

Solarzelle

Fred Stober, Martin Will
Gruppe 106
Betreuer: Daniel, Bruno

21. Dezember 2005

Zusammenfassung

Es werden Dunkelkennlinien von drei Solarzellen aufgenommen. Bei verschiedenen Temperaturen ($299\text{ K} - 368\text{ K}$) und Intensitäten werden die Kennlinien einer Solarzelle gemessen und mit den theoretischen Erwartungen verglichen. Die Abhängigkeit des Kurzschlussstroms von der Photonenenergie wird mit einem Monochromator untersucht. Am Ende wird die Fläche eines 1 GW Solarkraftwerks berechnet.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	2
1.1	Fermi-Statistik	2
1.2	Bändermodell	2
1.2.1	Isolatoren	3
1.2.2	Leiter / Metall	3
1.2.3	Halbleiter	3
1.3	p-n-Übergang	5
1.4	Plancksches Strahlungsgesetz	5
1.5	Halbleiter und p-n-Übergang unter Lichteinstrahlung	6
1.6	Aufbau von Solarzellen	7
2	Experimentelle Grundlagen	8
2.1	Strom-Spannungs-Kennlinie	8
2.2	Füllfaktor und Wirkungsgrad	8
2.3	Intensitätsabhängigkeit	9
2.4	Wellenlängenabhängigkeit	9
2.5	Temperaturabhängigkeit	9
3	Auswertung	10
3.1	Intensitätsabhängige Messung der Kennlinien	10
4	Wellenlängenabhängigkeit des Kurzschlussstroms	13
5	Temperaturabhängigkeit der Kennlinien	15
5.1	Vergleich mit Kernenergie	17

Literatur

[Bilder] de.wikipedia.org

[Bilder] www-solidstate.physik.uni-bremen.de

[VM] Vorbereitungsmappe SSi-Solarzelle"

[SolSrv] <http://www.solarserver.de/lexikon/wirkungsgrad.html>

[WP-KA] <http://de.wikipedia.org/wiki/Karlsruhe>

[ISE] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Fermi-Statistik

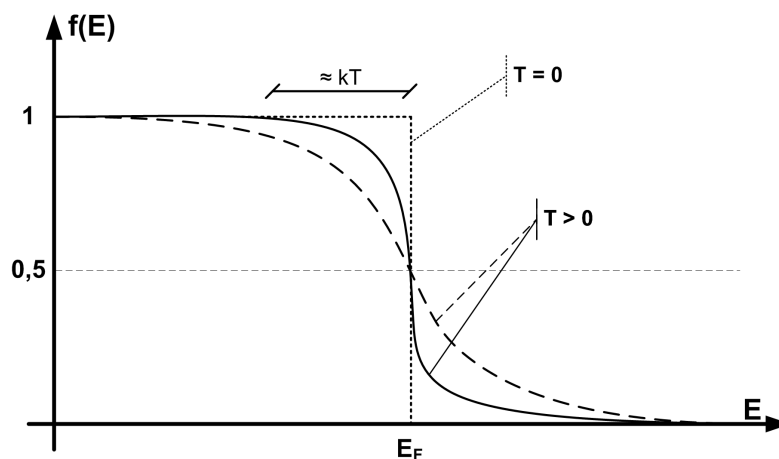
Die Fermi-Statistik beschreibt Teilchen mit halbzahligen Spin, also Fermionen. Die zentrale Aussage der Fermi-Statistik ist es, dass die Wellenfunktion eines n -Teilchen-Systems total antisymmetrisch unter Vertauschung zweier Teilchen ist. Als Folgerung daraus ergibt sich, dass die Besetzungsstatistik für Fermionen durch die Fermi-Verteilung gegeben ist.

Betrachtet man also die Besetzung der Energieniveaus der Elektronen in einem Halbleiter, so muss diese durch die Fermi-Verteilung (oder Fermi-Dirac-Verteilung) beschrieben werden. Wie oben beschrieben, können aufgrund des Ausschließungsprinzips (Pauli-Prinzip), nicht alle Elektronen den Grundzustand annehmen. Betrachtet man zunächst ein System ohne thermische Anregungen ($T = 0$), so füllen die Elektronen die vorhandenen Energieniveaus lückenlos von unten bis zu einer Grenze E_F , der Fermi-Energie auf. Wird nun ein System ($T > 0$) betrachtet, so können durch thermische Anregungen Elektronen in einen höheren Energiezustand angehoben werden. Dabei ist die Fermi-Energie nun genau die Energie, bei der die Wahrscheinlichkeit einen Zustand zu besetzen 50% beträgt. Die Besetzungswahrscheinlichkeit $f(E)$ für einen Zustand der Energie E ist allgemein gegeben durch

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right) + 1}$$

Die Verteilung ist im folgenden Diagramm graphisch dargestellt für verschiedene Temperaturen. Im Grenzfall hoher Energien $E \gg E_F$ geht die Fermi-Verteilung über in die Maxwell-Boltzmann-Verteilung.

$$f_{MB}(E) = \exp\left(-\frac{E-E_F}{k_B T}\right)$$



Fermi-Verteilung

1.2 Bändermodell

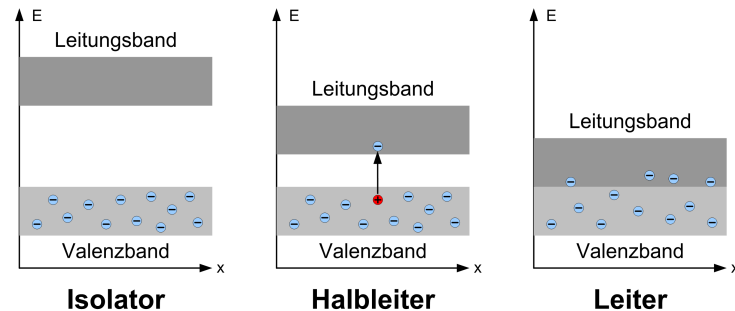
Betrachtet man die Energiezustände von zwei (gleichen) Atomen, die man genügend dicht zusammenbringt, so spalten atomare Energieniveaus auf in zwei Molekülniveaus (ein bindendes und ein antibindendes). Bringt man analog dazu N gleiche Atome zusammen, so spalten die sich entsprechenden atomaren Niveaus (gleicher Energie) auf in N Niveaus.

Für große N und einer periodischen Anordnung von gleichen Atomen, wie es z. B. in einem Kristall vorliegt, so liegen die Energieniveaus so dicht zusammen, dass man die beieinanderliegenden Energieniveaus als Kontinuum betrachten kann, die man als Energiebänder bezeichnet. Die verschiedenen Energiebänder werden durch die sogenannten Bandlücken getrennt.

Die Besetzung der Energieniveaus erfolgt von unten, gemäß der oben beschriebenen Fermi-Verteilung.

Durch die Besetzung der Bänder können Festkörper in Isolatoren, Halbleiter und Leiter klassifiziert werden. Das Valenzband ist dabei das höchste Energieband, dass für $T = 0$ von den Elektronen voll besetzt ist. Das energetisch darüberliegende Band nennt man Leitungsband. Im Leitungsband können sich die Elektronen frei bewegen, im Valenzband sind sie fest gebunden. Für $T > 0$ werden Elektronen gemäß der Fermi-Verteilung durch thermische Anregung vom Valenz- ins Leitungsband gehoben.

Auf diese Weise kann ein zuvor unbesetztes Leitungsband teilweise besetzt werden. In den teilweise besetzten Bändern können nun Ladungen transportiert werden, also ein Strom fließen.



1.2.1 Isolatoren

Ein Isolator zeichnet sich durch ein unbesetztes Leitungsband aus, bei dem die Bandlücke zum Valenzband mehrere eV beträgt, so dass Elektronen praktisch nicht vom Valenz- in das Leitungsband angeregt werden können.

1.2.2 Leiter / Metall

Der Leiter ist dadurch ausgezeichnet, dass Valenz- und Leitungsband sich teilweise überlappen, so dass die Elektronen auch ohne thermische Anregung im Leitungsband zum Stromfluss beitragen können. Thermische Anregung führt bei einem Leiter im Allgemeinen nicht zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit, da durch Elektronenstreuung am Gitter die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen abnimmt.

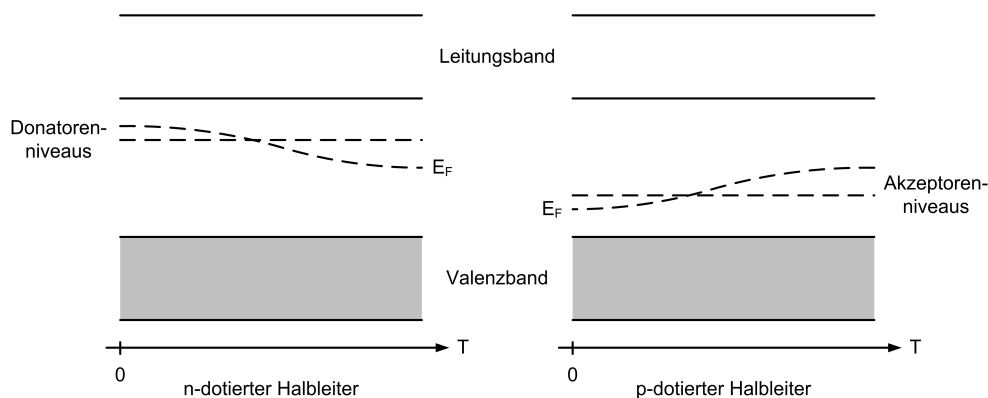
1.2.3 Halbleiter

Bei Halbleitern ist bei $T = 0$ das Valenzband voll besetzt und das Leitungsband leer, weshalb reine Halbleiter am absoluten Temperaturnullpunkt nicht leiten, das Fermi-niveau liegt irgendwo in der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Diese ist jedoch relativ klein (Si: $1,10 \text{ eV}$, GaAs: $1,4 \text{ eV}$), weshalb schon bei geringen Temperaturen Elektronen durch thermische Anregung in das Leitungsband wechseln können und für Leitfähigkeit sorgen. Dieser Effekt nimmt mit steigender Temperatur zu, weshalb Halbleiter auch Heißeiter genannt werden. Weitere Elektronen können z.B. aufgrund eines elektrischen Feldes zur Leitfähigkeit beitragen. Die beim Wechsel ins Leitungsband hinterbliebenen Defektelektronen bzw. Löcher im Valenzband können ebenfalls zur Erklärung der Leitung herangezogen werden.

Direkte und indirekte Halbleiter Weiterhin kann man Halbleiter in direkte und indirekte Halbleiter einteilen. Hierzu betrachtet man das Bändermodell im Impulsraum. Für ein Elektron ist es energetisch am günstigsten bei der Anregung vom Maximum des Valenzbandes zum Minimum des Leitungsbandes zu wechseln. Liegen diese Extrema beim selben Quasiimpuls, so kann diese Anregung durch ein Photon geschehen und man spricht von einem direkten Übergang. Muss das Elektron beim Übergang eine Differenz im Quasiimpuls überwinden, so ist zusätzlich ein Phonon nötig, um dem Elektron den fehlenden Impuls zuzuführen. Dieser Übergang ist also indirekt, dementsprechend werden solche Verbindungen indirekte Halbleiter genannt.

Dotierung In mikroelektronischen Bauteilen möchte man meist eine höhere Leitfähigkeit als die von intrinsischen Halbleitern erreichte. Hierzu kann man in den Atomverbund Fremdatome einbauen. Diese tragen durch zusätzliche oder fehlende Außenelektronen zur besseren Leitfähigkeit bei. Man unterscheidet zwischen n- und p-dotierten Halbleitern.

Bei der n-Dotierung bringt man Fremdatome mit mehr (beispielsweise 5) Valenzelektronen in den Kristall ein. Diese Elektronen sind nur schwach gebunden und können relativ leicht ins Leitungsband wechseln. Die Fremdatome, die dieses zusätzliche Elektron abgeben, werden Donatoren genannt. Sie liegen energetisch auf einem Niveau, das knapp unterhalb der Leitungsbandkante liegt. Da bei tiefen Temperaturen die Leitfähigkeit nur aufgrund der Donatorelektronen zustande kommt, liegt das Fermienergielevel zwischen Donatorkniveau und Leitungsband. Mit zunehmender Temperatur steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen aus dem Valenzband angeregt werden und die Fermienergie nähert sich der eines undotierten Halbleiters an.



n-dotierte Halbleiter werden mit Fremdatomen dotiert, die weniger Außenelektronen besitzen, die also sozusagen ein Defektelektron in den Halbleiter einfügen. Diese Atome können Valenzelektronen der Halbleiteratome aufnehmen, weshalb man sie Akzeptoren nennt. Sie liegen energetisch nahe über der Valenzbandkante. Schon bei geringen Temperaturen können nun Valenzelektronen von den Akzeptoratomen aufgenommen werden, weshalb die Fermienergie zwischen Akzeptor- und Valenzbandniveau liegt. Ähnlich den n-dotierten nähert sich auch das Fermienergielevel der p-dotierten Halbleiter mit steigender Temperatur der eines undotierten Halbleiters an. Die steigende Leitfähigkeit kann bei p-dotierten Halbleitern durch den Defektelektronenstrom erklärt werden, da im Valenzband Löcher zurückbleiben, die als positive Ladungsträger aufgefasst werden können.

Extrinsische Leitung Die extrinsische Leitung bezeichnet den durch eingebrachte Fremdatome (z. B. durch Dotierung), also Donatoren bzw. Akzeptoren, verursachten Stromfluss. Da die Elektronen der Fremdatome schwächer gebunden sind, können diese bereits bei tieferen Temperaturen zur Leitung beitragen. Ihr Anteil ist jedoch bei hohen Temperaturen deutlich schwächer als die der intrinsische Leitung.

Intrinsische Leitung Ist in einem Halbleiter die Zahl der Ladungsträger von Fremdatomen vernachlässigbar gegen die Zahl der Ladungsträger aus dem Valenzband, so spricht man von intrinsischer Leitung. Zur Herstellung von Halbleitern eignen sich hauptsächlich Elemente bzw. Verbindungen mit vier Valenzelektronen (z. B. Germanium, Silizium und Galliumarsenid), die im Kristallverbund jeweils eine kovalente Bindung mit einem Nachbaratom eingehen. Diese Elektronen können nun durch thermische Anregung, Absorption von Licht, oder anderen Effekten ins Leitungsband angehoben werden. Solche Halbleiter nennt man auch intrinsische Halbleiter. Damit die Zahl der Ladungsträger von Fremdatomen vernachlässigbar ist, muss man den Fall hochreiner Halbleiter, also quasi ohne Fremdatome, oder hohen Temperaturen bzw. sehr kleiner Bandlücken betrachten, bei denen die thermisch angeregten Valenzelektronen dominieren.

1.3 p-n-Übergang

Verbindet man einen p- und einen n-dotierten Halbleiter, so rekombinieren die überzähligen Elektronen der n-dotierten mit den Defektelektronen der p-dotierten Schicht. Dabei bleiben die geladenen Donator- bzw. Akzeptoratome zurück, die jedoch raumfest sind und nicht rekombinieren können. Es bildet sich also ein elektrisches Feld zwischen den nun entstandenen Raumladungen aus. Die resultierende Spannung – Diffusionsspannung U_D genannt – wirkt einer weiteren Rekombination der freien Ladungsträger entgegen, es stellt sich also ein Gleichgewicht ein und die Rekombination wird auf den Übergangsbereich beschränkt, den man aufgrund mangelnder Ladungsträger Verarmungszone nennt. Dieses elektrische Feld kann nun durch Anlegen einer äußeren Spannung verstärkt oder verringert werden, was Einfluss auf die Leitfähigkeit hat. Dies ist die Grundlage der sogenannten Halbleiterdioden.

Zur Erklärung der polungsabhängigen Leitfähigkeit von Dioden betrachtet man das Bändermodell und die Fermienergie. Diese liegt im n-dotierten Teil zwischen Donator- und Leitungsbandniveau, im p-dotierten Teil zwischen Akzeptor- und Valenzbandniveau. Beim Zusammenführen der beiden Teilhalbleiter müsste das Fermienergielevel abknicken. Da dies jedoch nicht geschehen darf, sondern das Fermienergielevel im ganzen Halbleiter gleich sein muss, knicken die Valenz- und Leitungsbander ab.

Legt man nun an die Diode eine Spannung an, so vergrößert bzw. verringert sich die Verarmungszone je nach Polung. Wird der Pluspol an den p-dotierten Teil und der Minuspol an den n-dotierten Teil angelegt, so werden in den n-dotierten Teil sozusagen Elektronen hineingepumpt und im p-dotierten Teil Elektronen abgesogen, wodurch die Verarmungszone kleiner wird. Ist die Spannung groß genug wird die Diode leitend und es kann Strom fließen. In umgekehrter Polrichtung werden die Elektronen aus dem n-dotierten Teil abgezogen und in den p-dotierten Teil gepumpt, wo sie sofort rekombinieren. Dadurch verbreitert sich die Sperrschicht, die Diode sperrt.

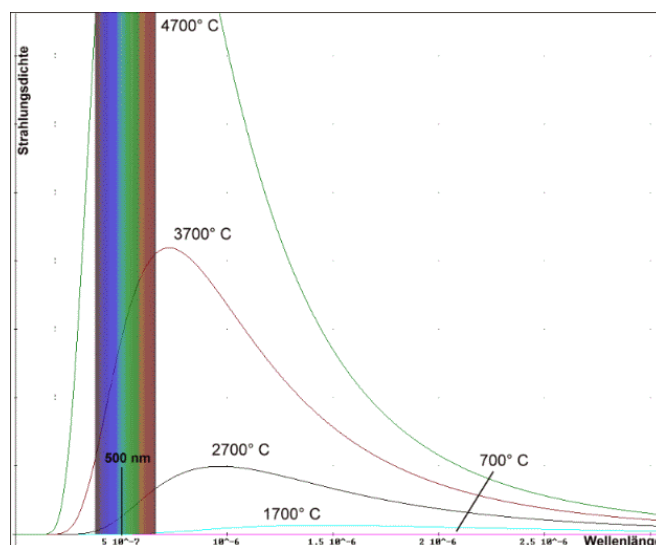
1.4 Plancksches Strahlungsgesetz

Die spektrale Energiedichte in eines Schwarzen Körpers ist von der Temperatur und der Wellenlänge bzw. Energie abhängig. Der genaue Zusammenhang wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben:

$$U(E, T) = \frac{8\pi E^3}{h^2 c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right) - 1}$$

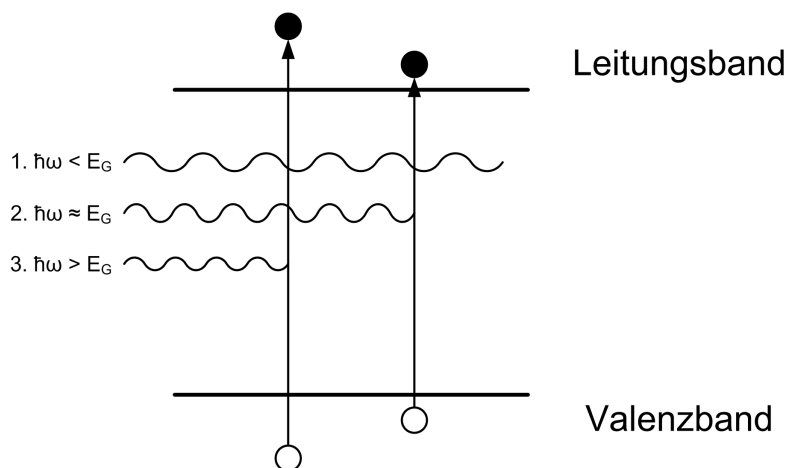
Mit abnehmender Temperatur der Strahlungsquelle verschiebt sich das Maximum in den den Infrarotbereich, wie man im folgenden Diagramm erkennen kann. Das Maximum ist dabei durch das Wiensche Verschiebungsgesetz gegeben, das nach Umrechnung lautet:

$$E_{\max} = 0,000243 \cdot T \frac{eV}{K}$$



1.5 Halbleiter und p-n-Übergang unter Lichteinstrahlung

Bestrahlt man einen Halbleiterkristall mit Photonen der Energie $E_\gamma = \hbar\omega$, so kann dieses Photon ein Elektron-Loch-Paar erzeugen. Hierzu muss es jedoch mindestens die Energie mit sich führen, die nötig ist um die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband zu überwinden, es muss $E_\gamma \geq E_G$ sein (Fall 2 und 3). Ist dies nicht der Fall, so wird das Photon nicht absorbiert und erzeugt keine neuen Ladungsträger, die zur Leitfähigkeit beitragen könnten. Werden die entstandenen Ladungsträger nicht räumlich getrennt, so rekombinieren sie nach Ablauf ihrer mittleren Lebensdauer wieder miteinander. Dies kann strahlend, also unter Aussendung eines Photons, oder nichtstrahlend, durch Erzeugung von Wärme bzw. Phononen, passieren.

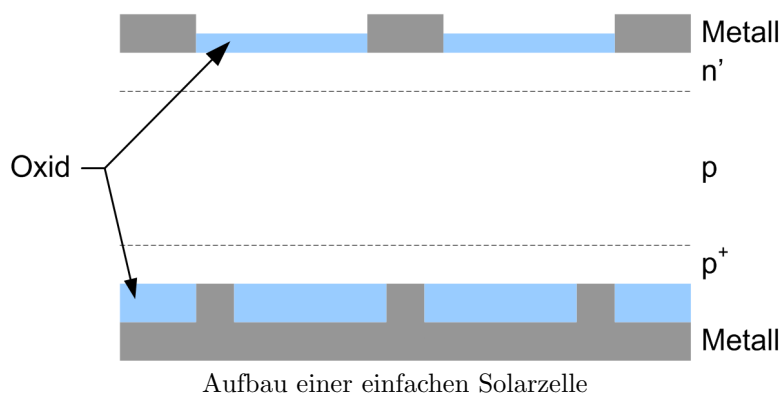


Bei einer Solarzelle möchte man diese Rekombination jedoch verhindern indem man die entstandenen Ladungsträger voneinander trennt. Hierzu wird zunächst einmal ein n- und ein p-dotierter Kristall zusammengebracht, sodass sich im entstehenden p-n-Übergang ein elektrisches Feld ausbildet, das die in der Verarmungszone neu entstandenen Elektronen und Löcher in unterschiedliche Richtungen beschleunigt. Ist die Solarzelle kurzgeschlossen, also ein Stromfluss über einen Außenkreis möglich, so rekombinieren die neuen Ladungsträger über diesen Außenkreis. Man bezeichnet diesen Strom als Kurzschlussstrom I_K . Ist eine Rekombination über den Kurzschluss nicht möglich, so bleiben die Ladungsträger während ihrer Lebensdauer in der Raumladungszone und bauen dort die Potentialstufe, also die Diffusionsspannung, ab. Diese Potentialdifferenz wird als Leerlaufspannung U_L bezeichnet.

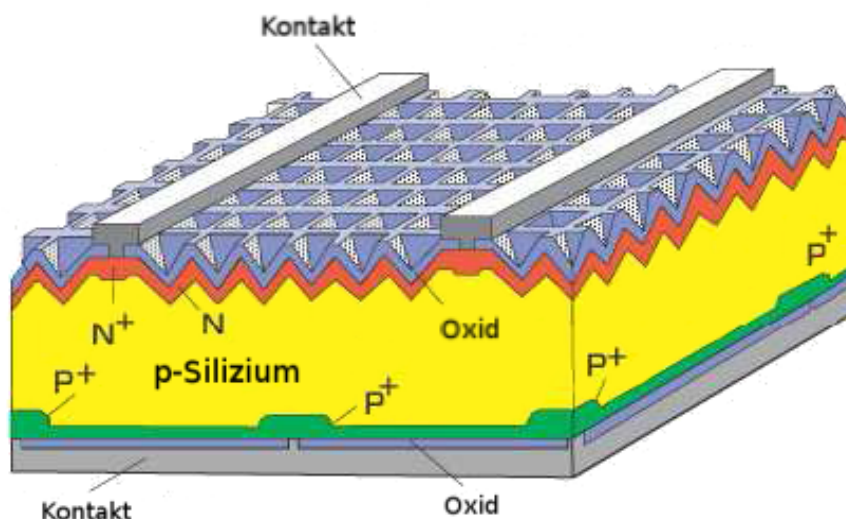
Es kann jedoch passieren, dass die Photonen außerhalb der Verarmungszone absorbiert werden. Wird beispielsweise ein Elektron-Loch-Paar im p-dotierten Teil absorbiert, so kann das Elektron hier schnell mit einem der vielen Löcher rekombinieren oder zum Kontakt gelangen und ebenfalls verlorengehen. Nur wenn es in die Raumladungszone diffundiert und dort vom elektrischen Feld beschleunigt wird trägt es zum Kurzschlussstrom bzw zur Leerlaufspannung bei.

1.6 Aufbau von Solarzellen

Im Versuch werden Siliziumsolarzellen untersucht. Silizium ist ein indirekter Halbleiter, zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares wird also zusätzlich zum Photon noch eine Gitterschwingung benötigt, die den nötigen Quasiimpuls liefert um die Bandlücke zu überwinden. Da dieser Vorgang eine geringe Wahrscheinlichkeit hat, ist die Eindringtiefe der Photonen bei Silizium im Vergleich mit der Breite der Verarmungszone recht groß ($100\ \mu\text{m}$ gegenüber $1\ \mu\text{m}$). Es kommt also wesentlich häufiger vor, dass ein Photon außerhalb der Verarmungszone absorbiert wird. Beachtet man nun, dass Elektronen eine geringere effektive Masse als die Löcher besitzen und somit eine höhere Mobilität, ist es sinnvoll das n-dotierte Gebiet klein und das p-dotierte Gebiet groß zu wählen, sodass die meisten Photonen das n-Gebiet passieren und im p-Gebiet absorbiert werden. Um zu verhindern, dass zuviele der entstandenen Elektronen zum Kontakt diffundieren statt in die Raumladungszone, fügt man an den p-dotierten Halbleiterkristall noch einen höher dotierten Halbleiter an, um den Elektronen auf dem Weg zum Kontakt eine zusätzliche Potentialstufe in den Weg zu stellen. Nach diesen Überlegungen sollte eine Solarzelle ungefähr so aufgebaut sein:



Die Kontakte müssen genügend niederohmig und klein sein, um nicht zuviel Fläche abzuschirmen. Die Fläche zwischen den Kontakten wird mit einer Oxidschicht überzogen. Dies soll vor allem die Solarzelle schützen. Viel wichtiger ist jedoch, dass sie Oberflächenrekombination verhindert und die Reflexion des Lichts vermindert. Auch der untere Kontakt ist nicht komplett mit dem Silizium verbunden, wodurch die Zahl der Elektronen, die den Kontakt erreichen und verlorengehen, weiter reduziert wird.

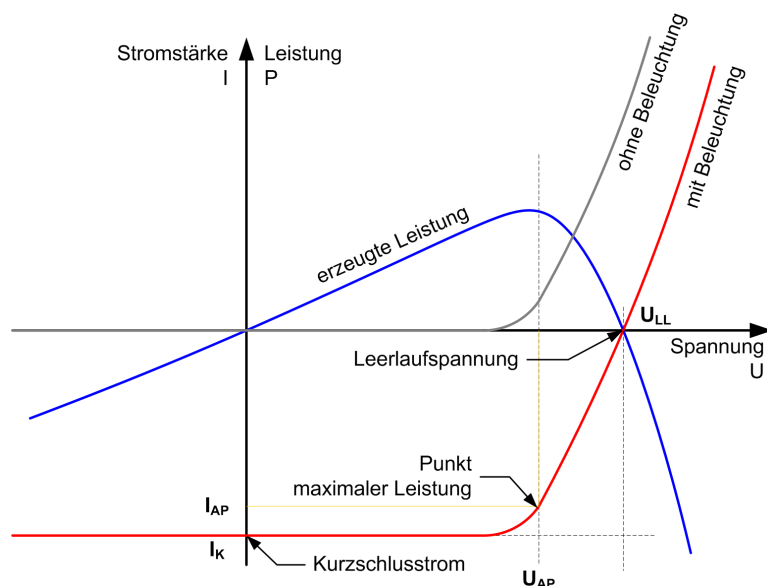


Um den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen, wird daran gearbeitet, transparente Oxide als Leiter zu verwenden. Um Reflexionen zu vermindern wird die Oberfläche mit einer umgekehrten Pyramiden strukturiert. Eine weitere Strategie, den Wirkungsgrad zu erhöhen, besteht darin, dass man zwei Solarzellen aus Material mit unterschiedlicher Bandlücke übereinander aufbaut (Tandemsolarzellen).

2 Experimentelle Grundlagen

2.1 Strom-Spannungs-Kennlinie

Für die Dunkelkennlinie der Solarzelle wird der selbe Verlauf wie bei einer herkömmlichen Siliziumdiode erwartet (grün):



Der in der Regel geringe Sperrstrom I_S fließt immer, auch in Sperrichtung. Für den Strom-Spannungs-Zusammenhang gilt also folgende Gleichung:

$$I_D(U) = I_S \left(\exp\left(\frac{eU}{\beta k_B T}\right) - 1 \right)$$

Wie bereits oben erwähnt werden unter Lichteinstrahlung neue Ladungsträger erzeugt, die einen intensitätsabhängigen Kurzschlussstrom I_K verursachen. Zusammen ergibt dies den erwarteten Zusammenhang einer Solarzelle:

$$I_{Solar}(U) = I_D(U) - I_K = I_S \left(\exp\left(\frac{eU}{\beta k_B T}\right) - 1 \right) - I_K$$

Im Diagramm ist dies blau dargestellt, die Dunkelkennlinie wird also einfach um I_K nach unten verschoben. Mit steigender Intensität sollte I_K größer werden und die blaue Kennlinie weiter nach unten wandern. Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung ergeben sich aus den Schnittpunkten mit der I - bzw. U -Achse. Der Faktor β wird Idealfaktor genannt. Er ist ungefähr 1 wenn die Absorption der Photonen mit Band-Band-Übergängen stattfinden, also Elektron-Loch-Paare erzeugt werden. Geht β gegen 2, so werden die Photonen hauptsächlich von Störstellen des Halbleitermaterials absorbiert, die Energieniveaus zwischen Leitungs- und Valenzband ausbilden und so auch Photonen mit niedriger Energie als dem Bandabstand absorbieren.

2.2 Füllfaktor und Wirkungsgrad

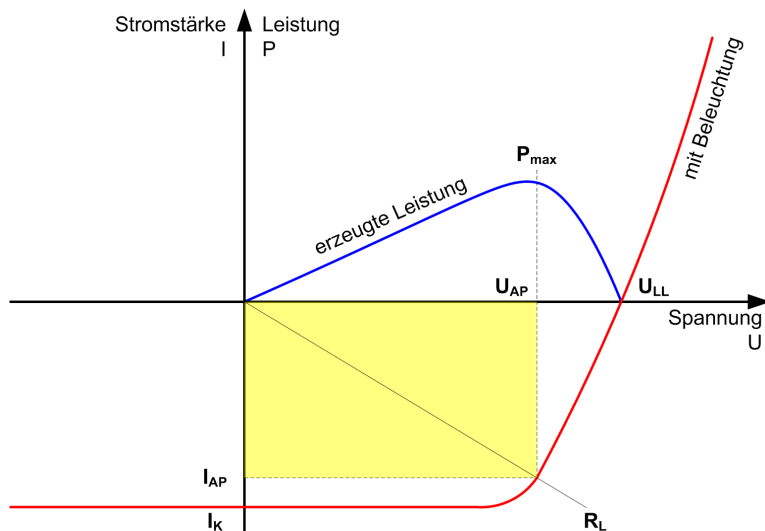
Zur Definition dieser beiden Größen betrachtet man den vierten Quadranten der Kennlinie etwas genauer. Die gelbe Fläche im folgenden Bild gibt die von der Solarzelle erzeugte Leistung an, $P = U \cdot I$. Diese ist für einen Punkt der Kennlinie, den Arbeitspunkt, maximal. Teilt man die maximale Leistung am Arbeitspunkt durch die eingestrahlte Leistung, so erhält man ein Maß wieviel der Leistung umgesetzt wird, den Wirkungsgrad. Im Versuch wird eine Lampe mit $P_L = 55 \text{ W}$ benutzt, die Flächen A der Solarzellen ist ebenfalls bekannt. Die eingestrahlte Leistung berechnet sich also zu $P_E = P_L \cdot \frac{A}{4\pi r^2}$. Für den Wirkungsgrad gilt also:

$$\eta = \frac{P_{AP}}{P_E} = \frac{U_{AP} \cdot I_{AP}}{P_L} \cdot \frac{4\pi r^2}{A}$$

Weiterhin kann man bei Solarzellen den sogenannten Füllfaktor FF angeben. Dieser ist definiert als Quotient aus maximaler Leistung und dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom:

$$FF = \frac{U_{AP} \cdot I_{AP}}{U_L \cdot I_K}$$

Der Füllfaktor ist also stets < 1 und ist ein Maß dafür, wie „rechteckig“ die Kennlinie ist und somit für die Qualität der Solarzelle. Wirkungsgrad und Füllfaktor können also durch Bestimmung des Arbeitspunktes und der Achsenschnittpunkte und über Materialdaten der Lampe bzw. Solarzelle bestimmt werden.



2.3 Intensitätsabhängigkeit

Der erste Versuchsteil beschäftigt sich mit der Intensitätsabhängigkeit der Kennlinie. Der Kurzschlussstrom I_K ist proportional zur Bestrahlungsstärke und somit zur eingestrahlenen Leistung P_E . Der theoretische Verlauf der Kennlinie wurde oben erwähnt, um die Leerlaufspannung zu berechnen setzt man hier $I(U) = 0$:

$$U_L = \frac{\beta k T}{q} \ln \left(\frac{I_K}{I_S} + 1 \right) \approx \frac{\beta k T}{q} \ln \left(\frac{I_K}{I_S} \right)$$

Die Leerlaufspannung ist also proportional zum Logarithmus der eingestrahlenen Leistung, $U_L \propto \ln(P_E)$. Wir erwarten also einen logarithmischen Abfall mit dem Abstand.

2.4 Wellenlängenabhängigkeit

Der Kurzschlussstrom soll in Abhängigkeit der Wellenlänge des eingestrahlenen Lichts gemessen werden. Dazu wird ein Monochromator verwendet, bei dem ein Schrittmotor die betrachtete Wellenlänge einstellt. Ab einer gewissen Wellenlänge reicht die Energie der Photonen nicht mehr aus die Energie der Bandlücke zu überwinden und somit neue Elektron-Loch-Paare zu erzeugen. Dies sollte sich im Spektrum deutlich als plötzliches Absinken des Kurzschlussstroms bemerkbar machen. Bestimmt man die Wellenlänge λ_0 , bei der der Abbruch auftritt, kann man den Bandabstand E_G bestimmen, denn es ist $E_G \approx \frac{hc}{\lambda_0}$.

2.5 Temperaturabhängigkeit

Im dritten Teil der Versuchs soll die Kennlinie schließlich noch temperaturabhängig untersucht werden und ebenfalls die Größe der Bandlücke bestimmt werden. Der Kurzschlussstrom hängt nicht von der Temperatur ab. Da jedoch durch thermische Anregung die Zahl der Ladungsträger steigt wird auch der Sperrstrom I_S mit der Temperatur steigen, es gilt

$$I_S = I_{S,0} \cdot \exp \left(-\frac{E_G}{\beta k T} \right)$$

Setzt man dies in die Formel für die Leerlaufspannung ein erhält man folgenden Zusammenhang:

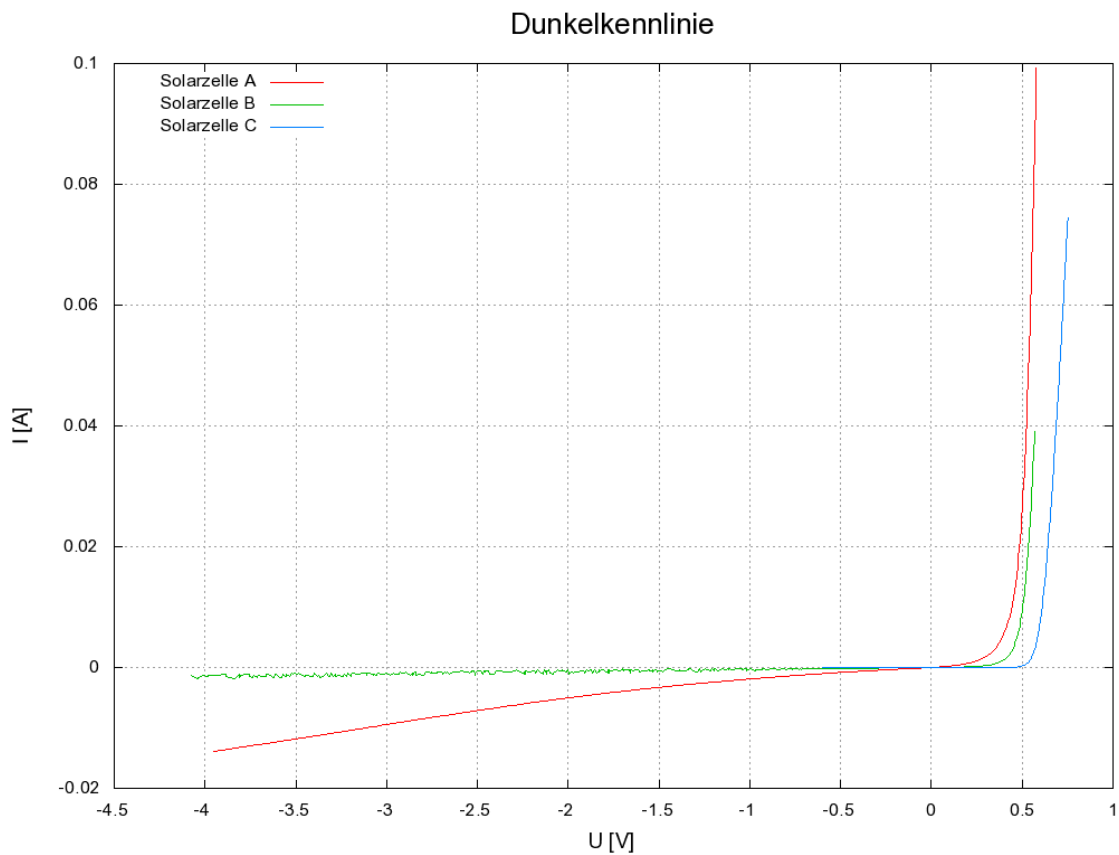
$$U_L \approx \frac{\beta k T}{q} \ln \left(\frac{I_K}{I_S} \right) = \frac{\beta k T}{q} \left(\ln(I_K) - \ln(I_{S,0}) + \frac{E_G}{\beta k T} \right) = \frac{\beta k T}{q} (\ln(I_K) - \ln(I_{S,0})) + \frac{E_G}{q}$$

$$\lim_{T \rightarrow 0} U_L = \frac{E_G}{q} \quad \implies \quad E_G = q \cdot U_L(T = 0)$$

3 Auswertung

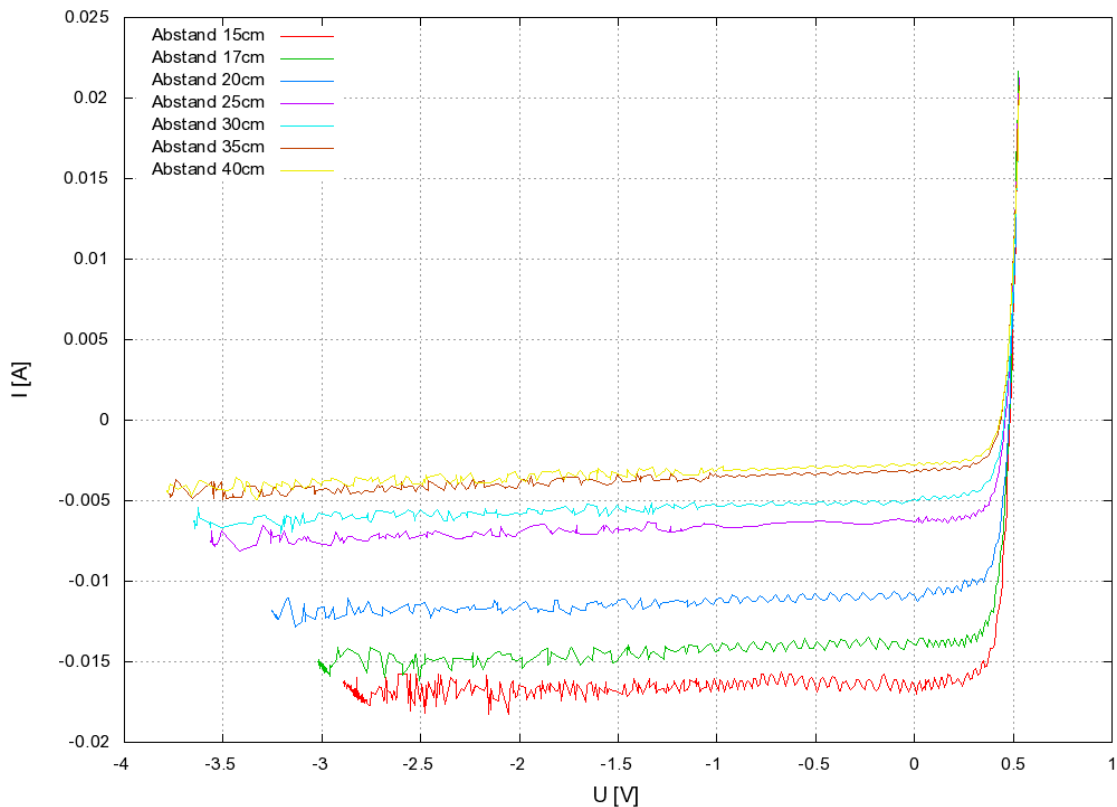
3.1 Intensitätsabhängige Messung der Kennlinien

In dieser Aufgabe sollten die Strom-Spannungs-Kennlinien dreier Silizium-Solarzellen (A, B und C) in Abhängigkeit der Intensität der Strahlungsquelle ausgemessen werden. Hierzu wurde der Abstand der Strahlungsquelle von der Solarzelle variiert. Dabei war es leider nicht möglich Abstände unter 15 cm zu messen, da sich die Solarzelle anscheinend zu stark erhitze. Zunächst wurde jedoch die Dunkelkennlinien bei abgedunkelter Solarzelle aufgenommen. Diese wurden im folgenden Diagramm zusammen aufgetragen. Man erkennt in Durchlassrichtung deutlich den zu erwartenden exponentiellen Anstieg, sowie in Sperrrichtung bei der Solarzelle B einen ungefähr konstanten Verlauf. Dieser lässt sich auch bei Solarzelle C erahnen, leider wurde hier nicht weit genug gemessen. Solarzelle A zeigt in Sperrrichtung einen deutlichen Abfall. Es kann sich nicht um einen Durchbruch handeln, da der Abfall nicht plötzlich auftritt, wie bei einem Durchbruch zu erwarten, sondern kontinuierlich von statten geht.



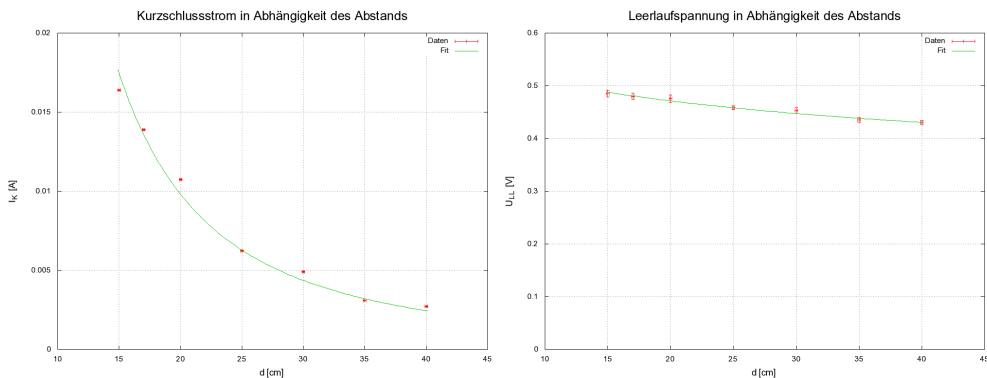
Die intensitätsabhängige Messung wurde im Folgenden nur mit Solarzelle B durchgeführt.

Strom-Spannungs-Kennlinie von Solarzelle B



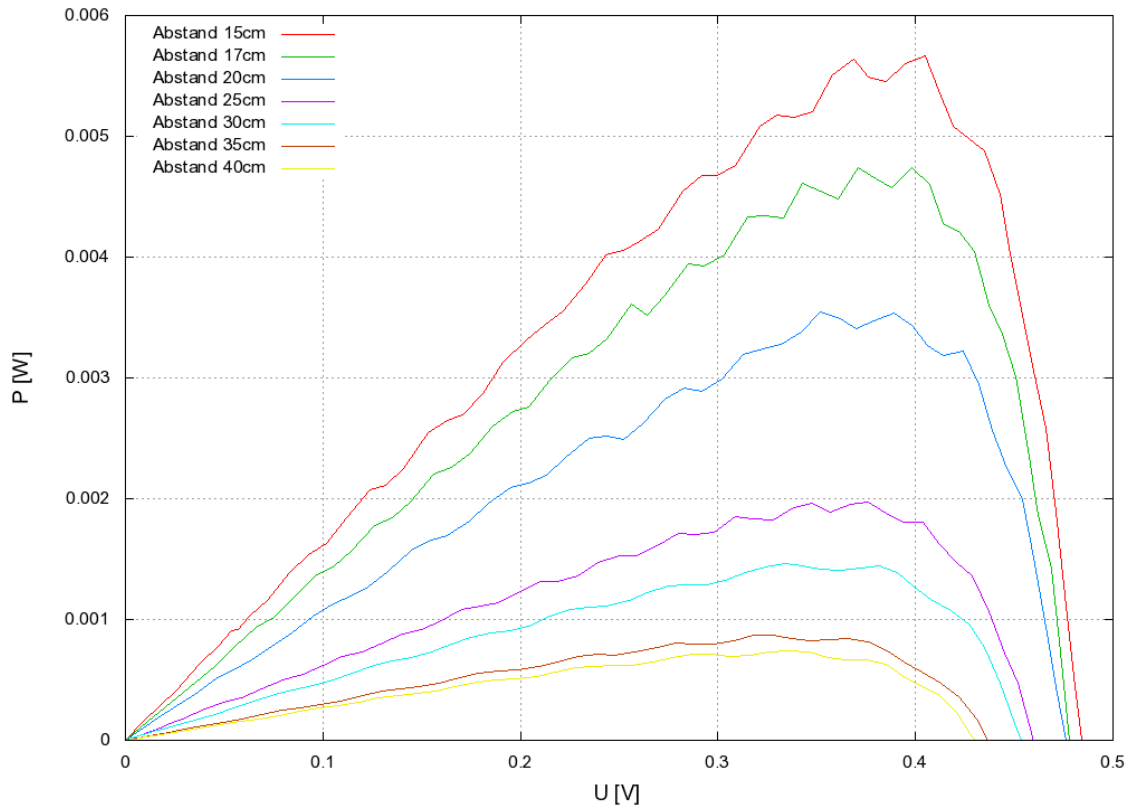
An diese Kurven wurde jeweils die Kennlinienfunktion angepasst. Die daraus gewonnenen Parameter sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Die Kurvenanpassungen sind am Ende des Protokolls angefügt.

Man erkennt deutlich einen Abfall des Kurzschlussstroms mit zunehmendem Abstand, wie erwartet ist $I_K \propto \frac{1}{r^2}$, sowie einen leichten Abfall der Leerlaufspannung. Letzterer ist proportional zu $-\ln(r)$, wie man der angepassten Funktion entnehmen kann.



Nun sollten noch Wirkungsgrad und Füllfaktor bestimmt werden. Dazu musste der Arbeitspunkt der Solarzelle, also der Punkt maximaler Leistung, bestimmt werden. Hierzu wurde zunächst die Leistung der Solarzelle berechnet und deren Maximum bestimmt.

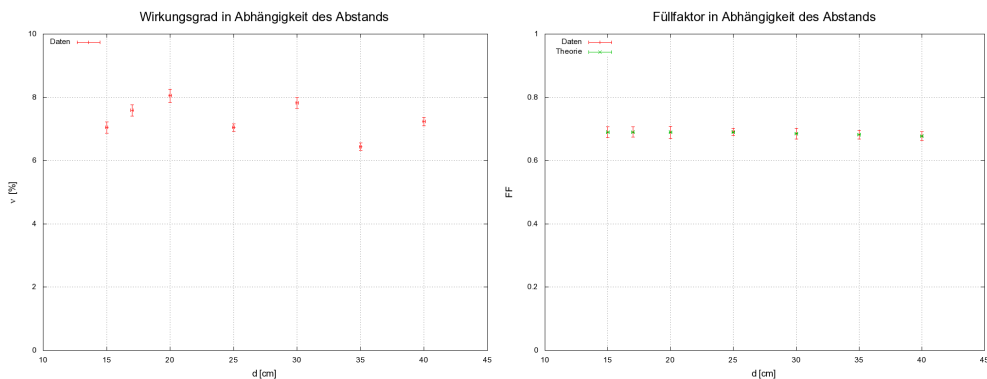
Leistung von Solarzelle B

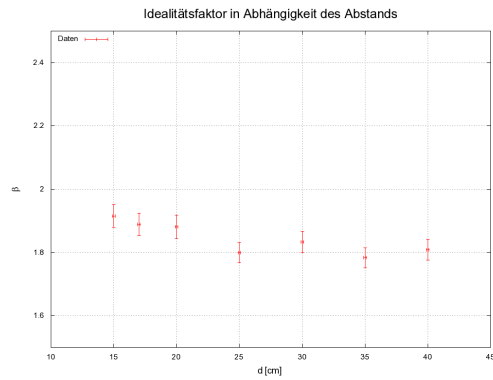


Es ergeben sich für den Wirkungsgrad, Füllfaktor (Theorieformel aus der Vorbereitungsmappe) und Idealitätsfaktor folgende Werte:

Abstand r	Wirkungsgrad η	Füllfaktor FF	Füllfaktor (Theorie)	Idealitätsfaktor β
15 cm	0.070 ± 0.002	0.69 ± 0.02	0.689	1.92 ± 0.04
17 cm	0.076 ± 0.002	0.69 ± 0.02	0.690	1.89 ± 0.04
20 cm	0.080 ± 0.002	0.69 ± 0.02	0.689	1.88 ± 0.04
25 cm	0.070 ± 0.001	0.69 ± 0.01	0.691	1.80 ± 0.03
30 cm	0.078 ± 0.002	0.68 ± 0.02	0.684	1.83 ± 0.03
35 cm	0.064 ± 0.001	0.68 ± 0.01	0.682	1.78 ± 0.03
40 cm	0.072 ± 0.001	0.68 ± 0.01	0.677	1.81 ± 0.03

Der Füllfaktor stimmt also recht gut mit der Theorie überein, außerdem erhalten wir einen Wirkungsgrad von durchschnittlich 7,3 %. Der Idealitätsfaktor liegt ungefähr bei 2, was darauf hindeutet, dass in der Solarzelle das Licht hauptsächlich an Stöstellen absorbiert wird. In den nachfolgenden Diagrammen wurden die drei Größen noch über dem Abstand aufgetragen.

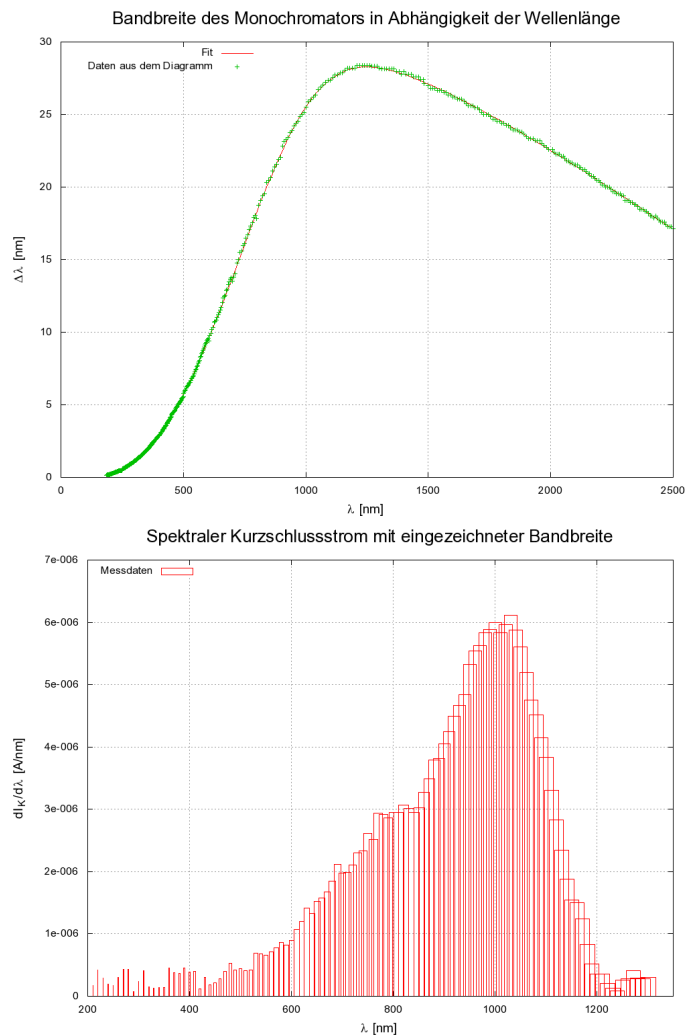




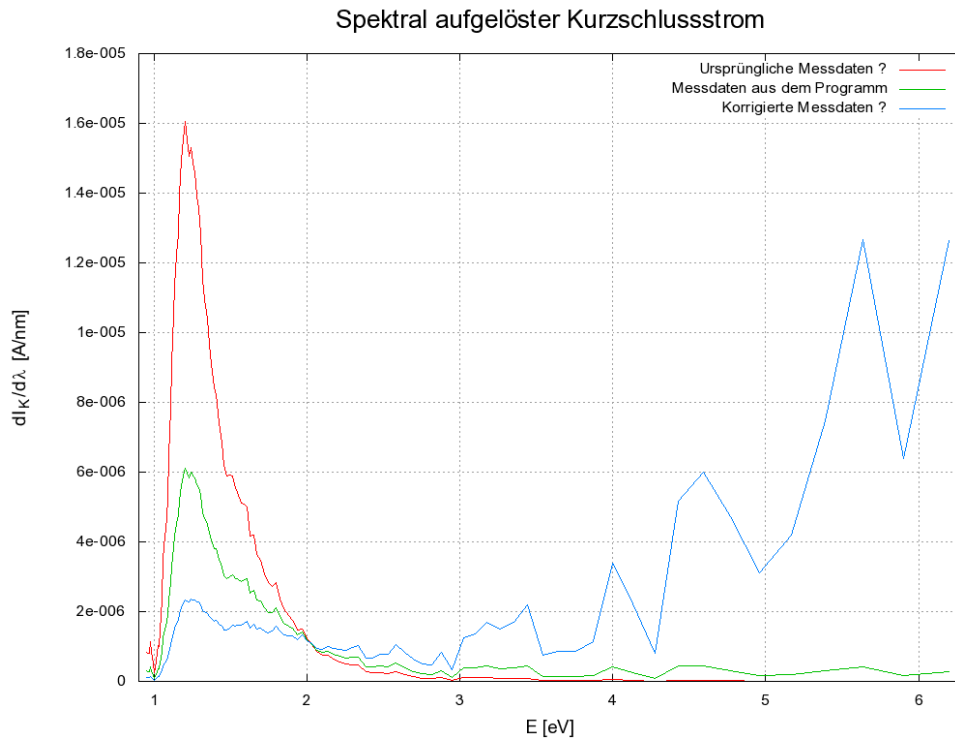
Der Wirkungsgrad bei Sonneneinstrahlung wäre höher, da nach dem Planckschen Strahlungsgesetz das Intensitätsmaximum der Sonne mit 6000 K bei einer höheren Frequenz liegt, als das der Halogenlampe mit ca. 3000 K . Das bedeutet also, dass die Sonne mehr Photonen aussendet, die in der Solarzelle einen Strom hervorrufen.

4 Wellenlängenabhängigkeit des Kurzschlussstroms

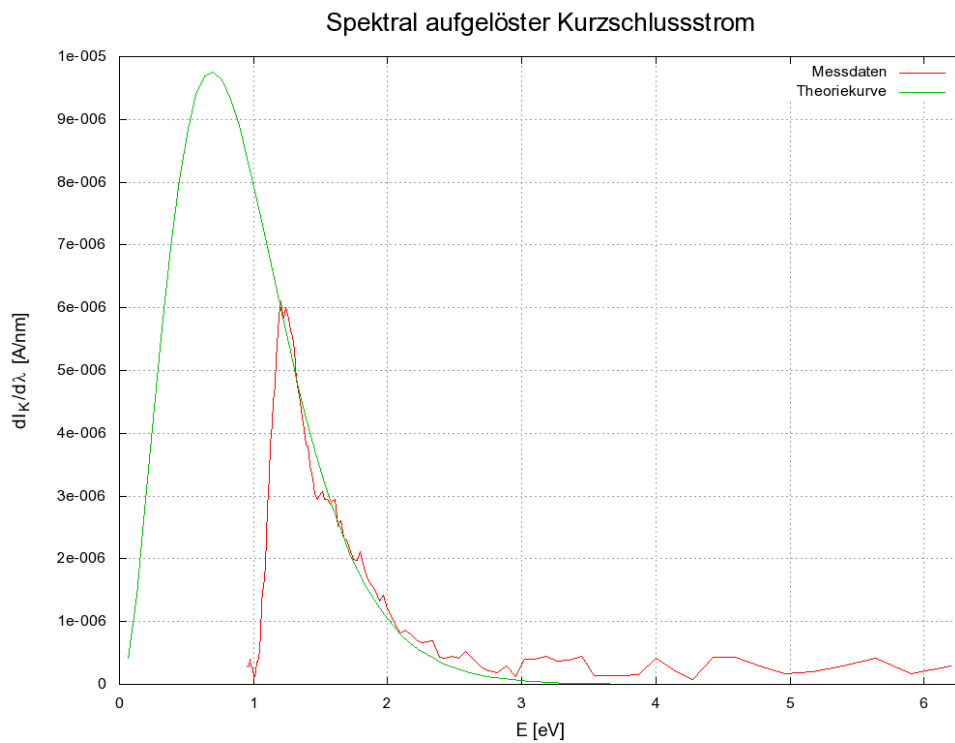
Mit Hilfe eines Monochromators wurde das Licht der Halogenlampe spektral aufgelöst und der Kurzschlussstrom gemessen. Die Wellenlängenabhängigkeit der Bandbreite des Monochromators wurde von und digitalisiert und durch eine empirische Kurvenanpassung approximiert. Es fällt auf, dass die Bandbreite bei größeren Wellenlängen den Abstand der Messpunkte übersteigt. Dies verfälscht die Messung natürlich.



Es ergab sich der grüne Verlauf des Kurzschlussstroms.



Da uns nicht bekannt ist inwieweit LabView die Bandbreite bereits bei den Ergebnissen berücksichtigt, haben wir zusätzlich zur gemessenen Kurve die beiden Möglichkeiten, dass die Bandbreitenberücksichtigung uns überlassen wird (blau) bzw. wurde versucht die ursprünglichen Daten zu rekonstruieren (rot). In den Diagrammen fällt vor allem ein untypisches Verhalten bei der Annäherung an den Peak auf. Vermutlich wird in diesem Bereich von LabView die Bandbreite falsch berücksichtigt.



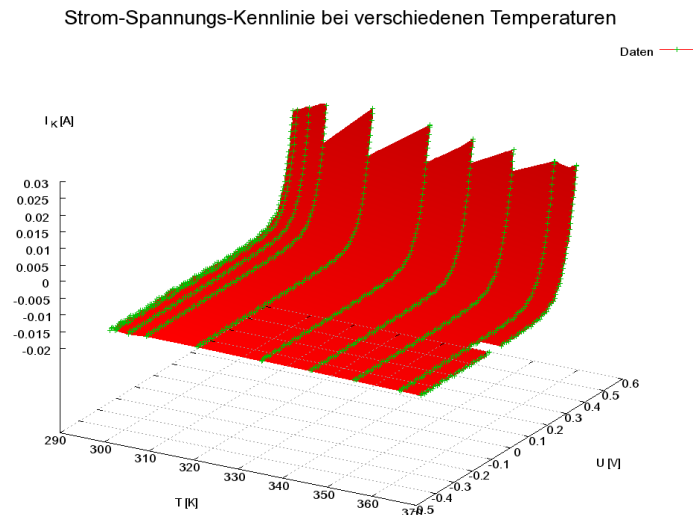
Ab einer Photonenenergie von 1,2 eV ist ein mehr oder weniger plötzlicher Abfall des Spektrums zu beobachten. Dies ist damit zu erklären, dass die Energie der Photonen kleiner ist als die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband von Silizium und keine Elektron-Loch-Paare erzeugt werden können.

Die Abbruchenergie ist somit also die Größe der Bandlücke. Der Literaturwert beträgt $1,14 \text{ eV}$, was sehr gut mit unserem Wert übereinstimmt.

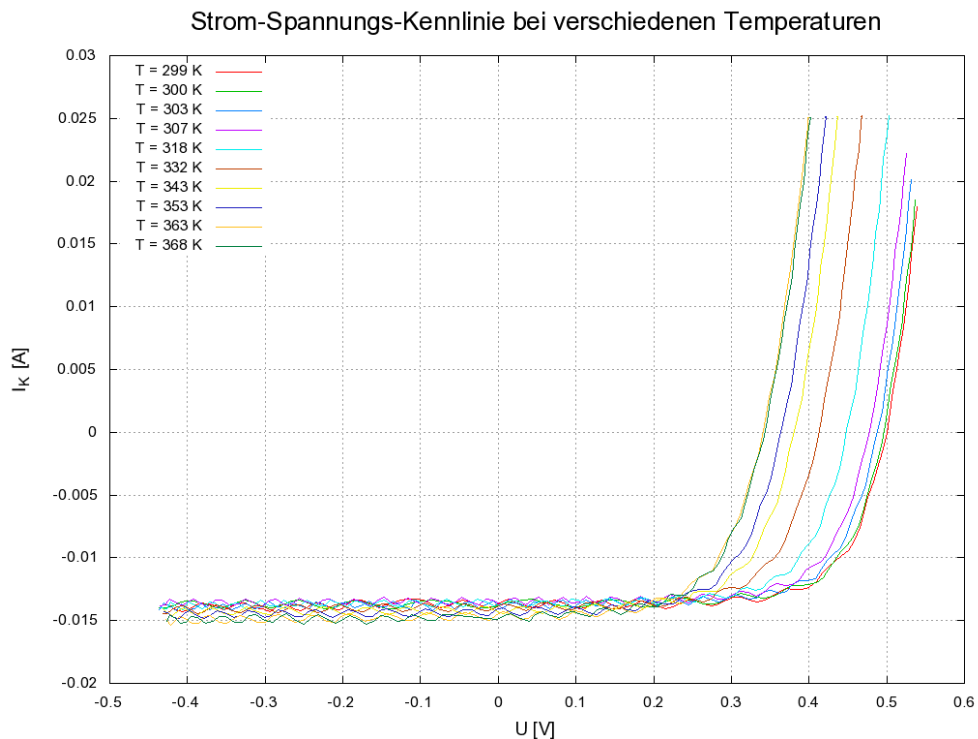
Im folgenden Diagramm wurde zusätzlich mit der Planckschen Strahlungsformel eine Theoriekurve angefügt (mit $T = 2827\text{K}$). Die obige Aussage, dass für Sonnenlicht der Wirkungsgrad ansteigt ist hier leicht nachvollziehbar, da mit höher Temperatur das Intensitätsmaximum der Energiedichte weiter nach rechts in den für die Solarzelle verwertbaren Bereich wandert.

5 Temperaturabhängigkeit der Kennlinien

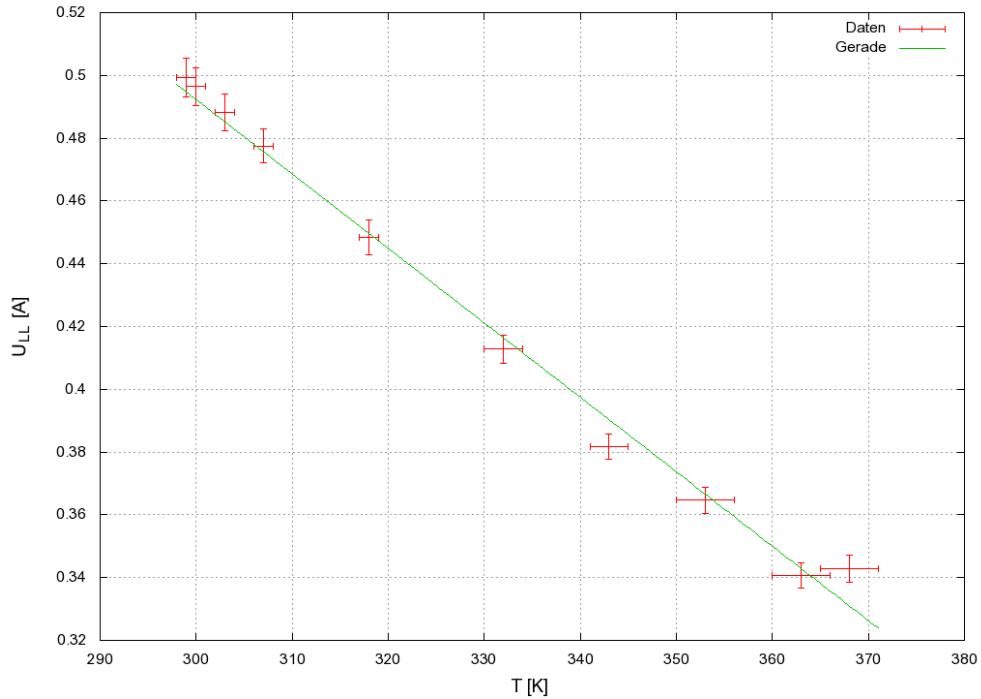
In der dritten Aufgabe wurde die Kennlinie der Solarzelle B temperaturabhängig gemessen. Dies übernahm wiederum LabView. Die erhaltenen Daten wurden in folgendem, formschönen „Wasserfallplot“ dargestellt.



In der zweidimensionalen Darstellung erkennt man deutlich, wie die Leerlaufspannung mit steigender Temperatur abnimmt, der Verlauf also steiler wird. Dies wurde auch nochmals in einem extra Diagramm hervorgehoben.



Leerlaufspannung in Abhängigkeit der Temperatur

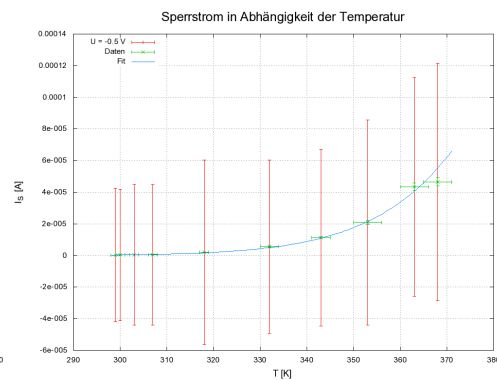
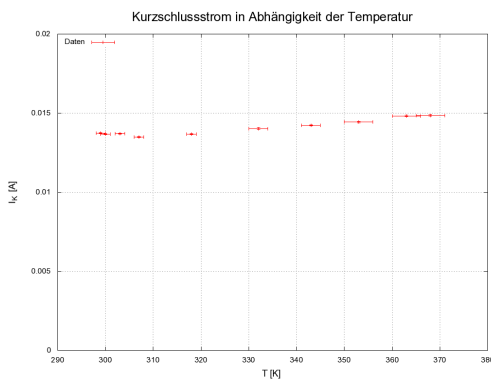


Extrapoliert man den Verlauf der Leerlaufspannung für $T = 0$ mit der Formel der Vorbereitung, so erhält man die Energie der Bandlücke. Wir erhalten einen Wert von $(1.20 \pm 0.03) \text{ eV}$, was mit dem Literaturwert von 1.14 eV wieder sehr gut übereinstimmt

Außerdem wurden Kurzschlussstrom (bei $U = 0 \text{ V}$) und Sperrstrom (bei $U = -0,5 \text{ V}$) bestimmt.

$$I_K (U = 0 \text{ V}) = (0.01373 \pm 0,00008) \text{ A}$$

$$I_S (U = -0,5 \text{ V}) = 2,451 \cdot 10^5 \exp\left(-8174.72 \cdot \frac{K}{T}\right) \text{ A}$$



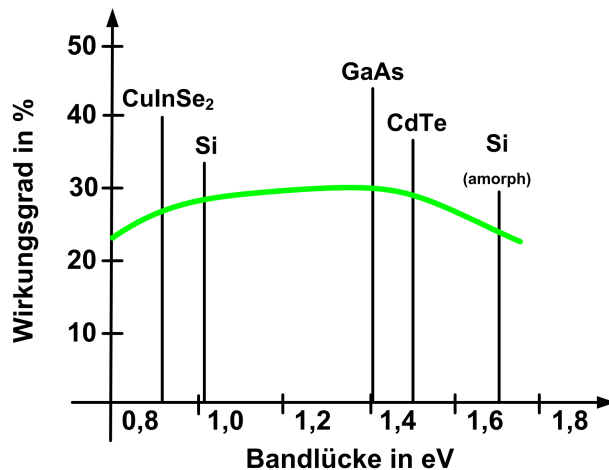
Man erwartet, wie in der Vorbereitung erwähnt, dass der Kurzschlussstrom ungefähr konstant bleibt, wohingegen der Sperrstrom exponentiell ansteigen soll. Der relativ große Fehler auf den Sperrstrom kommt wohl von den starken Oszillationen der Kennlinie.

5.1 Vergleich mit Kernenergie

Ein Solarkraftwerk mit einer Leistung in der Größenordnung eines Kernkraftwerkes wie z. B. Philippsburg mit $P_{el} = 1 \text{ GW}$ benötigt in unseren Breiten (Einstrahlleistung $\Lambda = 120 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) eine Fläche A von

$$A = \frac{P_{el}}{\eta \cdot \Lambda} = \frac{1 \text{ GW}}{\eta \cdot 120 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = \frac{8,33 \text{ km}^2}{\eta}$$

Aus theoretischen Überlegungen folgt, dass der Wirkungsgrad nicht größer als 30 % sein kann (siehe Vorbereitungsmappe, Abschnitt 2.2.4 / Ausnahme: Tandemsolarzellen mit Rekord $\eta = 31,1\%$ [ISE]).



Maximale theoretische Wirkungsgrade verschiedener Solarzellen ([SolSrv])

Also muss die Fläche des Solarkraftwerkes mindestens $27,77 \text{ km}^2$ betragen.

Mit den von uns bestimmten Wirkungsgraden (Mittelwert 0,073) ergibt sich eine Fläche von 114 km^2 . Zum Vergleich: Karlsruhe hat eine Fläche von $173,46 \text{ km}^2$ (Quelle: [WP-KA]).