
KENNLINIEN VON SOLARZELLEN

FP PHYSIK
UFERSTRASSE 90
CH-4057 BASEL
FÜR DIESEN VERSUCH GIBT ES 1 PUNKT

MAY 6, 2021

Abstract

In diesem Versuch werden Kennlinien von Solarzellen bei verschiedenen Temperaturen und Bestrahlungsstärken gemessen. Daraus werden Werte für die entsprechenden Kennzahlen und die daraus folgenden Grössen, sowie deren Abhängigkeit von den experimentellen Parametern bestimmt.

1 Einleitung

Ziel des Versuches ist, die Abhängigkeit verschiedener Kenngrößen von Solarzellen von Temperatur und Beleuchtungsstärke zu untersuchen. Dazu gehören die Offene Klemmspannung V_{OC} , der Kurzschlussstrom I_{SC} , der Punkt der maximalen Leistung (Maximum Power Point, MPP), der Füllfaktor (FF) und der Wirkungsgrad (η). Dazu wird der durch das einfallende Licht erzeugte Strom (I) in Abhängigkeit einer angelegten Spannung (V) gemessen, und in einer IV-Kennlinie dargestellt. Man macht sich im Rahmen des theoretischen Hintergrundes mit der Funktionsweise von Solarzellen vertraut und leitet die erwarteten Abhängigkeiten aus dem Ein-Dioden Modell her. Anschliessend werden die gemessenen Daten ausgewertet und die Resultate mit der Theorie verglichen, diskutiert und eingeordnet. Im anschliessenden Protokoll soll in die Thematik eingeführt sowie der Versuch kurz motiviert und Theorie, Versuchsdurchführung und Ergebnisse sauber dargestellt werden. Für ein abgeschlossenes Protokoll wird ein Punkt vergeben.

2 Theorie und Versuch

2.1 Theorie

Die theoretischen Grundlagen, die diesem Versuch zugrunde liegen, sind im wesentlichen die Physik von (dotierten) Halbleitern und, damit verbunden, pn-Übergängen. Dies ist zusammen mit einer Einführung in die Grundlagen der Photovoltaik in den Kapiteln 3 und 4.1 - 4.4 in der Diplomarbeit von Frank Jakobides [1] zusammengefasst, welche der Anleitung angehängt sind. Selbstverständlich können auch andere Quellen verwendet oder zum Vergleich herangezogen werden.

2.2 Versuch

2.2.1 Grundlagen

Der Versuchsaufbau beinhaltet im Wesentlichen eine Halogenlampe und eine Solarzelle. Die Temperatur der Solarzelle kann mittels des Peltierelements, auf dem sie montiert ist, eingestellt werden. Die Beleuchtungsstärke wird mit Hilfe der verfügbaren Transmissionsfilter geregelt. Zur Handhabung des Peltierelements und der Halogenlampe, lies den Abschnitt **Versuchsdurchführung** ausführlich und beachte die dort aufgelisteten Sicherheitshinweise. Um die Beleuchtungsstärke zu messen, steht ein Lux meter zur Verfügung.

2.2.2 Versuchsdurchführung

Beachte zu jeder Zeit die folgenden Sicherheitshinweise:

- Vorsicht vor Verbrennungen! Sowohl die Halogenlampe, als auch das Peltierelement können sehr heiss werden. An beiden Geräten sind Lüfter installiert, welche vor Betrieb der Lampe und des Peltierelements eingeschaltet werden müssen.
- Die Temperaturänderungen sollten nicht zu rasch erfolgen, da das schädliche Auswirkungen auf das Peltierelement haben kann. Falls das Peltierelement überhitzt, ertönt

ein Warnsignal. In diesem Fall sollte das Regelgerät sofort ausgeschaltet werden. Dies kann ebenfalls passieren, wenn der Lüfter nicht fachgerecht betrieben wird. Die Set-Temperatur am Regelgerät sollte 80° nicht überschreiten.

- Die Halogenlampe sollte nie zu lange eingeschaltet sein, weil sich sonst eine enorme Hitze bildet. Die Belüftung muss deshalb bei jedem Starten der Lampe eingeschaltet sein.
- Die Filter sind relativ empfindlich und sollten mit mit Vorsicht gehandhabt werden!

Für die Messung werden Temperatur und Beleuchtungsstärke eingestellt, dann wird der von der Solarzelle erzeugte Strom in Abhängigkeit der angelegten Spannung gemessen. Aus dem Quotient der Werte ergibt sich ein Widerstand, welchem ein linearer Hintergrund überlagert ist. Dieser Hintergrund kommt durch den konstanten Materialwiderstand der Solarzelle ($\approx 1 \text{ k}\Omega$) zustande und muss von den Daten subtrahiert werden um korrekte Kurven zu erhalten. Dieser Prozess ist in der Messsoftware implementiert und es muss lediglich die lineare IV-Kurve eines entsprechenden Widerstandes gemessen werden. Dieser liegt dem Versuchsaufbau bei und man wird von der Software beim ersten Öffnen durch den Prozess geführt.

Achtung: Der Hintergrund wird von allen Kurven subtrahiert solange das Programm offen ist. Wird es geschlossen und wieder geöffnet, muss die Kalibration erneut durchgeführt werden.

Ziel des Versuches ist es, die Abhängigkeit der Kennlinien von der Temperatur und der Beleuchtungsstärke zu untersuchen. Um diese Abhängigkeiten festzustellen müssen

1. Kurven bei fixer Temperatur und variabler Beleuchtungsstärke
2. Kurven bei fixer Beleuchtungsstärke und variabler Temperatur

gemessen werden. Um den Versuch auswerten zu können sind mindestens ein Satz der entsprechenden Daten vonnöten. Selbstverständlich können je nach Interesse auch weitere Daten aufgezeichnet werden (eine weitere Serie mit variabler Beleuchtungsstärke bei einer anderen Temperatur, dieselben Messreihen zum Vergleich mit einer anderen Solarzelle, etc.). Wähle dabei die Temperaturschritte nicht zu gross und nicht zu klein. Steps von etwa 5° sind ein guter Richtwert. Nach Beendigung des Versuchs sollten die Daten gesichert, die Lampe, das Peltierelement und nach einiger Zeit auch die Lüfter ausgeschaltet werden. Hinterlasst den Arbeitsplatz bitte ordentlich und meldet Fehlfunktionen oder fehlendes Equipment dem Assistenten, falls euch etwas auffällt.

3 Auswertung und Protokoll

Aus den gemessenen Daten könnt ihr nun Werte für den Kurzschlussstrom I_{SC} , die Leerlaufspannung V_{OC} und den Punkt der maximalen Leistung (Maximum Power Point, MPP) bestimmen. Daraus lassen sich weiter der Füllfaktor FF und den Wirkungsgrad bestimmen. Die Abhängigkeit dieser Größen von Temperatur und Beleuchtungsstärke

sollen im Anschluss graphisch dargestellt und mit dem aus der Theorie erwarteten Verhalten verglichen werden. Die Resultate sollen dann diskutiert und eingeordnet werden. Dabei empfiehlt sich folgendes Vorgehen:

1. Lest euch die angehängten Theoriekapitel gründlich durch. Aus den Gleichungen 4-1, 4-8, 4-9, 4-11 und 4-12 können die erwarteten Abhängigkeiten abgeleitet werden. Macht euch bewusst, aus welchem Modell die Gleichungen kommen und welche Limitationen sie haben.
2. Stellt exemplarisch eine eurer gemessenen Kurven graphisch dar. Macht deutlich wo ihr die Kennzahlen auslest.
3. Lest alle Kennzahlen für die gemessenen Daten aus, berechnet mit den entsprechenden Formeln aus den Theoriekapiteln die Folgewerte (FF, MPP) wie oben beschrieben.
4. Stellt die Werte Graphisch in Abhängigkeit jeweils von Temperatur und Beleuchtungsstärke dar. Dabei können beispielsweise auch Daten mehrerer Serien mit variabler Beleuchtungsstärke bei verschiedener Temperatur oder sowohl ein IV als auch ein PV diagramm in ein Diagramm (ggf mit zwei verschiedenen Y-Achsen) geplottet werden, beachtet bitte dabei aber die Skalierungen und die richtige Beschriftung der Achsen.
5. Überprüft ob ihr die entsprechenden Abhängigkeiten reproduzieren könnt. Wenn ja, wie präzise ist das Ergebnis? Wenn nicht, woran kann es gelegen haben?
6. Versucht die Daten mit passenden Funktionen zu fitten.
7. Macht euch Gedanken wie die Ergebnisse zu interpretieren und einzuordnen sind, diskutiert dies in einem separaten Abschnitt.

Protokolliert den Versuch gründlich in einem flüssigen Text, nicht zu lang und nicht zu kurz. Beachtet dabei bitte folgende Hinweise:

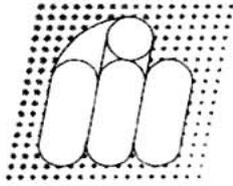
- In der Einleitung sollte eine kurze Einführung in das Thema und eine Motivation für den Versuch sowie eine kleine Zusammenfassung stehen. Ihr müsst dabei nicht die vollständige Geschichte der Solarzelle erörtern, sondern eher kurz erklären warum diese Art der Energieerzeugung relevant für Gegenwart und Zukunft ist. Führt dafür am besten eine kleine Recherche durch.
- Der Theorieteil sollte die in Abschnitt 2.1 aufgeführten Grundlagen kurz zusammenfassen und die Formeln für die entsprechenden erwarteten Abhängigkeiten herleiten. Auch hier müsst ihr nicht tief in die Quantenmechanik einsteigen sondern nur so viel verwenden wie ihr auch für das Verständnis im Rahmen der Auswertung benötigt.
- Macht euch bei der Beleuchtungsstärke bewusst, was ihr mit dem Gerät messt und ob die Beleuchtungsstärke gegebenen Falls in Watt umgerechnet werden kann. Wo sind dabei Probleme? Wie hängt das mit der Halogenlampe zusammen? Tipss dazu findet ihr zum Beispiel in [2] und [3] oder in entsprechender weiterer Literatur.

- Stellt eure Daten sauber dar! Wertetabellen können in manchen Situationen Sinnvoll sein, ersetzen aber in der Regel nicht eine graphische Darstellung, speziell wenn nach gewissen Abhängigkeiten gesucht wird.
- Überlegt euch in der Diskussion wo ihr in der Messung den grössten Fehler macht (was am wenigsten genau zu bestimmen ist) und interpretiert eure Daten entsprechend. Hier empfiehlt es sich, mit der Literatur zu vergleichen und den Versuch in Relation dazu zu betrachten. Wo sind die Unterschiede? Woher kommen eventuelle Abweichungen in den gemessenen Daten?

Viel Spass und fragt lieber einmal zu viel als zu wenig nach!

References

- [1] Frank Jakobides. Nutzung empirischer Datensätze zur Bestimmung der Modellparameter für Solarzellen auf der Basis von kristallinem und amorphem Silizium. *Diplomarbeit, Fachhochschule Magdeburg*, 2001.
- [2] <https://ledtipps.net/lux-watt-umrechnung/>. Accessed: 2021-05-05.
- [3] <https://www.rapidtables.com/calc/light/lux-to-watt-calculator.html>. Accessed: 2021-05-05.



**fachhochschule
magdeburg**

Fachbereich Elektrotechnik

Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades eines Diplom-Ingenieurs für Elektrotechnik (FH)

an der

Fachhochschule Magdeburg

Thema: „Nutzung empirischer Datensätze zur Bestimmung der Modellparameter für Solarzellen auf der Basis von kristallinem und amorphem Silizium“

Angefertigt für: Hochschule Magdeburg-Stendal,
Fachbereich Elektrotechnik

Eingereicht von: **Frank Jakobides**

Matrikel: E 96

Ausgabetermin: 15. Dezember 2000

Abgabetermin: 15. März 2001

Schulischer Betreuer: Prof. Beyer

Betrieblicher Betreuer: Prof. Seidl

.....
Dekan

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

3 Grundlagen der Photovoltaik

3.1 Halbleitertheorie

Für das Verständnis der Vorgänge in einer Solarzelle ist es notwendig, einige physikalische Grundlagen im Vorfeld zu erörtern.

So werden im folgenden die wichtigsten Eigenschaften von Halbleitern (Eigenleitfähigkeit, Dotieren) und die Vorgänge an einem p/n- Übergang erläutert, bevor auf das Funktionsprinzip einer Solarzelle eingegangen wird.

3.1.1 Eigenschaften von Halbleitern

Die direkte Umwandlung von Licht in elektrische Energie ist nur mit Halbleitermaterial möglich. Ein Halbleiter ist ein Festkörper, dessen spezifische elektrische Leitfähigkeit wie bei Metallen auf bewegliche Ladungsträger beruht. Nach der Höhe der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit, welche von der Menge und besonders der Beweglichkeit der Ladungsträger abhängt, lassen sich Feststoffe in folgende 3 Kategorien einteilen.

- Leiter:
 - Leitfähigkeit $\sigma > 10^4 (\Omega\text{cm})^{-1}$
 - Elektronen sind frei im Kristall beweglich, damit ist eine Leitfähigkeit gegeben

- Isolatoren (Nichtleiter)
 - Leitfähigkeit $\sigma < 10^{-8} (\Omega\text{cm})^{-1}$
 - Elektronen sind fest an ihre zugehörigen Atome gebunden, die Folge ist keine Leitfähigkeit, da keine freien Ladungsträger existieren (bzw. sehr wenig).

- Halbleiter
 - Leitfähigkeit $10^{-8} < \sigma < 10^{-4} (\Omega\text{cm})^{-1}$
 - Elektronen sind an ihren zugehörigen Atomen schwach gebunden. Eine Energiezufuhr kann die Bindungen auflösen. Die Leitfähigkeit hängt von der Menge der zugeführten Energie und der physikalischen Beschaffenheit des Materials ab.

Dies ist nur eine sehr einfache Methode zur Klassifizierung. Es gibt weitere Eigenschaften, insbesondere das Temperaturverhalten der spezifischen Leitfähigkeit, welche ausschlaggebend für die Einordnung sind. So nimmt bei Metallen die spezifische elektrische Leitfähigkeit mit steigender Temperatur ab, während sie bei Halbleitern zunimmt.

In [5, S. 18] wird folgendes Zitat von *Madelung* zur Charakterisierung von Halbleitern verwendet:

„Halbleiter sind kristalline Festkörper, die in reinem Zustand in der Nähe des absoluten Nullpunktes der Temperatur isolieren, bei höheren Temperaturen jedoch entweder eine eindeutig nachweisbare elektronische Leitfähigkeit besitzen, durch Störung des idealen Gitteraufbaus eine Leitfähigkeit erhalten, oder bei welchen zumindest durch äußere Einwirkung eine Leitfähigkeit erzwungen werden kann.“

An dieser Stelle wird das Bändermodell vorgestellt. Es dient zur Beschreibung der Vorgänge in Festkörpern.

In Festkörpern existieren Energiebänder, in denen sich die Elektronen aufhalten dürfen. In der Modellvorstellung von Festkörpern unterscheidet man zwischen Leitungs- und Valenzband. Das Valenzband ist der Energiebereich der Elektronen eines Kristalls, in dem sie zur chemischen Bindung beitragen. Das Valenzband beschreibt also einen Bereich niedriger Energie. Zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband, höherer Energiebereich, liegt ein verbotener Bereich bzw. Zone. Das Leitungsband beschreibt einen Energiebereich, in dem die Elektronen frei beweglich sind und so eine elektrische Leitfähigkeit ermöglichen. Die Bänder entstehen aus den Energieniveaus der Einzelatome durch gegenseitige Beeinflussung im Kristall.

Anhand des Bändermodells lassen sich auch die elektrischen Eigenschaften von Festkörpern erklären. In Metallen ist das Leitungsband halb-voll, bei Isolatoren und Halbleitern leer. Daraus folgt, daß bei Metallen die elektrische Leitfähigkeit groß ist und bei Isolatoren und Halbleitern sehr gering. Bei Halbleitern ist die Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband sehr gering, so daß Elektronen schon bei geringer Energiezu-

fuhr ins Leitungsband gelangen können und somit die Leitfähigkeit erhöhen. Dies erklärt die Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit bei Temperaturerhöhung bei Halbleitern.

In dieser Arbeit werden 2 Kategorien von Solarzellen betrachtet, zum einem auf der Basis von kristallinen Festkörpern (kristallines Silizium) und zum anderen auf der Basis von amorphen Festkörpern (amorphes Silizium).

Kristalline Substanzen zeichnen sich durch eine beinahe perfekte Periodizität der Anordnung der einzelnen Atome aus.

Bei amorphen Substanzen hingegen fehlt diese Periodizität der Atomanordnung fast vollständig.

Der heute auf der Welt wohl am meisten verwendete und somit bedeutendste Halbleiterwerkstoff ist Silizium (Si). Es wird aus Siliziumdioxid (SiO_2) gewonnen, welches in Quarzsand bzw. Quarzkristallen (Bergkristall) vorhanden ist. Weitere Halbleiter mit technischer Bedeutung sind Germanium (Ge), Selen (Se), Galliumarsenid (GaAs), Galliumphosphid (GaP), Indiumphosphid (InP), Indiumantimonid (InSb), Cadmiumsulfid (CdS), Cadmiumtellurid (CdTe) und Kupferindiumdiselenid (CuInSe_2 oder CIS).

Die nachfolgenden Erläuterungen der physikalischen Grundlagen der Photovoltaik erfolgen anhand von kristallinem Silizium. [4, 5]

3.1.2 Dotierung von Halbleitern

Die folgenden Ausführungen sind angelehnt an [4] und [5].

Die im vorhergehendem Kapitel erwähnte Eigenleitfähigkeit (spezifische elektrische Leitfähigkeit) liegt bei Silizium zwar über der von Isolatoren, ist aber noch sehr gering. Wie entsteht diese Eigenleitfähigkeit?

Silizium hat im Periodensystem der Elemente (PSE) die Ordnungszahl 14, das heißt es besitzt einen 14-fach positiv geladenen Atomkern und 14 Elektronen. Wie alle Elemente der 4. Hauptgruppe hat es 4 Valenz- oder Außenelektronen. Diese 4 Elektronen befinden sich auf der äußersten Schale und dienen als Bindungselektronen mit benachbarten Atomen.

Da jedes Atom das Bestreben nach einer stabilen Energiekonfiguration („Edelgaskonfiguration“ mit 8 Außenelektronen) hat, geht jedes Si-Atom eine sogenannte kovalente¹ Bindung mit 4 Nachbaratomen ein. Dabei steuert jedes an der Bindung beteiligte Atom 1 Elektron bei, das heißt eine Bindung besteht aus 2 Elektronen. Abbildung 3.1 veranschaulicht dies.

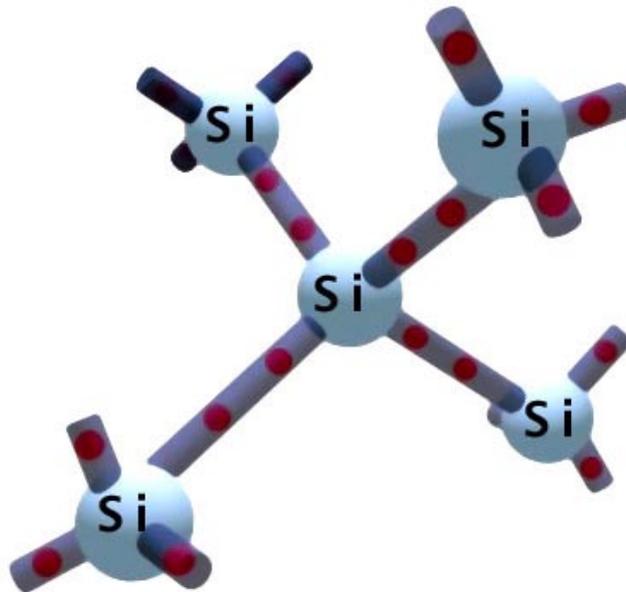


Abbildung 3.1: Vereinfachte Darstellung der räumlichen Struktur des Siliziumkristalls

Diese Bindungen bzw. Elektronenpaarbrücken sind bei Temperaturen nahe dem absolutem Nullpunkt geschlossen. Durch Energiezufuhr können diese Bindungen aufgebrochen werden. Die abgespaltenen Elektronen können sich dann bestimmte Zeiten im Halbleitergitter frei bewegen, bis sie aufgespaltene Bindungen wieder füllen. Das Aufspalten der Bindung wird auch als *Generation* bezeichnet. Bei der Abspaltung des Elektrons verbleibt eine Lücke in der Elektronenschale. Aufgrund dieser Lücke entsteht eine positive Elementarladung, da dem 14-fach positiv geladenem Atomkern ein Außenelektron fehlt. Diese Lücke wird als Defektelektron bezeichnet.

Das fehlende Elektron kann nun durch ein benachbartes aufgefüllt werden, welches an seiner Ursprungsstelle wiederum ein Loch hinterläßt,

¹ Atombindung (konvalente Bindung, homöopolare Bindung, unpolare Bindung) erfolgt ohne Ionisation, indem beide Atome ein gemeinsames Elektronenpaar bilden. Beispiel: zwei Chloratome (Cl) zu molekularem Chlorgas

Defektelektronen sind somit ebenfalls frei beweglich. Das Auffüllen von Löchern bezeichnet man als *Rekombination*.

Es entstehen also durch Energiezufuhr negative Ladungen (Elektronen) und positive Ladungen (Defektelektron), welche im Kristall wandern können und somit einen elektrischen Ladungstransport ermöglichen.

Je größer die Energiezufuhr ist, desto mehr Bindungen können aufgespalten werden und desto größer wird die Eigenleitfähigkeit des Halbleiters. Beim Auftreten der Eigenleitung herrscht Reaktionsgleichgewicht zwischen Generation und Rekombination.

Die Eigenleitfähigkeit von Silizium (bzw. Halbleiterstoffen) läßt sich auch auf anderem Weg beeinflussen. Durch Zusatz einer geringen Menge von geeigneten Fremdatomen kann die Leitfähigkeit wesentlich verändert werden. Dieser Vorgang wird als *Dotierung* bezeichnet.

Wie erwähnt ist das Dotieren, Einbringen von Fremdatomen, ein beabsichtigter Vorgang. Grundsätzlich muß gesagt werden, sollte ein Halbleiter sehr rein sein ($<1\text{ppb}^1$, in der Mikroelektronik), denn jede Verunreinigung stellt eine Störstelle dar, welche die spätere Funktion des Halbleiters negativ beeinflussen kann. Beim Dotieren werden geringe Mengen von Fremdatomen (rd. ein Fremdatom auf 1 Mio. Si-Atome) gezielt in den Halbleiter eingebracht.

Dabei kommen nur Elemente in Frage, die entweder höherwertig (ein Elektron mehr, z. B. Antimon mit 5 Valenzelektronen), oder niedrigerwertig (z. B. Bor mit 3 Valenzelektronen) sind.

Ersetzt man wie in Abbildung 3.2 gezeigt, ein Siliziumatom durch ein Antimonatom mit 5 Valenzelektronen, so können nur 4 Antimonelektronen durch die benachbarten Si-Atome gebunden werden. Das 5. Elektron löst sich sehr leicht von seinem Atomkern und läßt diesen positiv geladen zurück. Das Elektron selbst ist eine frei bewegliche negative Ladung.

(Cl2)
¹ ppb (part per billion) ist 1 Teil von 1 Milliarden Teilen, (b=billion, engl. für Milliarde), entspricht 1μ pro kg.

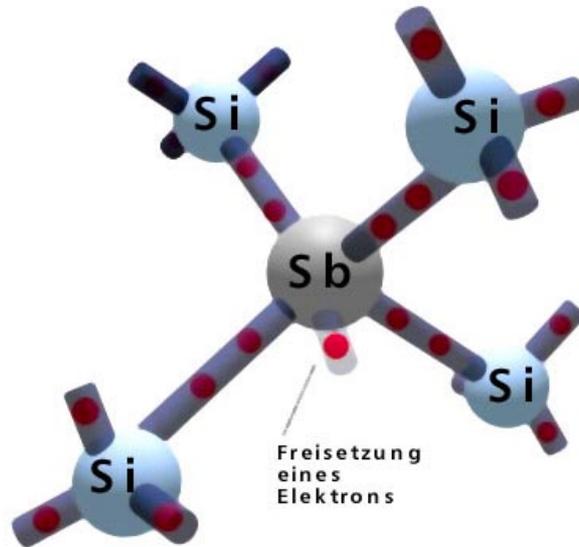


Abbildung 3.2: Vereinfachte Darstellung der n-Dotierung. Einfügung eines Antimonatoms (Donator)- Freisetzung eines Elektrons

Das Antimonatom gibt 1 Elektron an das Kristallgitter ab und wird deswegen als *Donator*² oder auch als Donor bezeichnet. Das abgegebene Elektron wird als Donatorelektron bezeichnet. Im Bändermodell liegt das Donatorelektron energiemäßig nur wenig unterhalb der unteren Kante des Leitungsbandes. Es benötigt also nur wenig Energie um ins Leitungsband zu gelangen. Durch Donatorelektronen erhöht sich die Elektronenkonzentration im Vergleich zu der bei Eigenleitung. Es entsteht eine negative Leitung oder auch *n-Leitung*.

In Abbildung 3.3 wurde hingegen ein Si-Atom durch ein niedrigerwertiges Atom (z. B. Bor) ersetzt. Das Boratom besitzt nur 3 Valenzelektronen, so daß nur 3 der 4 Bindungen zu den benachbarten Si-Atomen eingegangen werden können. Für die 4. Bindung fehlt ein Elektron, so daß ein Loch bzw. Defektelektron entsteht. Das Boratom ist also in der Lage ein Elektron aufzunehmen und wird deshalb als *Akzeptor*³ bezeichnet.

² Donator, allg. ein elektronenabgebender Stoff, speziell die in Halbleitern die n-Leitfähigkeit bewirkenden Atome;

³ Akzeptor, Atom in Halbleitern, das ein Elektron aus dem Kristallgitter aufnimmt und so die Stromleitung durch Defektelektronen ermöglicht;

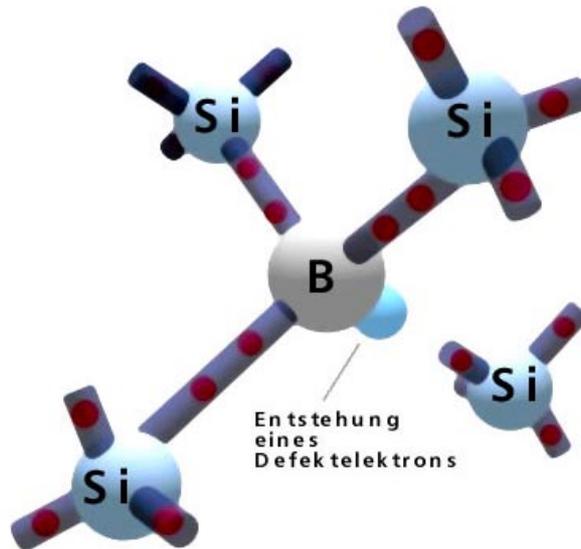


Abbildung 3.3: Vereinfachte Darstellung einer p- Dotierung. Einfügung eines Akzeptoratoms (Bor) – Entstehung eines Defektelektrons

Im Bändermodell liegt der Platz für das vom Akzeptor nicht gelieferte Elektron energiemäßig nur wenig oberhalb der oberen Kante des Valenzbandes. Ein Elektron vom Valenzband benötigt also nur wenig Energie, um diesen Platz unter Hinterlassung eines Loches im Valenzband auffüllen zu können. Beim Dotieren von Silizium mit Bor überwiegen positiv geladene Löcher, oder Defektelektronen. Es entsteht eine p-Leitung, oder der Halbleiter wird *p-leitend*.

Abbildung 3.4 verdeutlicht das Energieniveau von Donator- und Akzeptorelektron im Bändermodell.

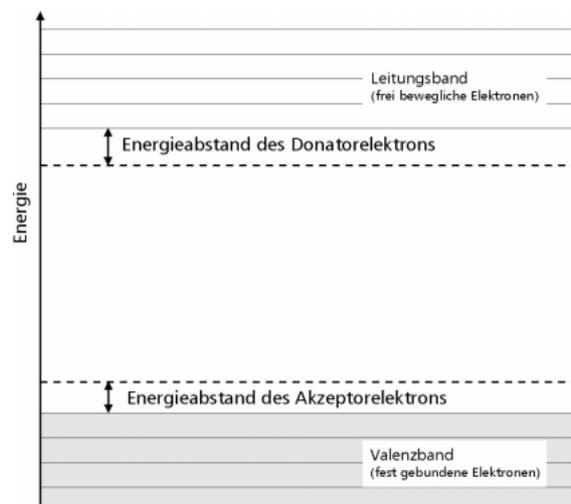


Abbildung 3.4: Energieniveau von Donator- und Akzeptorelektron

Zusammengefaßt läßt sich sagen, durch Zugabe von Donatoren (höherwertige Atome) stellt sich im Halbleiter ein Elektronenüberschuß ein, der Halbleiter wird n-leitend. Dabei stellen die überschüssigen Ladungsträger - hier Elektronen - die Majoritätsträger und die in der Minderheit auftretenden Ladungsträger - hier Defektelektronen - die Minoritätsträger dar.

Bei Zugabe von Akzeptoren (niedrigerwertige Atome) wird der Halbleiter p-leitend, da Elektronen von den Akzeptoren gebunden werden und somit positiv geladenen Defektelektronen überwiegen. Hierbei sind die Defektelektronen die Majoritätsträger und die Elektronen die Minoritätsträger.

Eine weitere wichtige Tatsache ist, das Donatoratome, die ein Elektron abgegeben haben im Kristallgitter eine positive Ladung (Ionen) darstellen. Akzeptoratom, die ein Elektron aufgenommen haben, sind dann fest eingebaute negative Ladungen (Ionen).

Abschließend soll noch erwähnt werden, das neben Phosphor auch andere 5-wertige Elemente wie Arsen (As), Antimon (Sb) oder Bismut (Bi) als Donator geeignet sind. Als Akzeptoren eignen sich neben Bor auch Aluminium (Al), Gallium (Ga) oder Indium (In).

3.1.3 Der p/n Übergang

Einen p/n- Übergang erhält man durch aneinanderfügen von einer p-dotierten Schicht an eine n-dotierten. Üblicherweise wird ein p/n- Übergang dadurch hergestellt, daß in einer p-leitenden Schicht eine n-leitende Schicht bei hoher Temperatur eindiffundiert wird. Die ursprüngliche p-Dotierung wird an dieser Stelle überkompensiert. Analog dazu kann in einer n-leitenden Schicht eine p-leitende eingefügt werden.

Um die prinzipielle Funktion von Solarzellen zu verstehen, genügt es, einen p/n- Übergang aus chemisch gleichartigem Material (homogener Übergang) zu untersuchen. An dem Übergang entsteht auf natürliche Weise eine Raumladungszone und somit ein starkes elektrisches Feld, das zur Trennung der durch Photonen erzeugten Elektron/Loch- Paare dient. Prinzipiell können dazu auch die Raumladungszonen und elektrischen Felder von heterogenen p/n- Übergängen (chemisch verschiedenes

Material), sowie Übergänge zwischen Halbleitern und Metallen (Schottky-Übergang) genutzt werden.

Um die physikalischen Vorgänge an einem p/n- Übergang zu verstehen, wird zunächst eine p/n- Kombination ohne äußere Spannung betrachtet. Jeder der beiden Halbleiterblöcke ist elektrisch neutral, da im n- leitenden Teil genauso viele freie Elektronen wie ortsfeste positive Ladungen (Donatoratome \rightarrow Ionen) vorhanden sind. Entsprechendes gilt für den p- leitenden Teil. Im n- Leiter liegt ein Elektronenüberschuß vor und im p- Leiter ein Löcherüberschuß. Aufgrund dieses Konzentrationsgefälles zwischen Elektronen und Löchern wandern durch Diffusion Elektronen vom n- Gebiet in das p- Gebiet. Analog gelangen Löcher aus dem p- Gebiet in das n- Gebiet. Es entstehen somit Diffusionsströme von Löchern zum n- Gebiet hin und Diffusionsströme von Elektronen zum p- Gebiet hin. Dieser Vorgang ist mit einer Rekombination der Ladungsträger verbunden.

Auf den ersten Blick könnte man annehmen, daß es aufgrund der Rekombination nach relativ kurzer Zeit in den Halbleiterblöcken keine freien Elektronen und Löcher mehr gibt. Dies wäre tatsächlich der Fall, wenn es keinen Prozeß gäbe, der der Diffusion entgegen wirkt und sie zum Stillstand bringt.

Aufgrund des Abwanderns von Elektronen aus dem n- Gebiet, bleiben die Donatoratome positiv geladen zurück. Im p- Gebiet überwiegen die zurückbleibenden negativ geladenen Akzeptoratome. Diese festen Ortsladungen (Ionen) bewirken, daß sich an der Grenzschicht im n- Gebiet eine positive und im p- Gebiet eine negative Raumladung ausbildet. Diese Raumladungen haben ein elektrisches Feld zur Folge, welches die Diffusion zunächst behindert und schließlich ganz zum Erliegen bringt. Weiterhin bewirkt diese Raumladung, bzw. das elektrische Feld, daß Rekombinationen nur in einer dünnen Grenzschicht stattfinden können. Ein Elektron, das in den p- Leiter wandert, wird von der dort entstandenen negativen Raumladung abgestoßen. Es kann somit nicht weiter in das p- Material vordringen. Ebenso verhindert die positive Raumladung im n- Gebiet ein tieferes Eindringen der Löcher in das n- Gebiet. Das elektrische Feld verursacht nun seinerseits Feldströme beider Ladungsträgerarten, die den Diffusionsströmen entgegengerichtet sind. Beide Ströme bilden ein dyna-

misches Gleichgewicht, wenn an dem p/n- Übergang keine äußere Spannung anliegt. Dabei kompensieren sich die Löcherströme vollständig untereinander und die Elektronenströme ebenfalls (Abbildung 3.5). In Abbildung 3.6 werden die Vorgänge an einem p/n- Übergang veranschaulicht.

Über der Raumladungszone entsteht eine Spannung U_D (Diffusionsspannung) und somit eine Potentialdifferenz. Sie liegt in der Größenordnung von 0,8 eV.

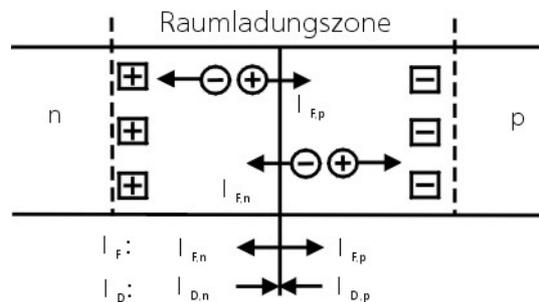


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Ströme in der Grenzschicht eines p/n-Überganges.

Im Bändermodell stellt sich ein p/n- Übergang wie folgt dar. In einem System mit thermischem Gleichgewicht muß das Fermi- Niveau überall gleich sein. Dadurch kommt es zu einer Bandverbiegung am Übergang zwischen p- und n- Material. Das sich einstellende tiefere Potential V auf der p- Seite bewirkt eine Anhebung der Energiebänder im p- Gebiet (Elektronen haben aufgrund ihrer negativen Ladung auf tieferem Potential eine höhere Energie). Die Energiedifferenz entspricht genau $e \cdot U_D$ ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ As, Elementarladung).

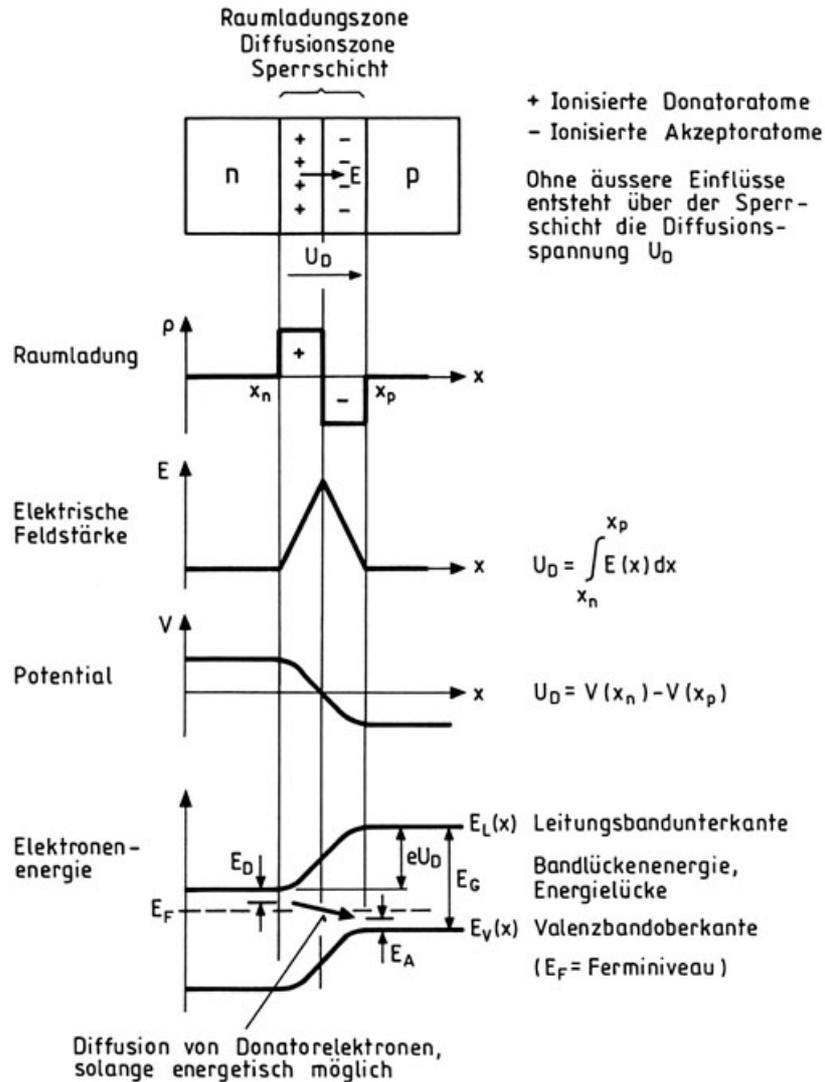


Abbildung 3.6: Vereinfachte Darstellung der Verhältnisse am p/n-Übergang ohne äußere Spannung. Die unteren beiden Diagramme beschreiben die Vorgänge im Bändermodell an einem p/n-Übergang [aus 2, Seite 45]

Elektronen nehmen beim Übergang vom n- zum p- Gebiet und Löcher beim Überqueren vom p- zum n- Gebiet jeweils die Energie $e \cdot U_D$ auf.

Um der Vollständigkeit zu genügen, soll noch kurz der p/n-Übergang bei anliegender äußerer Spannung betrachtet werden.

Eine anliegende äußere Spannung am p/n-Übergang ändert die Bandverbiegung im Grenzflächenbereich. Das Anlegen einer negativen Spannung (Durchlaßrichtung) am n- Gebiet verringert die Diffusionsspannung, dadurch verkleinert sich die Raumladungszone und somit auch die elektrische Feldstärke und die Feldströme. Das Gleichgewicht zwischen Feld- und Diffusionsstrom ist zugunsten des Diffusionsstromes verschoben.

Daraus resultierend, fließt ein Diffusionsstrom von Elektronen und Löchern durch den p/n- Übergang. Ist die angelegte Spannung gleich der Diffusionsspannung, werden die Feldströme zu null und der Diffusionsstrom wird nur noch durch die Bahnwiderstände begrenzt. Das Anlegen einer positiven Spannung (Sperrspannung) am n- Gebiet bewirkt eine Vergrößerung der Raumladungszone, welche somit hochohmig wird. Des weiteren überwiegen nun die Feldströme, welche als resultierender Sperrstrom meßbar sind. Der Sperrstrom ist sehr klein und dem Durchlaßstrom entgegengesetzt. Bei steigender Temperatur nimmt dieser Strom zu, da mit steigender Temperatur die thermische Paarbildung in der Sperrzone zunimmt.

Die mathematische Behandlung der Vorgänge an einem p/n- Übergang führen auf die Diodengleichung (Shockley-Gleichung):

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right]$$

Gleichung 3-1

mit: e = Elementarladung; k = Boltzman -Konstante ($k=8,65 \cdot 10^{-5}$ eV/K)
U = angelegte Spannung: positiv -> Fluß- , negativ -> Sperrichtung

Die Größe I_0 bezeichnet den sogenannten Dunkel- oder Sättigungsstrom einer Diode. [2,5,6]

3.2 Der innere Photoeffekt in Halbleitern

Licht besitzt sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter. Für das Verständnis der Funktionsweise von Solarzellen ist es wesentlich, daß das Licht aus sehr vielen einzelnen Teilchen (Lichtquanten) oder Photonen besteht. Aufgrund der charakteristischen Wellenlänge bzw. Frequenz besitzt jedes Photon eine ganz bestimmte Energie.

Es gilt:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \qquad \text{Gleichung 3-2}$$

E Energie des Photons (meist in eV, wobei $1\text{eV}=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ Plancksches Wirkungsquantum

λ Wellenlänge in m

ν Frequenz in Hz

$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ Lichtgeschwindigkeit

Jedes Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern und einer Hülle aus negativ geladenen Elektronen (Elementarladung $e=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$).

Trifft ein Photon mit der Energie E auf ein Atom (z.B. ein Wasserstoffatom), wird das Photon absorbiert. Wasserstoffatome bestehen aus einem einfach positiv geladenem Kern und besitzen ein Elektron. Aufgrund der absorbierten Energie, wird das Elektron in einen höheren Energiezustand versetzt. Im Grenzfall, wenn die Energie des Photons groß genug ist, kann das Elektron sogar die Atomhülle verlassen und somit zu einem freien Elektron werden.

Dieser Effekt wurde 1887 von Heinrich Hertz entdeckt und 1905 von Einstein mit Gleichung 3-2 erklärt bzw. beschrieben und wird als lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt) bezeichnet.

Der Vorgang der Energieübertragung von Photon auf Elektron wird auch als *Absorption* bezeichnet.

Als äußeren lichtelektrischen Effekt, bzw. Photoeffekt, bezeichnet man das Herauslösen von Elektronen aus einer Metalloberfläche. Dies geschieht, wenn die vom Photon gelieferte Energie größer ist als die Austrittsenergie E_A .

Ist die Energie nicht ausreichend, fällt das Elektron von seinem hohen Energiezustand unter Abgabe der aufgenommenen Energie (in Form von Wärme oder Lichtquanten) wieder auf ein niedrigeres Energieniveau zurück.

Bei manchen, nichtleitenden Kristallen reicht die durch Photonen zugeführte Energie nicht aus, um ein Elektron aus der Oberfläche zu lösen. Allerdings kann durch die Energiezufuhr das Elektron aus seiner Bindung herausgelöst werden oder vom Valenzband ins Leitungsband angehoben werden. Man erhält somit frei bewegliche Elektronen. Dieser Vorgang wird als innerer licht-elektrischer Effekt bezeichnet.

Die elektrischen Eigenschaften eines Materials werden von der Verteilung der Elektronen in den Bändern (s. 3.1.1) bestimmt. Man könnte zunächst erwarten, daß der Gleichgewichtszustand eines Kristalls derjenige ist, bei dem sich die Elektronen alle im tiefsten erlaubten Energiezustand befinden. Nach dem Pauli - Prinzip ist es aber verboten, daß sich mehr als 2 Elektronen auf einem Energieniveau befinden. Dies bedeutet, daß bei extrem niedrigen Temperaturen alle Energieniveaus eines Festkörpers bis zu einem bestimmten Niveau mit zwei Elektronen besetzt sind. Dieses Energieniveau heißt Fermi - Energie. Bei höheren Temperaturen ist die Fermi - Energie dasjenige Energieniveau, das mit der Wahrscheinlichkeit 0,5 mit einem Elektron besetzt ist. Mit steigender Temperatur besitzen eine zunehmende Zahl von Elektronen Energien, die über der Fermi - Energie liegen und besetzen deshalb darüberliegende Energieterme. Die Besetzungswahrscheinlichkeit eines erlaubten Energieniveaus als Funktion der Temperatur wird durch die Fermi - Dirac - Verteilung geregelt. [1]

Metalle besitzen keine Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Abbildung 3.7 zeigt, daß die Elektronen in Metallen beliebige Energien besitzen können. Daher können sie beliebige Energien bei der Absorption von Photonen aufnehmen. Die Elektronen geben aber die aufgenommene Energie beim Zurückfallen auf ein niedrigeres Energieniveau als Wärme wieder ab.

3.2 Der innere Photoeffekt in Halbleitern

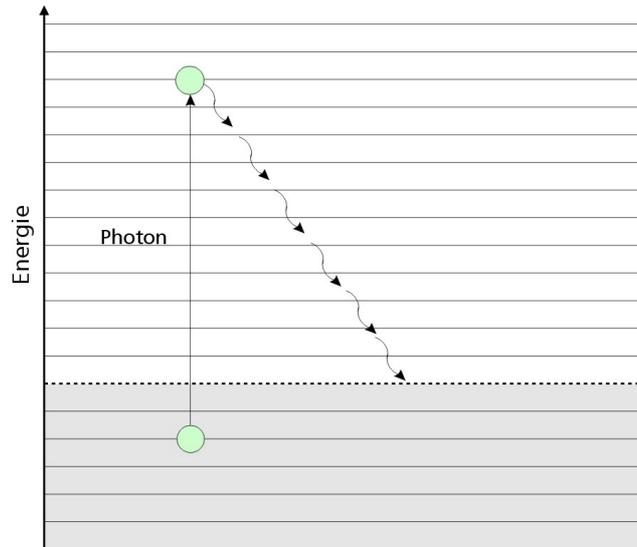


Abbildung 3.7: In einem Metall geht die von Photonen aufgenommene Energie durch Stöße mit den Atomen schnell verloren. [1]

In einem Halbleiter befinden sich bei Zimmertemperatur nur sehr wenige freie Elektronen im Leitungsband. Damit läßt sich auch die geringe Leitfähigkeit von Halbleitern bei geringer Temperatur erklären. Erst Energiezufuhr in Form von Licht oder Wärme läßt die Valenzbindungen der Elektronen aufbrechen, so daß Elektronen ins Leitungsband gelangen und somit zum Stromfluß beitragen können. Die Elektronen benötigen, um ins Leitungsband gelangen zu können, eine Mindestenergie. Diese Mindestenergie entspricht dem Bandabstand oder Bandlückenenergie E_G . Abbildung 3.8 veranschaulicht dies.

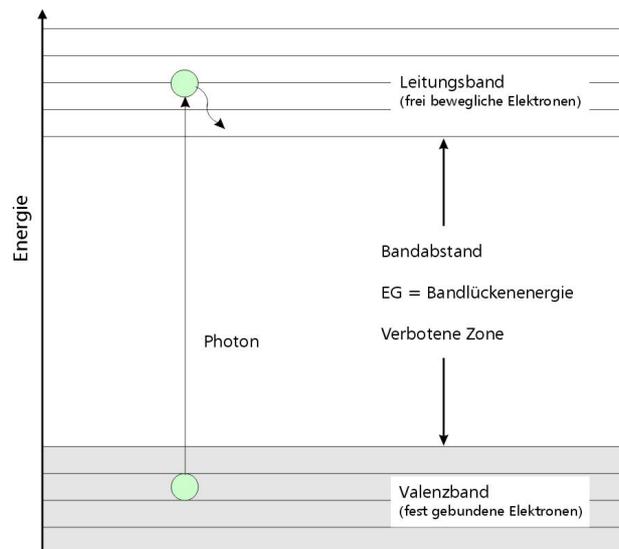


Abbildung 3.8: In einem Halbleiter verlieren Elektronen Energie durch Stöße nur bis zum Unterrand des Leitungsbandes

Werden Photonen mit einer größeren Energie als E_G absorbiert, wird der ‚Energieüberschuß‘ $E_{\text{Ü}} = E - E_G$ durch Stöße als Wärme abgegeben. Der Halbleiter erwärmt sich.

Wird durch Absorption eines Photons ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben, wird es somit ein freier Ladungsträger. An seinem Ursprungsort verbleibt eine Leerstelle im Valenzband, die als Loch oder Defektelektron bezeichnet wird. Ein Loch kann nun mit einem benachbarten Elektron wieder aufgefüllt werden, dieses hinterläßt aber an seiner Ursprungsstelle wieder ein Loch. Es entstehen also negative (Elektronen) und positive (Löcher) Ladungen (s. 3.1.2).

Photonen, deren Energie kleiner als die Mindestenergie ist, werden nicht absorbiert. Für diese Wellenlänge ist der Halbleiter transparent.

Bei Bestrahlung eines Halbleiters entstehen Elektronen und Löcher, welche nach einer bestimmten Zeit wieder rekombinieren. Erst durch Anlegen einer elektrischen Spannung, welche ein elektrisches Feld erzeugt, kann die Rekombination verhindert werden. Man erhält dann einen Photoleiter oder Photowiderstand, dessen Leitfähigkeit proportional der Bestrahlungstärke ist. Ein Photowiderstand ist aber ein passives Element und kann keine Energie erzeugen!

In Halbleitern können jedoch unter bestimmten Umständen (an einem Übergang zwischen n- und p- dotiertem Halbleitermaterial s. 3.1.3) starke innere elektrische Felder entstehen. Diese Felder ermöglichen eine Trennung der durch Photonen erzeugten Elektronen/ Loch- Paare ohne Anlegen einer äußeren Spannung. Dadurch wird es möglich die Energie der getrennten Elektronen und Löcher zu nützen.

4 Solarzellen aus kristallinem Silizium

4.1 Prinzipieller Aufbau von Solarzellen

Abbildung 4.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Solarzelle. Sie besteht aus einer großflächigen Diode (p/n- Übergang). Die Kontaktzuführung erfolgt auf der Ober- und der Unterseite. Dabei wird die Kontaktierung der Frontseite in Form eines Gitters ausgeführt, um starke Verschattungen zu vermeiden. Damit möglichst viele Photonen in die Nähe der Sperrschicht gelangen können, muß die dem Licht zugewandte Halbleiterseite (meist n-leitend) sehr dünn sein (z. B. $0,5 \mu\text{m}$). Um die Reflexionsverluste an der Oberfläche möglichst gering zu halten, wird die Zelloberfläche mit einer Antireflexionsschicht überzogen. Des weiteren ist eine Reflexionsminderung durch Strukturierung der Oberfläche möglich (invertierte Pyramiden).

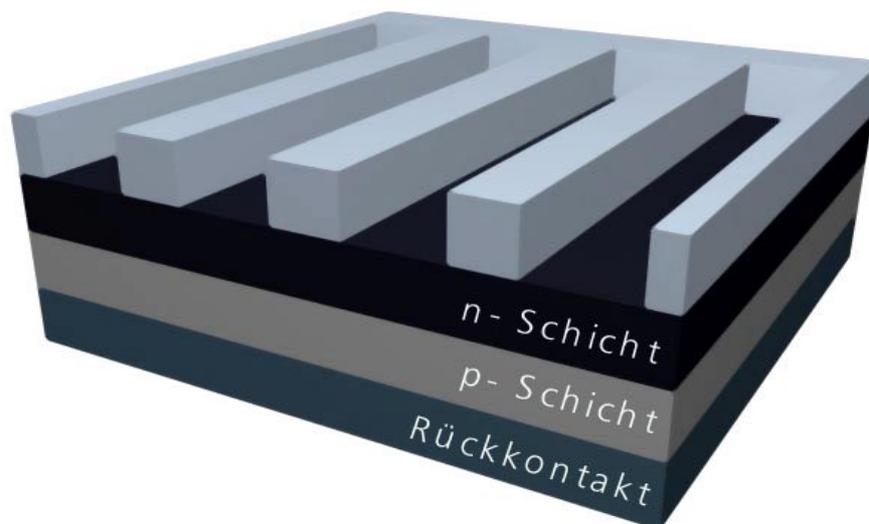


Abbildung 4.1: Prinzipieller Aufbau einer mono- oder polykristallinen Solarzelle, schematisch [1].

Treffen nun Lichtquanten auf die Solarzellen, deren Energie größer ist als der Bandabstand des Halbleitermaterials, werden diese vom Kristallgitter absorbiert. Aufgrund des inneren Photoeffekts entstehen dabei Elektronen/ Loch- Paare. Durch das starke elektrische Feld der Sperrschicht werden die Paare getrennt. Dabei sammeln sich die Elektronen in der n-Zone und die Löcher im ladungsfreien Teil der p- Zone.

Durch die getrennten Ladungen wird die Raumladungszone und somit auch die elektrische Feldstärke reduziert, bis sie für weitere Trennungen nicht mehr ausreicht. Damit ist die Leerlaufspannung U_{OC} erreicht. Die Spannung über der Sperrschicht ist dabei viel kleiner als die Diffusionsspannung U_D , aber nicht 0. Deshalb ist die Leerlaufspannung U_{OC} einer Solarzelle immer etwas kleiner als U_D .

Werden dagegen die Front- und Rückseitenkontakte kurzgeschlossen (Klemmenspannung = 0 V), so können alle durch den inneren Photoeffekt erzeugten Elektronen/ Loch- Paare sofort aus den entsprechenden Zonen abfließen. Über der Sperrschicht liegt weiterhin U_D an und es fließt für die gegebene Bestrahlungsstärke ein maximaler Strom, der Kurzschlußstrom I_{SC} . Der Kurzschlußstrom ist bei einer Solarzelle proportional zur Bestrahlungsstärke G .

4.2 Ersatzschaltung einer Solarzelle

4.2.1 Das Ein- Dioden- Modell

Eine unbeleuchtete Solarzelle ist eine Halbleiterdiode, die einen Durchlaßstrom, bei angelegter negativen Spannung, fließen läßt.

Durch Bestrahlung der Solarzelle wird durch den Photoeffekt ein zusätzlicher Strom, der Photostrom I_{ph} , erzeugt. Der Photostrom ist proportional zur Bestrahlungsstärke und ist dem Durchlaßstrom bzw. Diodenstrom entgegengesetzt gerichtet.

Abbildung 4.2 zeigt das Ersatzschaltbild einer Solarzelle im Ein- Dioden- Modell.

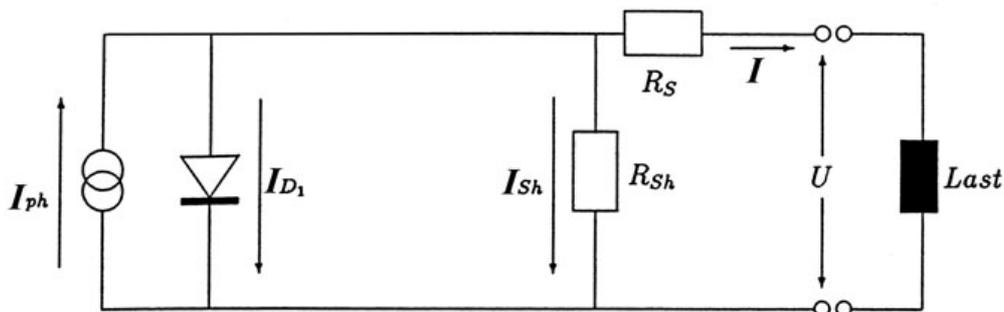


Abbildung 4.2: Ersatzschaltbild einer Solarzelle im Ein- Dioden- Modell

Die üblichen Modelle der idealen Solarzelle gehen von einer Superposition der Ströme aus. Dadurch erhält man folgende Gleichung.

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Hier wird der Diodenstrom negativ und der Photostrom positiv gezählt, es gibt aber auch andere Vorzeichenkonventionen.

Die reale Solarzelle zeigt aber ein abweichendes Verhalten, so daß dieses Modell noch weiter entwickelt wurde.

Zur Modellierung verschiedener bei der Solarzelle auftretender Effekte wurden folgende Modifikationen an Gleichung 4-1 vorgenommen.

- Da die Diodencharakteristik nicht einer idealen Shockley- Diode entspricht, wurde der *Diodenidealitätsfaktor* A eingeführt.
- Rekombinationen an Defekten im Halbleiter bzw. an den Halbleiteroberflächen führen zu Leckströmen. Über die Kanten der Solarzelle bilden sich Kriechströme. Dies soll der *Parallelwiderstand* R_p beschreiben.
- Der *Serienwiderstand* R_s soll die Leitfähigkeit der unterschiedlich dotierten Halbleitergebiete, die Übergangswiderstände zwischen n- und p- dotiertem Gebiet und den jeweiligen Metallkontakten, sowie die ohmschen Verluste an den metallischen Ableitern abdecken.

Die Darstellung mit Stromdichten und flächenbezogenen Widerständen erweist sich für weitere Betrachtungen als sinnvoll. Strom und Spannung werden der Verschaltung entsprechend auf eine Zelle und der Zellstrom auf die Fläche der verwendeten Zellen normiert. Die flächenbezogenen Parameter sind somit unabhängig von der Größe des betrachteten Solargenerators. Alle weiteren Beziehungen, die mit dem Ein- bzw. dem folgenden Zwei- Dioden- Modell in Zusammenhang stehen, werden in der Stromdichtenkonvention dargestellt.

Man erhält somit Gleichung 4-2.

$$j = j_{ph} - j_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot (U + j \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{U + j \cdot R_S}{R_p} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit:

j_{ph}	Photostromdichte [A/m^2]
j_0	Diodensperrstromdichte [A/m^2]
A	Diodenidealitätsfaktor ($A=1$)
R_S	Serienwiderstand [$\Omega \cdot m^2$]
R_p	Parallelwiderstand [$\Omega \cdot m^2$]
U	Spannung [V]

4.2.2 Das Zwei- Dioden- Modell

Untersuchungen zum internen Serienwiderstand von Solarzellen sowie verschiedene Meßverfahren zeigten, daß das Ein- Dioden- Modell nicht ausreichend ist, um die Verhältnisse einer realen Solarzelle zu simulieren. Der Vorschlag einer zweiten parallel geschalteten Diode zeigte eine deutlich bessere Übereinstimmung mit experimentell gewonnenen Daten. Physikalisch kann der Term so gedeutet werden, daß zusätzlich zur strahlenden Rekombination, die Rekombination an Störstellen in der Bandlücke große Bedeutung hat.

Das Ersatzschaltbild des Zwei- Dioden- Modells ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

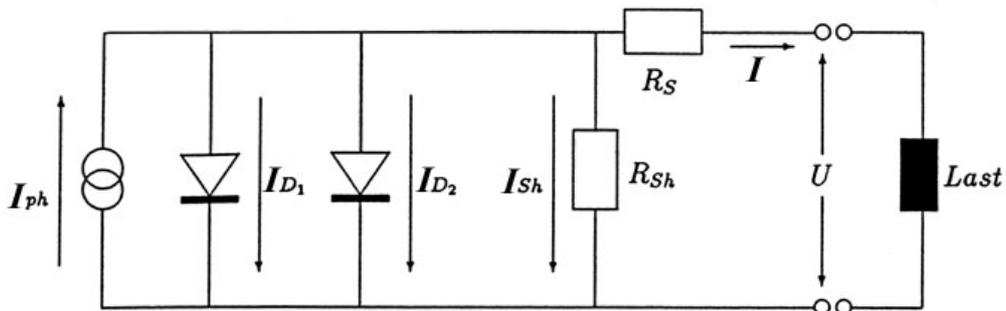


Abbildung 4.3: Ersatzschaltbild einer Solarzelle im Zwei- Dioden- Modell

Zur besseren Übersichtlichkeit wird die direkt an den Dioden anliegende Spannung U_0 eingeführt.

$$U_0 = U + j \cdot R_s \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Aus Gleichung 4-2 und Gleichung 4-3 erhält man:

$$j = j_{ph} - j_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U_0}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - j_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U_0}{b \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{U_0}{R_p} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

mit:	j_{ph}	Photostromdichte [A/m ²]
	j_{01}	Diodensperrstromdichte der 1. Diode [A/m ²]
	j_{02}	Diodensperrstromdichte der 2. Diode [A/m ²]
	a & b	Diodenfaktoren, beim Zwei- Dioden- Modell: a=1, b=2
	R_p	Parallelwiderstand [Ω·m ²]
	e	Elementarladung [C]
	T	Temperatur, [K]

Die Diodensperrstromdichten und die Photostromdichte berechnen sich wie folgt:

$$j_{01} = C_{01} \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_{gab}}{k \cdot T}\right) \quad \text{Gleichung 4-5}$$

$$j_{02} = C_{02} \cdot T^{5/2} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_{gab}}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad \text{Gleichung 4-6}$$

$$j_{ph} = (C_0 + C_1 \cdot T) \cdot G \quad \text{Gleichung 4-7}$$

mit:	C_{01}	Diodensperrstromparameter, [A/m ² · K ³]
	C_{02}	Diodensperrstromparameter, [A/m ² · K ^{5/2}]
	C_0	Photostromkoeffizient, ‚Dunkelstromkoeffizient‘ [1/V]
	C_1	Photostromkoeffizient, ‚Temperaturkoeffizient‘ [1/V · K]
	T	Temperatur, [K]
	G	Einstrahlung, Bestrahlungsstärke, [W/m ²]
	k	Boltzmannkonstante [kg]
	e	Elementarladung [C]
	U_{gab}	Potentialdifferenz des Bandabstandes, (1,14 eV bei kristallinem Si)

Der erste Diodenterm, $j_{01} \cdot \exp(\dots)$, repräsentiert die ideale Shockley- Diode, wie auch beim Ein- Dioden- Modell. Der zweite Diodenterm stellt die Re-

kombination in der Raumladungszone an Störstellen dar. Der zugehörige Diodenfaktor b wurde auf 2 gesetzt, da man davon ausgeht, daß die Rekombinationsrate in der Bandmitte am größten ist.

Gleichung 4-7 zeigt die fast lineare Abhängigkeit der Photostromdichte von der Einstrahlung, die nur einen schwachen Temperaturdrift unterliegt. C_0 , C_1 , C_{01} , C_{02} , Serien- und Parallelwiderstand sind die 6 Parameter des Zwei-Dioden- Modells.

4.3 Kennlinien von Solarzellen und wichtige Kenndaten

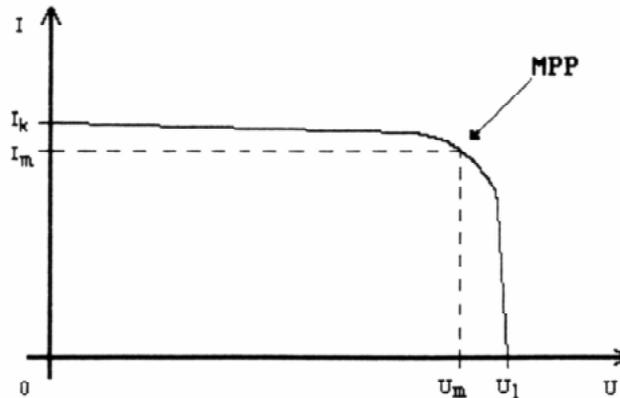


Abbildung 4.4: Strom- Spannungs- Charakteristik einer Solarzelle im beleuchtetem Zustand. Man erkennt die 3 wichtigsten Punkte der Solarzelle: Kurzschlußstrom I_k , Leerlaufspannung U_l , sowie den Punkt der maximalen Leistung MPP mit zugehörigem Strom I_m und Spannung U_m .

Abbildung 4.4 zeigt eine Beispielkennlinie einer Solarzelle. Drei Punkte der Strom- Spannungs- Charakteristik sind für den Wirkungsgrad von großer Bedeutung:

- Kurzschlußstrom I_k bzw. I_{SC} (aus engl.: short circuit current), wird dann gemessen, wenn an der Zelle keine Spannung anliegt
- Leerlaufspannung U_l bzw. U_{OC} (aus engl.: open circuit voltage), wird erhalten, wenn $I=0A$ ist
- MPP (von maximum power point), Punkt an dem Produkt aus I und U maximal ist, Punkt maximaler Leistung

Damit man möglichst immer die maximale Leistung von einer Solarzelle bzw. einem Solargenerator erhält, ist es notwendig, daß ein angeschlossener Verbraucher möglichst im bzw. ganz in der Nähe des MPP arbeitet. Praktisch ist dies kaum zu realisieren, da der MPP von verschiedenen Faktoren abhängig ist, also nicht konstant ist. Je nach Einstrahlung, Temperatur, Exemplarstreuung, Alterung o. ä. hat er einen anderen Wert. Es wurden aber Schaltungen entworfen, die es ermöglichen, daß ein Verbraucher immer im MPP arbeitet. Solche Schaltungen werden als Maximum Power Tracker (kurz: MPT) bezeichnet.

Aus der Beispielkennlinie ist ersichtlich, daß die maximale Leistung

$$P_{\max} = I_m \cdot U_m$$

Gleichung 4-8

immer kleiner als das Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom ist.

Eine Solarzelle muß immer in der Lage sein, Leerlaufspannung sowie Kurzschlußstrom auszuhalten. Daher ist das Verhältnis von maximaler Leistung zu dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom neben dem Wirkungsgrad ein weiteres Maß für die Güte einer Solarzelle. Dieses Verhältnis bezeichnet man als *Füllfaktor*.

$$\text{Füllfaktor } FF = \frac{P_{\max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Gleichung 4-9

Bei heutigen Solarzellen liegt der Füllfaktor etwa zwischen 60% und 80%.

Wie bereits erwähnt, ist die Kennlinie einer Solarzelle abhängig von Bestrahlungsstärke und Zelltemperatur. Dies erkennt man ebenfalls an den Modellen der Solarzelle.

Abbildung 4.5 zeigt die Kennlinien einer Solarzelle mit der Bestrahlungsstärke G als Parameter. Man erkennt, daß der Kurzschlußstrom proportional zur Bestrahlungsstärke ist. Dagegen steigt die Leerlaufspannung mit zunehmender Bestrahlungsstärke nur sehr wenig. Weiterhin sieht man in der Abbildung sehr gut, wie der MPP mit variierender Bestrahlung 'wandert'.

In Abbildung 4.6 wird dagegen die Temperaturabhängigkeit der Solarzellen verdeutlicht. Mit steigender Temperatur nimmt der Kurzschlußstrom ebenfalls zu, allerdings nicht mehr so stark wie bei der Erhöhung der Bestrahlungsstärke. Die Leerlaufspannung sinkt dagegen mit steigender Temperatur, im Vergleich zu Abbildung 4.5 stärker. Bei kristallinem Silizium liegt der Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung im Bereich -2mV/K bis $-2,5\text{mV/K}$ [2]. Da mit zunehmender Temperatur der Kurzschluß-

4.3 Kennlinien von Solarzellen und wichtige Kenndaten

strom nur sehr wenig steigt, die Leerlaufspannung aber stark abnimmt, sinkt auch die Leistungsabgabe P_{\max} der Solarzelle im MPP. Ist $P_{\max}(T_0)$ die Leistung bei T_0 und T_{Koeff} der Temperaturkoeffizient, so ist $P_{\max}(T)$ die Leistung bei einer Temperatur T ($T \neq T_0$) nach $P_{\max}(T) = P_{\max}(T_0) \cdot (1 - T_{\text{Koeff}}(T - T_0))$. Ein typischer Temperaturkoeffizient für P_{\max} liegt etwa bei $-0,4\%/K$ bis $-0,5\%/K$.

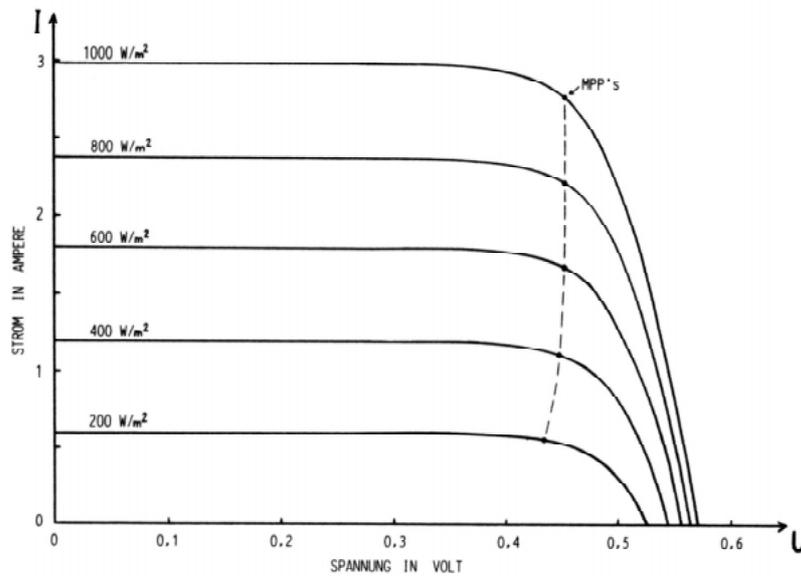


Abbildung 4.5: Einfluß der Bestrahlungsstärke G auf den Verlauf der I- U- Kennlinie einer Solarzelle [aus 2, Seite 53, Bild 35]

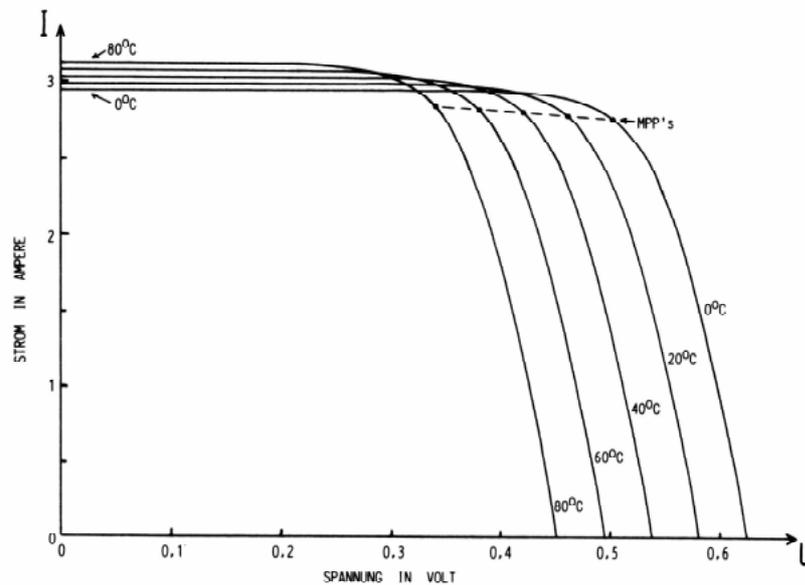


Abbildung 4.6: Einfluß der Temperatur T auf den Verlauf der I- U- Kennlinie einer Solarzelle [aus 2, Seite 53, Bild 36]

Aufgrund der Sonneneinstrahlung liegt die Temperatur der Solarzellen etwa 20°C bis 40°C über der Umgebungstemperatur. Um einen deutlichen

Leistungseinbruch und somit einen schlechten Wirkungsgrad an sonnenreichen Tagen zu vermeiden, empfiehlt es sich, die Solarzelle zu kühlen (z. B. durch Hinterlüftung).

4.4 Wirkungsgrad von Solarzellen

4.4.1 Theoretischer und praktischer Wirkungsgrad

Bei Energieumwandlungen ist der Wirkungsgrad immer das wichtigste Kennzeichen dafür, ob diese Umwandlung mit viel oder wenig Verlusten behaftet ist. Je größer der Wirkungsgrad ist, desto geringer sind die Verluste und desto besser ist die Energieumwandlung.

Die folgenden Ausführungen über den theoretischen und praktischen Wirkungsgrad sind an [2] angelehnt.

Wie bereits bekannt ist, können nur die Photonen ein Elektron/ Loch Paar bilden, deren Energie größer ist als die Bandlückenenergie E_G des verwendeten Halbleitermaterials. Unter der Annahme, daß man ein ideales Material zur Verfügung hat, welches jedes Elektron/ Loch Paar trennt und das die volle, aus dem Lichtquant gewonnene Energie an den äußeren Stromkreis abgegeben wird, ist es möglich, die in der Solarzelle erzeugten Stromdichten und den spektralen Umwandlungswirkungsgrad η_s zu berechnen. Die Berechnung erfolgt aus der spektralen Intensitätsverteilung des Sonnenlichts und in Funktion der Bandlückenenergie E_G .

Die Spannung an einer idealisierten Solarzelle kann man wie folgt berechnen:

$$\textit{Theoretische Photospannung } U_{ph} = \frac{E_G}{e} \qquad \text{Gleichung 4-10 [2]}$$

Abbildung 4.7 zeigt den Verlauf des spektralen Umwandlungswirkungsgrades über der Bandlückenenergie.

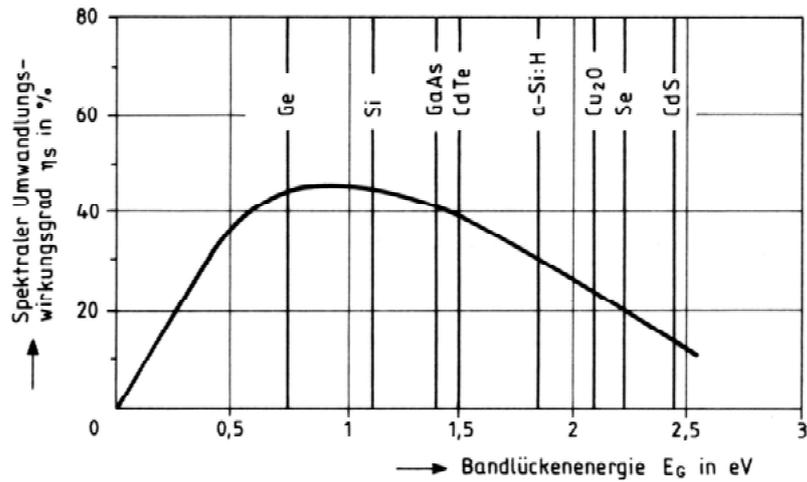


Abbildung 4.7: Spektraler Umwandlungswirkungsgrad einer idealisierten Solarzelle mit einem einzigen Übergang in Funktion der Bandlückenenergie [aus 2, Seite 56, Bild 40]

Der theoretische Wirkungsgrad einer Solarzelle wurde bereits 1959 von Rappaport [2] im AM0- Spektrum in Funktion der Bandlückenenergie E_G unter einigen idealisierten Annahmen berechnet:

- Die Solarzelle wird nur im MPP betrieben
- Alle Photonen mit $h \cdot \nu > E_G$ bilden ein Elektron/ Loch Paar
- Alle Elektronen/ Loch Paare werden getrennt
- Beschattung durch die Frontkontakte wird vernachlässigt
- Temperatur der Zelle beträgt 25°C

Die Ergebnisse zeigt Abbildung 4.8. Das Optimum liegt etwa bei einer Bandlückenenergie von $1,5\text{eV}$. Bei kristallinem Silizium (c-Si) liegt η_s bei 22% und bei amorphen Silizium (a-Si) bei 25%.

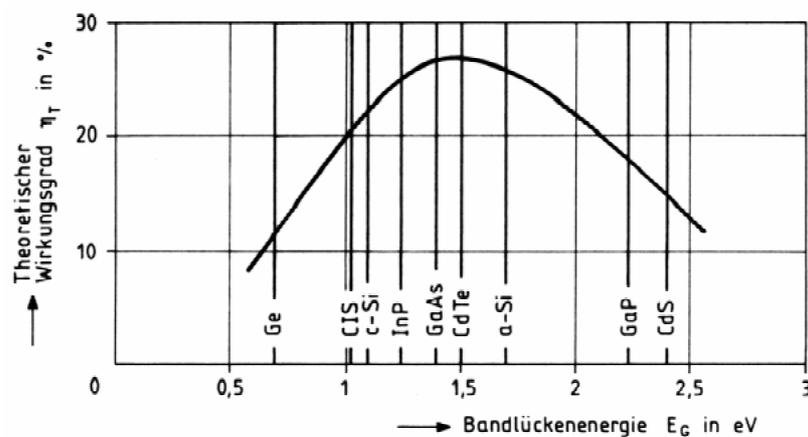


Abbildung 4.8: Theoretischer Wirkungsgrad einer Solarzelle im AM0- Spektrum über der Bandlückenenergie bei 25°C nach Rappaport. [aus 2, Seite 58]

4 Solarzellen aus kristallinem Silizium

In der Praxis sieht es etwas anders aus. Die beim theoretischem Wirkungsgrad vernachlässigten Verluste (Reflexion, Rekombination, Widerstände) reduzieren diesen. Des Weiteren müssen Effekte wie die Abschattung der Zellen durch Frontkontakte, sowie die Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades (Koeffizient etwa $-0,005/\text{K}$ [2]) berücksichtigt werden.

Der praktische Wirkungsgrad einer Solarzelle berechnet sich wie folgt:

$$\eta_p = \frac{I_m \cdot U_m}{P_i} = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot U_{OC}}{P_i} \quad \text{Gleichung 4-11 [2]}$$

P_i stellt dabei die Einstrahlungsleistung dar.

$$P_i = G \cdot A_i \quad \text{Gleichung 4-12}$$

mit: A_i installierte Fläche [m^2]
 G Bestrahlungsstärke [W/m^2]

Nachfolgende Tabelle enthält typische Wirkungsgrade von unterschiedlichen Solarzellen:

Halbleitermaterial	Wirkungsgrad η_p
GaAs	21 %
c-Si	19 %
a-Si	10 %
CuInSe ₂	10 %
CdTe	10 %

Tabelle 4-1: Typische Wirkungsgrade für unterschiedliche Solarzellen, [aus 2, S.60]