands und das Maximum des Valenzbandes im k-Raum direkt übereinander. Bei der Absorption eines Photons kann ein Elektron aus dem Valenzband direkt in das Leitungsband übergehen. Bei einer indirekten Bandlücke, so auch beim kristallinen Silizium, ist das Maximum des Valenzbandes auf der k-Achse gegenüber dem Minimum des Leitungsbandes verschoben, es wird ein drittes Teilchen für den Übergang eines Elektrons vom Valenz- ins

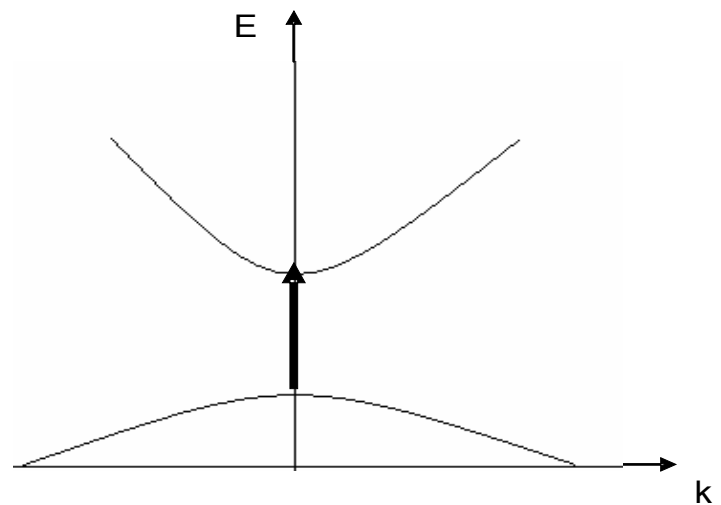


Abb. 9 : direkte Bandlücke

Leitungsband benötigt, damit die Impulserhaltung gewährleistet wird. Dieses dritte Teilchen zur Erhaltung des Impulses ist ein Phonon.

Übergänge in einer indirekten Bandlücke haben eine nicht so große Wahrscheinlichkeit wie Übergänge bei direkten Bandlücken. In Bezug auf kristalline Solarzellen sind daher mindestens Zelldicken von 250 μm nötig, um genügend indirekte Bandübergänge zu gewährleisten.

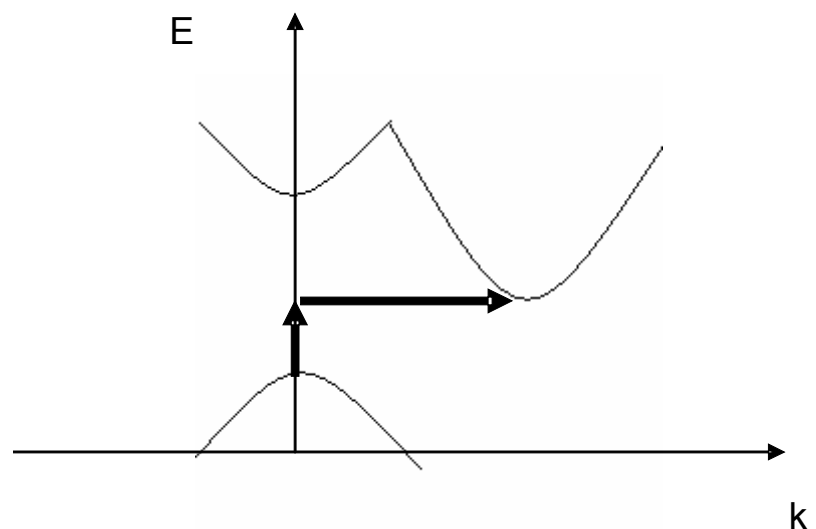


Abb. 10: indirekte Bandlücke

Legt man an einen Halbleiter ein elektrisches Feld an, so werden die Elektronen entgegen der Feldrichtung transportiert und die entstandenen Löcher im Valenzband bewegen sich in Richtung des angelegten Feldes. Da man bei der Solarzelle aber ohne externes Feld auskommen will, benutzt man einen so genannten pn-Übergang.

6.2. Der pn-Übergang

Aufgrund der Fermi-Dirac-Statistik ist das Fermi-niveau des p-dotierten Halbleiters zum Valenzband hin verschoben im Gegensatz zum n-dotierten Halbleiter, wo das Fermi-niveau zum Leitungsband hin verschoben ist. Bringt man diese zwei dotierten Halbleiter zusammen, so erhält man einen pn-Übergang. In Abbildung 12 erkennt man, dass sich eine Bandverbiegung im Bereich des Überganges einstellt.

Den Bereich, in dem die Bänder verbogen sind, nennt man Übergangszone. In dieser Übergangszone entsteht ein Raumladungsgebiet. Die Elektronen und Löcher diffundieren wegen der abrupten Konzentrationsänderung in das jeweils anders dotierte Gebiet. Zurück bleiben im p-dotierten Bereich die ortsfesten negativ geladenen Akzeptor-Ionen und im n-dotierten die positiv geladenen Donator-Ionen.

Dadurch entsteht eine negative Raumladung im p-dotierten Material und eine positive Raumladung im n-dotierten Material. Außerhalb des Raumladungsbereiches herrscht Ladungsneutralität.

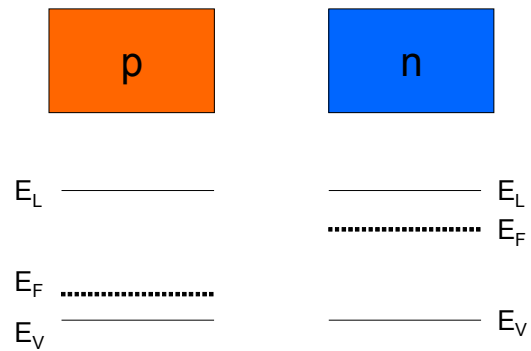


Abb. 11: Energieniveaus in getrennten p- und n-dotierten Halbleitern

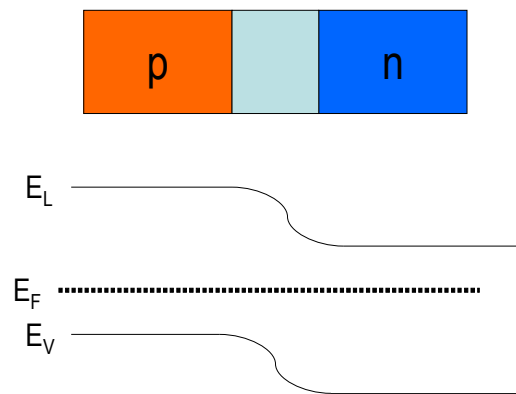


Abb. 12: Energieniveaus in einem pn-Übergang

In Abbildung 13 ist die logarithmische Ladungsträgerkonzentration gegen den Ort aufgetragen. Die Raumladungszone befindet sich zwischen den grünen Strichen. Links ist das p-Gebiet, rechts das n-dotierte Gebiet.

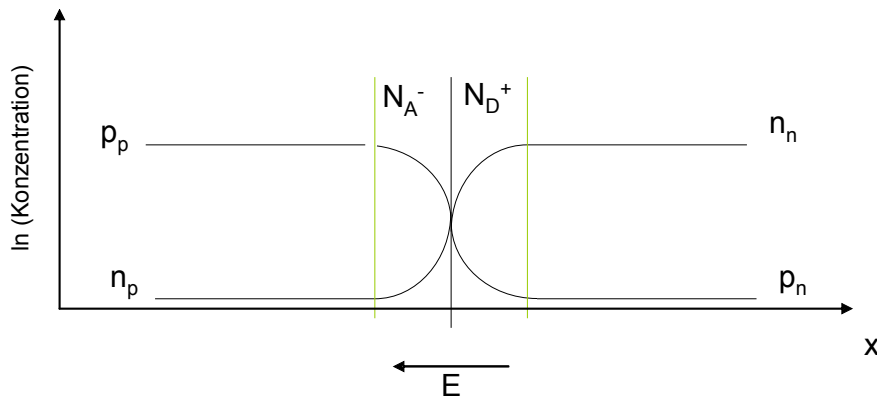


Abb. 13: Ladungsträgerkonzentration beim pn-Übergang

Es ist zu erkennen, dass die Löcherkonzentration im p-dotierten Gebiet weitaus größer ist als die Elektronenkonzentration. Im n-dotierten Gebiet ist die Ladungsträgerkonzentration der Elektronen weitaus größer als die der Löcher. Innerhalb der Raumladungszone entsteht aus den oben genannten Gründen ein elektrisches Feld.

6.3. Belasteter pn-Übergang

Bis jetzt wurde der pn-Übergang nur im thermischen Gleichgewicht betrachtet. Um die Vorgänge bei einem belasteten pn-Übergang zu verstehen, muss man sich den Diffusionsstrom und den Feldstrom der Elektronen und Löcher ansehen.

In diesem Kapitel werden die Teilchenströme (nicht die elektrischen Ströme) betrachtet. Der Diffusionsstrom beschreibt den Strom der Elektronen vom n-dotierten Gebiet in das p-dotierte Gebiet aufgrund des Konzentrationsgradienten; analog gilt für die Löcher der Strom vom p-dotierten Gebiet in das n-dotierte Gebiet. Im thermischen Gleichgewicht sind Diffusionsstrom und Feldstrom gleich groß. (Abbildung 14)

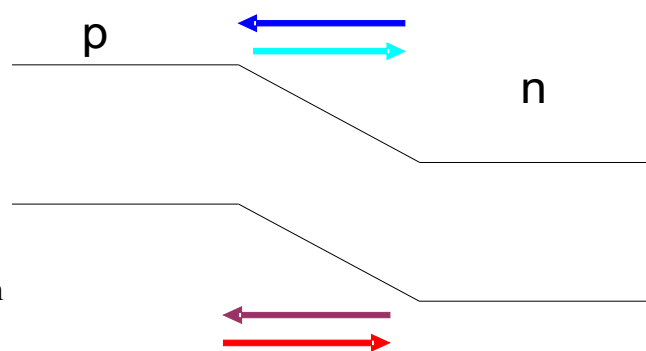






Abb. 14: pn-Übergang im thermischen Gleichgewicht

Legende zu Abbildung 14- 16:

-  Diffusionsstrom der Elektronen (Teilchenstrom)
-  Feldstrom der Elektronen (Teilchenstrom)
-  Diffusionsstrom der Löcher (Teilchenstrom)
-  Feldstrom der Löcher (Teilchenstrom)

Legt man an den pn-Übergang eine Spannung an, so besteht kein Gleichgewicht mehr. Bei Anlegen einer positiven Spannung (+-Pol an das p-dotierte Gebiet, - -Pol und das n-dotierte Gebiet) vergrößert sich der Diffusionsstrom exponentiell. Der Feldstrom bleibt aber konstant und hat etwa denselben Wert wie im thermischen Gleichgewicht. Die Raumladungszone verkleinert sich, da ein Elektronenüberschuss im n-dotierten Gebiet entsteht, es fließt ein hoher Strom. Den Strom, der in diesem Fall des belasteten pn-Übergangs entsteht, nennt man Durchlassstrom.

$$\text{Durchlassstrom: } |I_n^{Diff}| > |I_n^{Feld}|$$

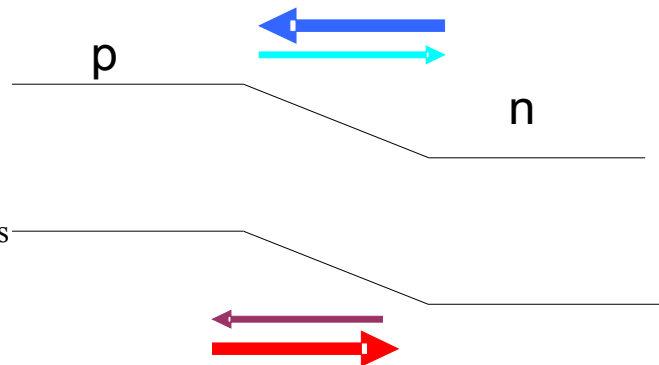


Abb. 15: positiv gepolter pn-Übergang

Legt man eine negative Spannung an, wird der Diffusionsstrom der Elektronen und Löcher sehr klein. Der Feldstrom bleibt weiterhin konstant. Die Raumladungszone weitet sich demzufolge aus, und es entsteht ein Sperrstrom.

$$\text{Sperrstrom: } |I_n^{Diff}| < |I_n^{Feld}|$$

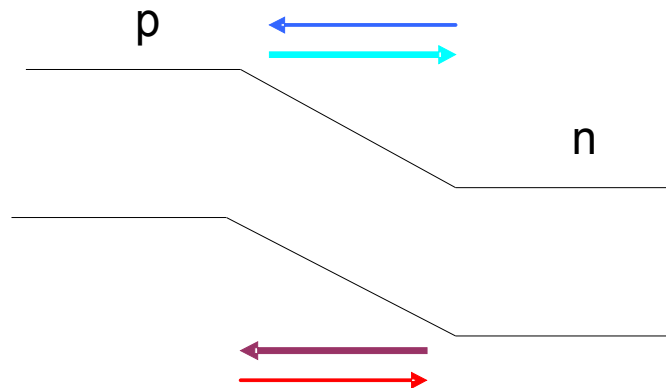


Abb. 16: negativ gepolter pn-Übergang

6.4. Kennlinie des pn-Übergangs

Aufgrund des sich kaum verändernden Feldstromes bei Anlegen einer Spannung kann man folgende

Näherung machen: $I_{n,p}^{Diff}(U=0) \approx I_{n,p}^{Feld}(U \neq 0)$

(I ist hier der elektrische Strom, die Indizes n bzw. p stehen für Elektronen und Löcher).

Aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit des Diffusionsstroms von der Spannung ergibt sich:

$I_{n,p}^{Diff} \propto \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right)$. Durch den immer konstant bleibenden Feldstrom ergibt sich mit der

exponentiellen Abhängigkeit des Stromes von der Spannung : $I_{n,p}^{Diff} = I_{n,p}^{Feld} \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right)$. Der

Gesamtstrom ergibt sich aus der Differenz zwischen Feldstrom und Diffusionsstrom:

$$I_{n,p} = I_{n,p}^{Diff} - I_{n,p}^{Feld} = I_{n,p}^{Feld} \left(\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right) .$$

Die Kennlinie des pn-Übergangs ergibt sich somit zu $I = (I_n^{Feld} + I_p^{Feld}) \left(\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right)$

(Abbildung 17).

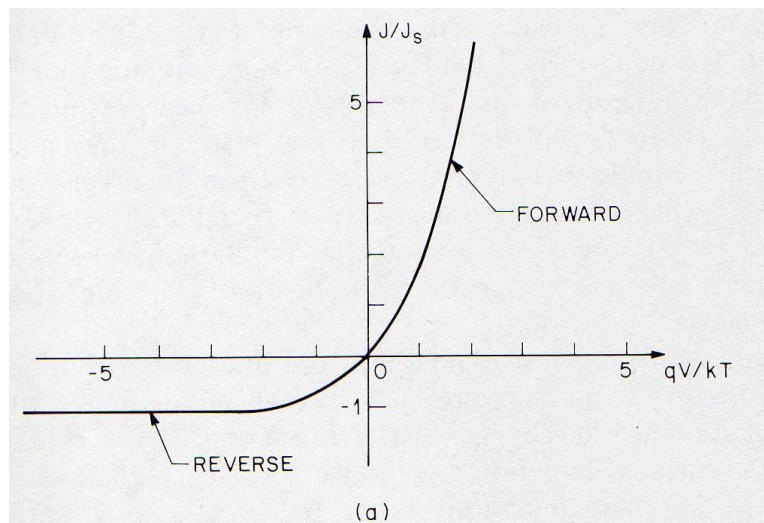


Abb. 17: Kennlinie des pn-Übergangs

6.5. Theorie der Solarzelle

Durch Beleuchten des pn-Übergangs tritt im Inneren des Kristalls eine Ladungsträgerpaarerzeugung ein, weil durch die Absorption der Photonen Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband angehoben werden. Die dabei entstehenden überschüssigen Elektronen und Löcher stehen dem Stromtransport zur Verfügung. Es ist zu beachten, dass nur die Ladungsträger zur Stromerzeugung beitragen, die innerhalb der Raumladungszone erzeugt werden oder nur eine Diffusionslänge davon entfernt sind.

Die Kennlinie einer Solarzelle im beleuchteten und unbeleuchteten Zustand gibt Abbildung 18 wieder. Im unbeleuchteten Zustand ist der Strom positiv (1. Quadrant). Bei der beleuchteten Solarzelle ist der Strom negativ (4. Quadrant). Der lichtinduzierte Strom fließt also entgegengesetzt zu dem eines in Durchlassrichtung gepolten pn-Übergangs. Der Kurzschlussstrom I_{sc} gibt den Wert des Stromes an, wenn keine Spannung anliegt.

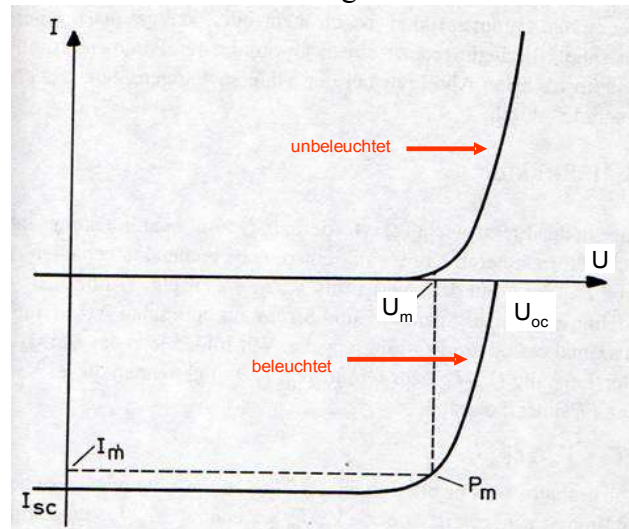


Abb. 18: $I(U)$ Kennlinie einer Solarzelle

U_{oc} gibt die Leerlaufspannung an, wobei der Solarzelle kein Strom entnommen wird. Um einen hohen Wirkungsgrad der Solarzelle zu bekommen, sollten die Diffusionslängen so hoch wie möglich sein, dagegen aber das Volumen des Kristalls so klein wie möglich.

Abbildung 19 zeigt den Kennlinien-Verlauf einer beleuchteten Solarzelle. U_{max} und I_{max} ergeben die optimalen Arbeitspunkte und somit die maximal erreichbare Leistung P_{max} , die sich aus

$$P_{max} = U_{max} I_{max} \text{ ergibt.}$$

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle lässt sich aus dem Verhältnis der erzeugten Leistung zur eingestrahlten Leistung bilden.

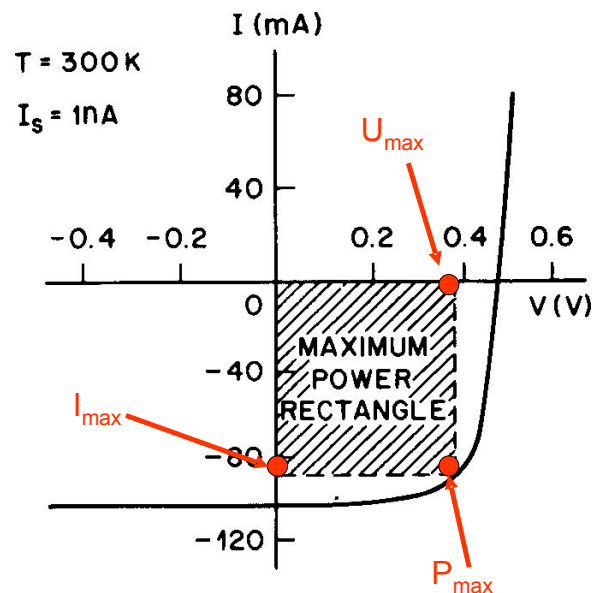


Abb. 19: $I(U)$ einer beleuchteten Solarzelle

Tabelle 1 zeigt die erreichten Wirkungsgrade im Labor und in der Serienproduktion

unterschiedlicher Solarzellen. Die meisten Solarzellen, die heutzutage auf Dächern platziert werden, sind polykristalline oder monokristalline Siliziumsolarzellen, die im Durchschnitt einen Wirkungsgrad von 15 % besitzen. Amorphes Silizium findet man in Taschenrechnern und Uhren wieder, da die Nutzung zur großflächigen Stromerzeugung mit einem Wirkungsgrad von nur 7 % nicht rentabel ist. Der Rekord des höchsten Wirkungsgrades liegt derzeit bei 31 % im Labor. Erreicht wurde er mit einer GaInP/GaInAs-Tandemsolarzelle, deren Produktion derzeit aber nicht rentabel wäre, da die Herstellungskosten zu hoch wären. Auffällig ist der extreme Unterschied der Wirkungsgrade zwischen Labor und Produktion. Solarzellen, deren Wirkungsgrade im Labor gemessen werden, unterliegen Standardbedingungen von AM 1,5 und einer Außentemperatur von 25 °C. Diese Bedingungen sind außerhalb des Labors aber nicht gegeben.

Material	Wirkungsgrad	Wirkungsgrad
	Labor	Produktion
Monokristallines Silizium	24%	14 %-17 %
Polykristallines Silizium	18%	13 %-15 %
Amorphes Silizium	13%	5 %-7 %
GaAs	> 25 %	15%-20 %
GaInP/ GaInAs (Tandem)	31%	25%
Chalkopyrit-Verbindungen	> 18,8 %	>11 %

Tabelle 1: Wirkungsgrade unterschiedlicher Solarzellen

7. Grober Aufbau einer Siliziumsolarzelle

Eine Solarzelle besteht aus einem Trägermaterial, einer Leiterschicht, dem pn-Übergang, einer Antireflexionsschicht und Leiterbahnen, die im Kontakt mit der n-Schicht stehen. Die p-Schicht des Übergangs ist viel dicker als die n-Schicht. Auf die n-Schicht wird eine Antireflexionsschicht aufgebracht. Anschließend werden die Leiterbahnen angebracht, die den Stromtransport der Elektronen aus der Zelle ins elektrische Netz gewährleisten.

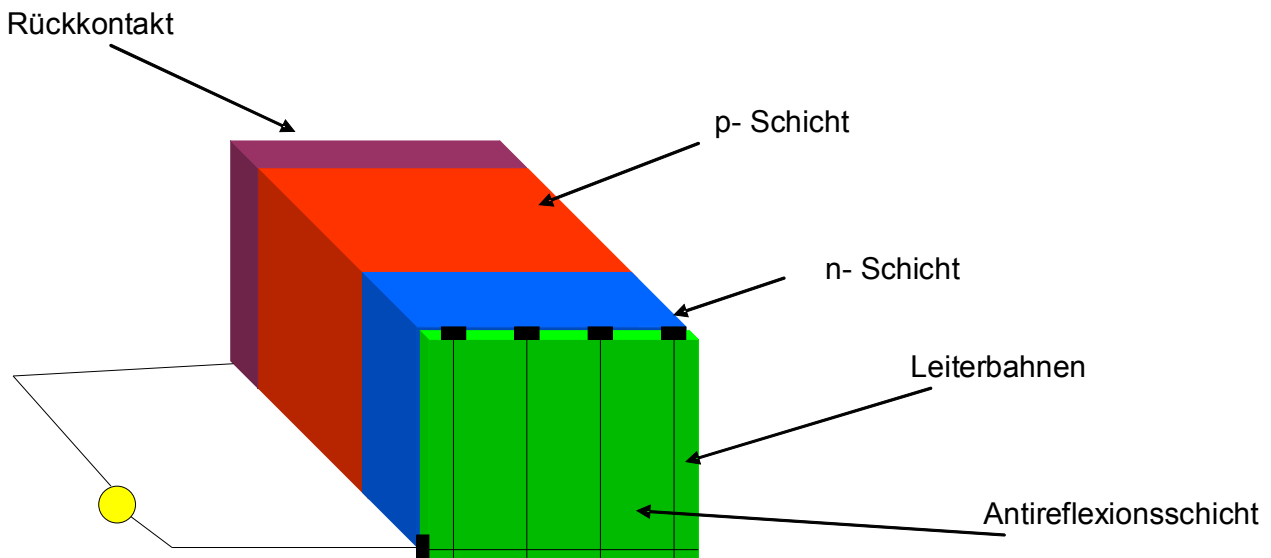


Abb. 20: Aufbau einer kristallinen Siliziumsolarzelle

8. Herstellung von Siliziumsolarzellen

8.1. Verluste

Bei der Herstellung einer Solarzelle sind einige wichtige Punkte zur Verbesserung des Wirkungsgrades zu beachten. Dazu gehören Reflexionsverluste, Abschattungen, Absorptionsverluste, Rekombinationsverluste und Thermalisierungsverluste. Reflexions-, Abschattungs- und Absorptionsverluste sind noch vor Eindringen der Sonnenstrahlung in die Zelle zu beobachten. Reflexionsverluste gehen zu 30 %, Abschattungsverluste durch zum Beispiel Leiterbahnen zu 12 % und Absorptionsverluste zu 31 % zu Lasten des eingestrahlt Sonnenlichts. Werden die Elektronen in höhere Zustände angeregt, so fallen sie in den Grundzustand zurück und verursachen dadurch Thermalisierungsverluste von bis zu 30 %, da sie ihre überschüssige Energie an Phononen abgeben. Rekombinationsverluste (5 %) vermindern ebenfalls die Umsetzung in elektrische Leistung.

8.2. Reduzierung der Verluste

Back-Surface-Field

Zur Verminderung der Rekombinationsverluste wird auf die Rückseite der p-dotierten Schicht eine p^+ -Schicht aufgebracht. Die p^+ -Schicht wird meistens mit einer Aluminiumpaste hergestellt. Es entsteht ein Feld, welches eine Rekombination der Minoritätsladungsträger verhindert. Dieses Back-Surface-Field (BSF) wirkt wie ein Spiegel, der dafür sorgt, dass die Ladungsträger wieder in die Zelle zurückgelangen. Dieses Verfahren reduziert die Rekombinationsverluste um bis zu 4%.

Antireflexionsschicht

Zurzeit gibt es zwei Verfahren zur Verminderung der Reflexion. Zum einen durch Aufbringen einer dünnen TiO_2 -Schicht oder durch SiN. Zum anderen die Herstellung von pyramidenartigen Siliziumoberflächen.

Silizium besitzt einen Brechungsindex von 3,5 und somit einen Reflexionskoeffizienten bei senkrechter Beleuchtung von 31 %.

Die Verminderung der Reflexion mit Hilfe dünner SiN- oder Titandioxid-Schichten erfolgt nach dem Prinzip der optischen Viertelwellenlänge. Ein eindringender Lichtstrahl wird an der Grenzschicht zwischen Silizium und z.B. SiN reflektiert. Silizium ist das optisch dichtere Medium, somit erfährt der Lichtstrahl eine Phasenverschiebung um $\Pi/2$. Wenn die Antireflexionsschicht so beschaffen ist, dass der optische Weg einem Viertel der Wellenlänge entspricht, wird das

reflektierte Licht bei senkrechtem Einfall ausgelöscht. Der optische Weg ergibt sich aus $nd = \frac{\lambda}{4}$.

Ein weiteres Problem ist der sich verändernde Brechungsindex des Siliziums in Abhängigkeit der Wellenlänge, worauf hier aber nicht weiter eingegangen wird.

Eine weitere sehr interessante Möglichkeit zur Verringerung der Reflexion ist, die Siliziumoberfläche mit umgekehrten Pyramidenstrukturen zu versehen.

Diese pyramidenartigen Strukturen werden durch anisotrope Ätzverfahren hergestellt. Die Oberfläche besteht dabei aus (100)-orientiertem, einkristallinem Siliziumoxid. Die verschiedenen orientierten Kristallflächen lassen sich unterschiedlich schnell abätzen und es entstehen statistisch verteilte Zufallspyramiden, die 1-10 μm hoch sind.

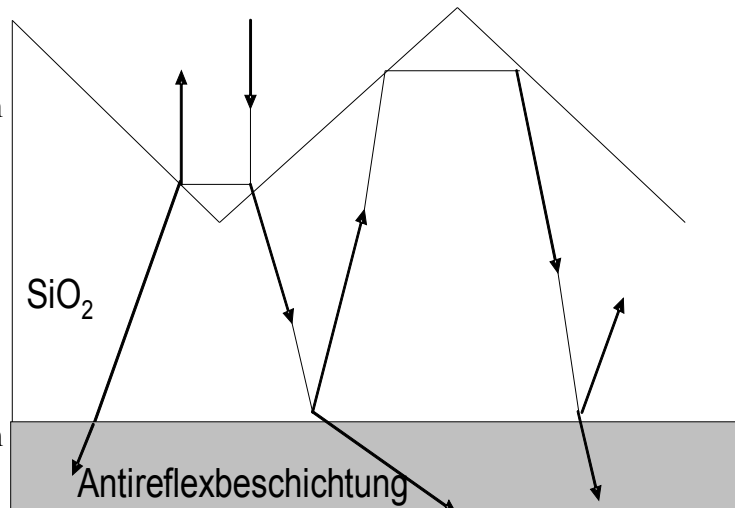


Abb.21: Pyramidenstrukturen nach Ätzverfahren

Der Winkel an den Spitzen beträgt $70,5^\circ$.

Somit trifft ein senkrecht einfallender Strahl unter einem Winkel von $35,25^\circ$ auf die Oberfläche. Der Strahl wird im selben Winkel totalreflektiert und trifft auf die gegenüberliegende Seite, so dass er dann in den Kristall eindringen kann. Diese pyramidenartige Struktur wird oft auf die Antireflexionsschicht aufgebracht, um die Reflexionsverluste auf nur noch 3% herabzusetzen. Abbildung 22 zeigt eine Mikroskopaufnahme von solchen invertierten Pyramiden auf der Siliziumoxidoberfläche.

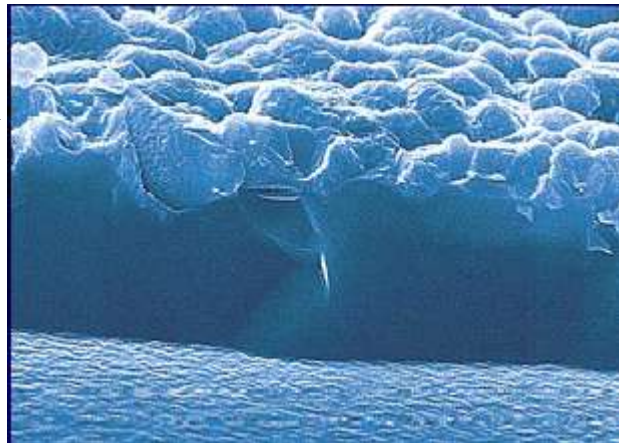


Abb. 22: mikroskopische Aufnahme der Strukturen

8.3. Silizium

Zum einen gibt es amorphes Silizium, welches keine Periodizität besitzt (Abbildung 23). Amorphes Silizium besitzt eine direkte Bandlücke von 1,7 eV. Der Vorteil bei Benutzung von amorphen Silizium-Solarzellen ist die Möglichkeit der monolithischen Verarbeitung und das Vorhandensein einer direkten Bandlücke. Ein wesentlicher Nachteil der amorphen Silizium-Solarzelle ist der sehr geringe Wirkungsgrad von nur 5 %-7% in der Anwendung. Ein weiterer Nachteil von amorphen Silizium-Solarzellen sind die auftretenden Stabilitätsprobleme, da sich die Wasserstoffatome aus

dem Atomverband lösen und den Wirkungsgrad herabsetzen. Dieses Problem könnte man durch Erhitzen der Zelle bei rund 160 °C beheben, was aber in der Realität sehr kostspielig sein würde. Daher werden hauptsächlich amorphe Siliziumsolarzellen

in Taschenrechnern und ähnlichem verwendet. Zur Einspeisung ins öffentliche Netz bzw. zur Stromerzeugung im Haushalt verwendet man derzeit meist kristallines Silizium. Bei kristallinem Silizium unterscheidet man zwischen monokristallinem und polykristallinem Silizium. Monokristallines Silizium besteht aus Einkristall-Material, polykristallines Silizium aus Kristalliten im Millimeter- bis Zentimeter Bereich. Im Gegensatz zu amorphen Silizium-Zellen ist die Herstellung von

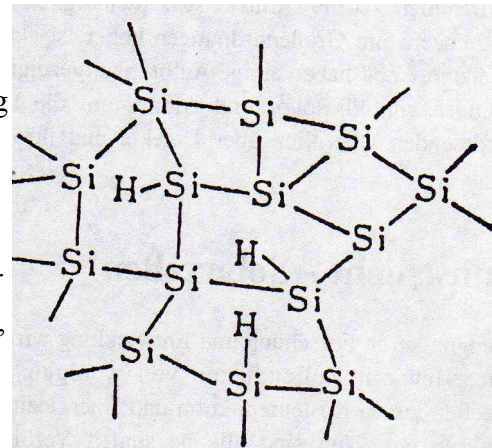
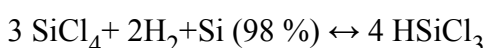


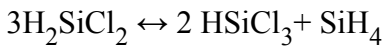
Abb. 23: amorphes Silizium

kristallinen Silizium-Zellen aufwendiger, wobei die Herstellung von monokristallinen Siliziumsolarzellen noch kostspieliger ist als die von polykristallinen Solarzellen. Kristallines Silizium besitzt eine indirekte Bandlücke, so dass dickere Schichten als bei Vorliegen einer direkten Bandlücke verwendet werden müssen, um gleich große Lichtabsorption zu erreichen. Die großen Vorteile zum amorphen Silizium sind der viel höhere Wirkungsgrad (13 %-17 %) und die wesentlich geringere Degradation kristalliner Zellen.

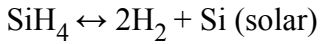
8.4. Vom Rohsilizium zum Solarsilizium

Die Herstellung von hochreinem Solarsilizium erfolgt in mehreren Schritten. Durch Reaktion von Siliziumdioxid bei 1800°C mit Kohlenstoff entsteht zu 98 % reines Silizium. Dieses Silizium wird als Ausgangsmaterial genutzt und in einem Wirbelschichtreaktor durch Hydrochlorierung des Siliziums von unerwünschten Bestandteilen gereinigt. Das Silizium wird mit Chlorwasserstoff in einen Wirbelschichtreaktor eingebracht und reagiert dort mit Chlor. Dabei entstehen die gasförmigen Siliziumverbindungen Trichlorsilan und Tetrachlorsilan. Andere Verunreinigungen werden mit dem Chlor Salze bilden und entfernt. Das entstehende Tetrachlorsilan wird in einem weiteren Verfahren zur Hydrochlorierung von Silizium eingesetzt. Trichlorsilan und Tetrachlorsilan lassen sich in einem weiteren Arbeitsschritt zu Silan reduzieren.





In der Silanpyrolyse, die ebenfalls im Wirbelschichtreaktor stattfindet, wird das Silan durch ein Rohrleitungssystem mit Wasserstoff vermischt und bei 500 °C-800 °C bei einem Überdruck von 0,2- 0,3 bar zu Silizium und Wasserstoff zersetzt.



Das entstandene Solarsilizium hat eine Reinheit von 99,999999 %. Restliches Silan wird in einer Nachverbrennung mit Sauerstoff zu Siliziumoxid verbrannt und somit unschädlich gemacht.



Abb.24: Quarzsand

8.5. Kristallsäulen

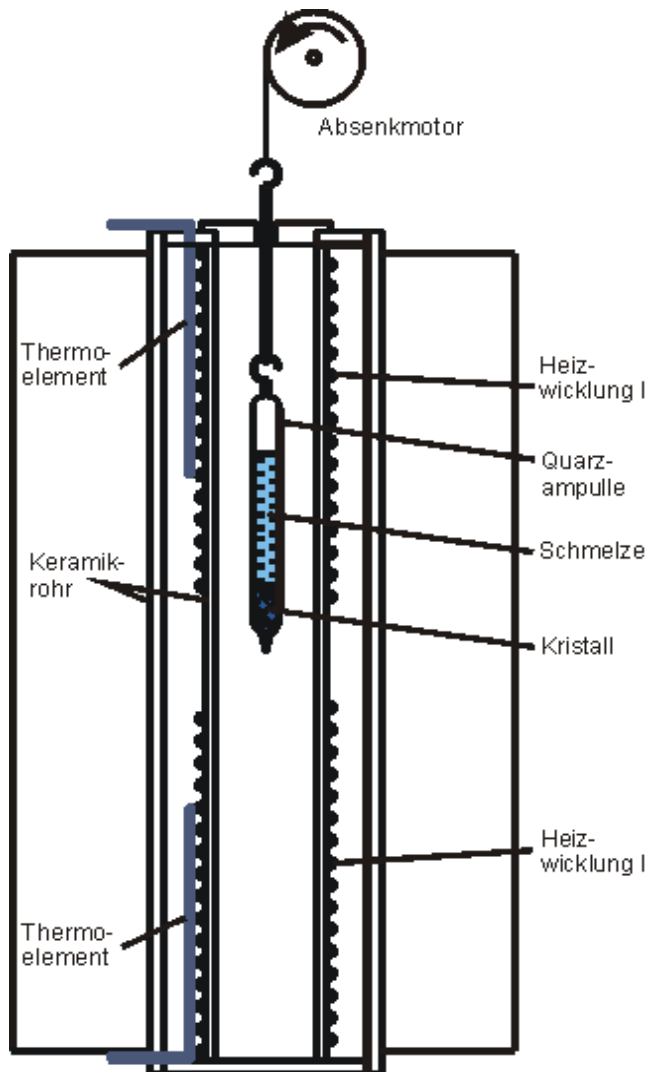


Abb. 25: Apparatur zum Bridgman-Verfahren

Beim Bridgman-Verfahren zur Herstellung polykristallinen Solarsiliziums wird das Reinstsilizium in eine Quarzampulle gefüllt. Zu diesem Reinstsilizium wird eine Grunddotierung mit Bor (10^{15} - 10^{17} cm^{-3}) zugegeben. Das Reinstsilizium wird in der Quarzampulle aufgeschmolzen und anschließend so im Ofen hochgezogen, dass sich der untere Bereich des Siliziums in der Quarzampulle langsam abkühlt und verfestigt, wobei sich im oberen Teil noch flüssiges Silizium befindet. Somit erzeugt man Polykristall-Säulen, die ungefähr 70 cm lang sind und Durchmesser von 25 cm besitzen. Mit diesem Verfahren gelingt eine Ausbeute von rund 60 %. Die anderen 40 % können erneut wiederverwertet werden, indem sie erneut eingeschmolzen werden.



Abb. 26: Siliziumkristall

8.6. Wafer

Die entstandenen Kristallsäulen schneidet man mit einer Drahtsäge in 0,25 bis 0,3 mm dicke Scheiben. Dabei entsteht durch Sägemehl ein Materialschwind von rund 50 %. Das Sägemehl kann nach Durchlaufen von Reinigungsprozessen wiederverwertet werden und geht dem System so nicht verloren.



Abb. 27 : Kristallsäule

Die entstandenen Wafer werden poliert und durch Oberflächenbehandlung in chemischen Bädern von weiteren Verunreinigungen befreit. Abbildung 28 zeigt solche Wafer mit angebrachten integrierten Schaltungen.

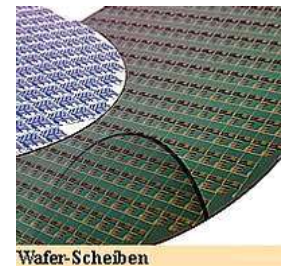


Abb. 28 : Wafer

8.7. Herstellung des pn-Übergangs

Die p-dotierte Schicht wurde, wie oben beschrieben, einfach durch die Zugabe von Bor in das Reinstsilizium als Wafer hergestellt. Die n-dotierte Schicht wird durch Diffusionsverfahren zwischen 800 °C und 1200 °C aufgebracht. Meistens wird Phosphor zur Dotierung der n-Schicht benutzt. Die Siliziumscheiben werden dazu in die konstante Temperaturzone eines Ofens gebracht. In Abbildung 29 ist ein Verfahren mit gasförmigen Diffusanten gezeigt. Stickstoff und Sauerstoff werden in einem bestimmten Mischungsverhältnis mit dem Dotiergas (Phosphin) in den Ofen eingelassen. Die Dotiergase reagieren mit dem Sauerstoff und es bildet

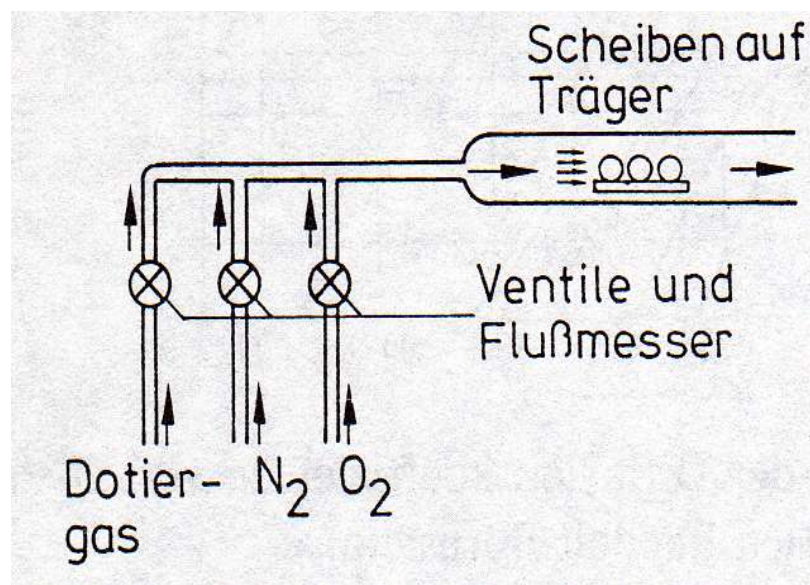
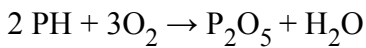


Abb. 29: Prinzip des Diffusionsverfahrens

sich Siliziumoxid auf der Oberfläche. Das Phosphin wird zu Phosphorpentoxid umgesetzt. Das

entstandene P_2O_5 bindet sich mit dem Siliziumdioxid auf der Oberfläche zu Phosphorsilicatglas, welches die Diffusionsquelle bildet.



Um eine bestimmte Dicke der n-Schicht in das p-dotierte Wafer-Material zu diffundieren, bedarf es genauer Regelung von Zeit, Temperatur, Auf- und Abkühlphasen. Durch gezieltes langsames Abkühlen können Fremdstoffe wie zum Beispiel Metalle durch ihre sinkende Löslichkeit bei tieferen Temperaturen und hohen Diffusionsgeschwindigkeiten an die Oberfläche des Siliziums wandern.

8.8. Solarzellen

8.8.1 Siebdrucksolarzelle

Die Siebdrucksolarzelle besteht aus einem 300µm dicken Wafer, einem Back-Surface-Field, welches hinten an die p-Basis diffundiert wird. Auf das Back-Surface-Field wird der Rückkontakt aufgebracht. Die Antireflexionsschicht aus Titandioxid oder Siliziumnitrid wird vorne auf die n-Schicht aufgedampft. Zudem werden Leiterbahnen so in die Antireflexionsschicht eingebracht, dass Kontakt zur n-Schicht besteht, damit die überschüssigen Elektronen dem Stromtransport zur Verfügung gestellt werden können. Gebondete Kupferbändchen ermöglichen den Kontakt zur nächsten Zelle. Mit Siebdrucksolarzellen erreicht man einen Wirkungsgrad von bis zu 14,5%.

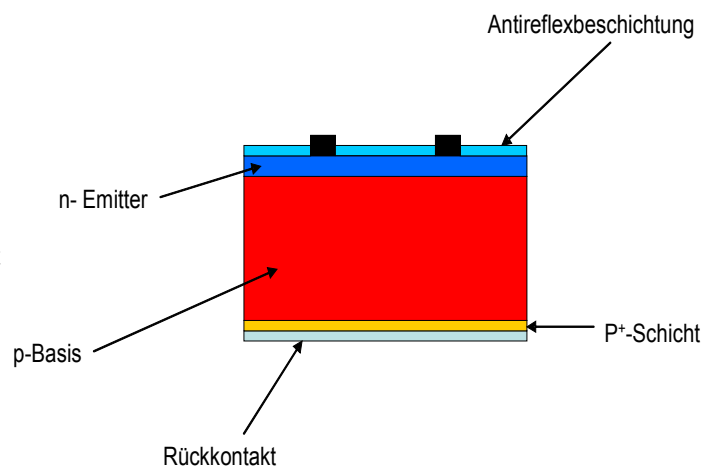


Abb. 30: Siebdrucksolarzelle

8.8.2 Buried-Contact-Solarzelle

Diese Solarzelle ist ähnlich der Siebdrucksolarzelle aufgebaut. Allerdings sind hier zusätzlich 30 µm breite Gräben in die n-Schicht durch Laserschneiden erzeugt worden. Diese Gräben werden mit

einer n^{++} -Schicht versehen. Auf die n-Schicht wird hier im Gegensatz zur Siebdrucksolarzelle noch eine n^+ -Schicht aufgebracht, um Rekombinationsverluste auch in der n-Schicht zu verringern. Die Frontkontakte, auch Leiterbahnen genannt, sind in den Gräben angebracht und verringern so die Abschattungsverluste. Die Absorptionsverluste werden dabei noch durch eine pyramidenartige Siliziumdioxid-Schicht verringert. Der Rückkontakt besteht aus einer Nickel-Kupfer-Verbindung. Mit Buried-Contact-Solarzellen lassen sich durch diese Optimierungen in der Praxis Wirkungsgrade von bis zu 17 % erreichen. Allerdings ist die Herstellung dieses Solarzellen-Typs weitaus aufwändiger als die von Siebdrucksolarzellen.

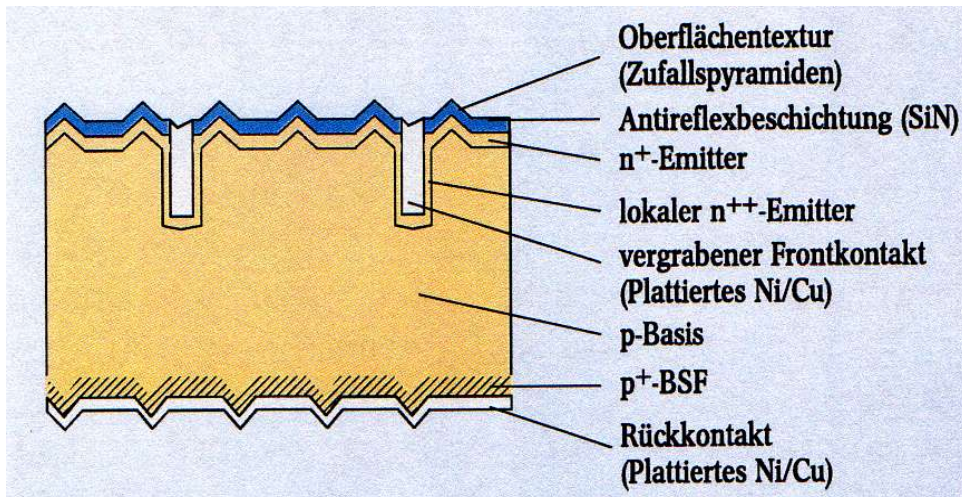


Abb. 31: Buried-Contact-Solarzelle

8.9. Modulbildung

Die maximal erreichbare Spannung einer kristallinen Solarzelle liegt bei 0.5 V. Um eine Spannung oder einen Strom gewünschter Stärke zu bekommen, muss man rund 40 Zellen in Reihe und parallel schalten. Der Nachteil von Modulen ist, dass immer nur der Strom fließen kann, der durch die schwächste Zelle begrenzt wird. Wenn zum Beispiel eine Zelle durch den Schatten eines Astes verdeckt wird, entsteht dort eine sehr große Wärmeentwicklung, da ihr Innenwiderstand groß ist, die Zelle würden somit innerhalb kürzester Zeit kaputt gehen. Um diesen Effekt der Erhitzung zu umgehen, schaltet man parallel zu den Zellen Dioden, über die der Strom zur nächsten Zelle umgeleitet wird. Die Solarzellen sind meist zwischen zwei Glasplatten befestigt, die selbst Golfball-großen Hagelkörnern standhalten.



Abb. 32: Modul

8.10. Solarzellensysteme

Es gibt netzgekoppelte Anlagen und Inselanlagen. Bei den netzgekoppelten Anlagen besteht die Möglichkeit der Einkopplung des erzeugten Stromes in das öffentliche Stromnetz. Zuvor muss ein Wechselrichter allerdings den erzeugten Gleichstrom des Solarzellen-Moduls in Wechselstrom umwandeln.

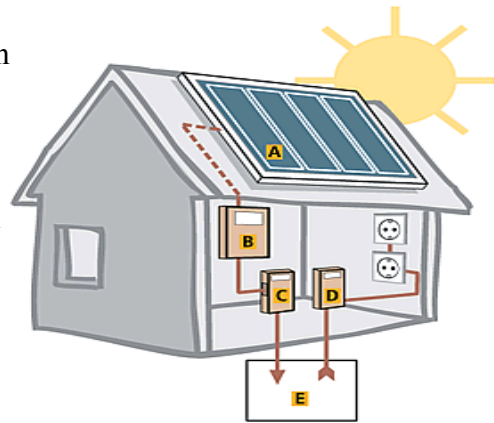


Abb. 33: Netzgekoppelte Anlage



Der Betrieb bei Inselanlagen ist in abgelegenen Bergregionen oder auf Halligen sehr vorteilhaft. Die erzeugte Energie am Tag wird in einer Batterie gespeichert, so dass man auch nachts Strom nutzen kann. Allerdings ist der Wirkungsgrad der Batterien nicht sehr groß, und man hat einen relativ großen Verlust.

Abb. 34: Inselanlage

9. Vorteile und Nachteile der kristallinen Siliziumsolarzelle

Ein enormer Vorteil bei der Herstellung von Silizium-Solarzellen ist das fast unerschöpfliche Rohmaterial-Vorkommen. Allerdings ist das Herstellungsverfahren sehr aufwendig und teuer. Kristalline Siliziumsolarzellen haben eine sehr lange Laufzeit von fast 40 Jahren. Danach können die Zellen durch erneutes Einschmelzen wieder verwertet werden. Sie sind nicht toxisch, wie zum Beispiel Gallium-Arsenid-Zellen, die bei Zerstörung Giftstoffe freisetzen. Da die Solarzellen zwischen zwei robusten Glasscheiben liegen, sind die Zellen auch sehr stabil. Meistens werden die Zellen in einem bestimmten Neigungswinkel auf Dächern angebracht, so dass sie durch den Regen gereinigt werden. Bei Solarzellen auf Flachdächern muss mehrmals im Jahr das Laub bzw. der Schnee abgefegt werden. Nachteil von Siliziumsolarzellen ist ein relativ schlechter Wirkungsgrad von nur 19 %. Außerdem sind Solarzellen generell nicht grundlastfähig, da ihre Energieproduktion extremen zeitlichen Schwankungen unterliegt. Bei Inselanlagen oder Anlagen, die den erzeugten Strom in einer Batterie speichern, sind ebenfalls Verluste bei der Nutzung der gespeicherten Energie

zu erwarten.

10. Zukunft

10.1. Tandemsolarzelle

Tandemzellen sind Solarzellen aus verschiedenen Materialien mit verschiedenen Bandlücken. Die Bandabstände nehmen bei diesen Solarzellen zum Rückkontakt hin ab. Das obere Material sollte eine Bandlücke von 1,9 eV besitzen, das untere Material eine Bandlücke kleiner als 1,4 eV. So wird das langwellige Licht, welches im obersten

Material nicht absorbiert wird, im zweiten Material absorbiert und geht dem Absorptionsprozess nicht verloren, wie bei einer Solarzelle mit nur einem Bandabstand. Abbildung 35 zeigt eine solche Tandemsolarzelle aus

CuGaSe_2 und CuInSe_2 . Um eine optimale Nutzung der eingestrahlt Leistung zu erzielen, ist es möglich auch Zellen mit mehreren Materialien unterschiedlicher Bandlücke herzustellen, um maximale Absorption zu erhalten. Die Thermalisierungsverluste werden

verringert, da die „überschüssige“ Energie

durch Tandemzellen genutzt wird (siehe Thermalisierungsverluste Kapitel 8.1). Als Rückseite wird ein Metallkontakt angebracht. Eine Antireflexionsschicht wird ebenfalls wie bei der

Siliziumsolarzelle aufgebracht. Die Leiterbahnen werden zum Abtransport der Elektronen benutzt.

Das Problem dieser Solarzelle besteht darin, dass immer nur der kleinste erzeugte Strom fließt.

Deshalb versucht man, die Ladungsträger nach der ersten Zelle abzuziehen. Es wird versucht, eine Leiterschicht zu finden, die den Abtransport der Elektronen ermöglicht, aber auch gleichzeitig das nicht absorbierte Licht durchlässt, so dass es in der zweiten Zelle absorbiert werden kann.

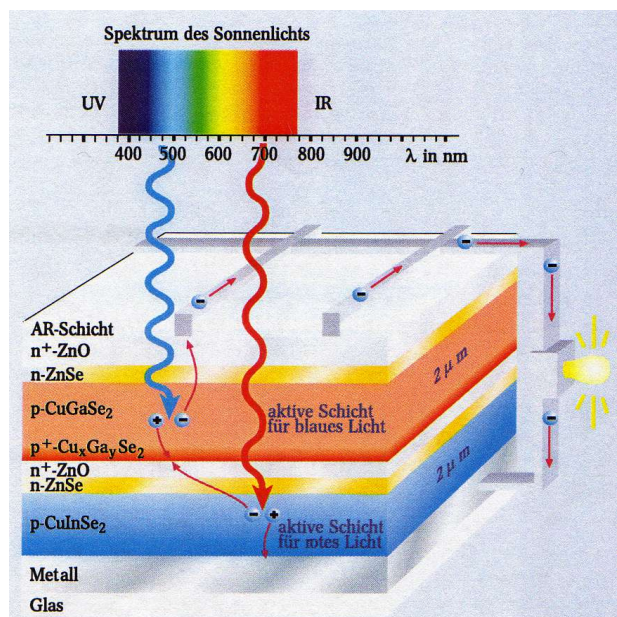


Abb. 35: Tandemsolarzelle

11. Daten

Die Produktionsdaten der letzten 7 Jahre sind in Abbildung 36 aufgezeigt. Man erkennt den enormen Megawattpeak-Zuwachs im Zeitraum von 1998 bis 2005 in Deutschland. Die Angaben in Megawattpeak beziehen sich auf Normbedingungen von 25 °C und einer Sonneneinstrahlung von AM 1,5.

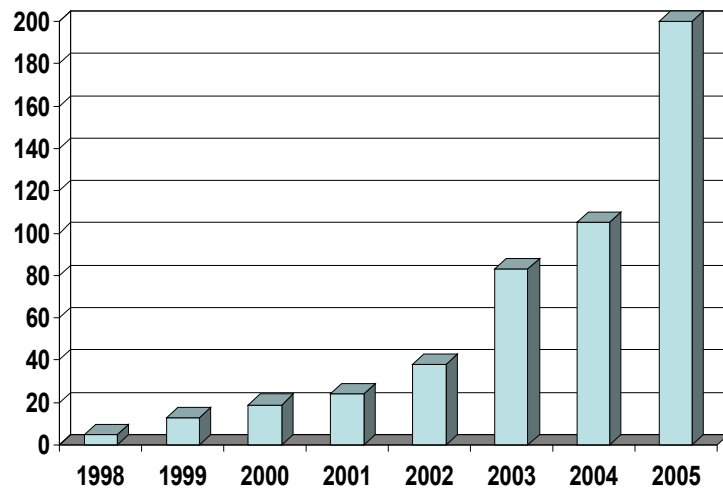


Abb. 36. Produktionsdaten der letzten Jahre

12. Kostenkalkulation

Als Beispiel soll im Folgenden eine typische Hausdach-Solaranlage betrachtet werden. Eine Solarzellenanlage von 40 qm² mit einer Leistung von 20 kW_p auf einem Haus in Duisburg mit einer Sonneneinstrahlung von 1000 kWh/m²a ergibt einen Jahresertrag von 870 kWh/ksW_pa.

Die Anschaffungskosten für eine solche polykristalline Siliziumsolarzellenanlage betragen rund 18000 €. Nach dem Gesetz für erneuerbare Energien erhält man pro eingespeister kWh ins öffentliche Stromnetz 54,5 Cent vom lokalen Stromanbieter. Nach rund 10 Jahren haben sich mit einem Ertrag von ungefähr 1900 € im Jahr die Investitionskosten amortisiert.



Abb. 37 Solarsystem



Abb.38 Solarsystem auf Wohnhaus

- Physics of Solar Cells, From Principles to New Concepts, Peter Würfel, 2005
- Sonnenenergie: Photovoltaik, A. Goetzberger/ B.Voß/J. Knobloch, B.G. Teubner Stuttgart
- Physikalische Blätter, 57 (2001) Nr.11, Strom von der Sonne
- Physikalische Blätter, 56 (2000) Nr.9, Solarzellen und Mikrochips von morgen
- Physik Journal, 2 (2003) Nr. 12, Solarzellen der dritten Generation
- Physics of semiconductor devices, 2 nd Edition S.M. Sze, Wiley Interscience
- Fundamentals of solar cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion, Fahrenbruch/ Bube, Academic Press
- Fundamentals of solar cells, photovoltaic solar energy conversion, Alan L. Fahrenbruch, Richard H. Bube
- Halbleiterbauelemente I, Halbleiter und Halbleiterdioden, W. Guggenbühl, M.J.O. Strutt, W. Wunderlein
- Einführung in die Festkörperphysik, Ch. Kittel, 13. Auflage
- Festkörperphysik, Ibach Lüth, 5. Auflage
- Vorlesung Halbleiterstrukturen, Prof. A. Lorke
- Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond, Physica E 14 (2002) 65-70
- Wissen Forschung, Sonnenenergie 3/2002 (Mai), Unabhängigkeitstreben
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle#/D.C3:BCnnschichtzellen>
- <http://www.huv-direct.de/solarstrom/faq/page/3/>
- <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB110-05.htm>
- <http://www.euroquarz.de/de/main/silicium.html>
- http://www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph10/musteraufgaben/16sonne/berghuette/huette.htm
- <http://www.lexsolar.de/index.asp?sid=9>
- http://www.sharp.de/produkte/solar/pv_technik.php?site=pv
- http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:monokristalines_Silizium_f%C3%BCr_die_Waferherstellung.jpg
- <http://physik.uni-paderborn.de/einrichtungen/kristall-und-materiallabor/bridgman-verfahren/>
- <http://www.grotkasten.de/phahn/bildanl.htm>
- <http://www.answers.com/topic/bp-solarmodul-jpg>
- <http://www.bauzentrale.com/news/2004/1frame.htm?1672.php4>
- http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals1/index_e.html