

Ergänzung: 10. Bauelemente

Hinweis: Der Inhalt dieses Kapitels ist seit dem Sommersemester 2017 nicht mehr Bestandteil der Lehrveranstaltung "Grundlagen der Materialwissenschaft für Elektro- und Informationstechniker". Dieses Kapitel steht aber für Interessierte hier weiterhin zur Verfügung.

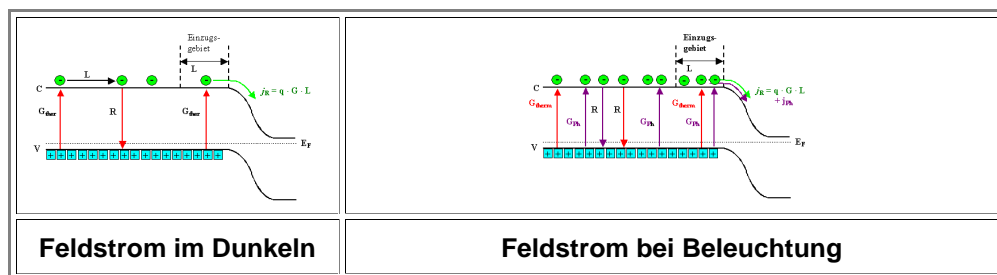
10.1 Solarzellen

10.1.1 Die einfache Solarzelle

Quantitative Betrachtung

Das einzige, was man über Solarzellen zunächst wissen muß, ist, daß die "ideale" Solarzelle einfach eine flächige Diode, d. h. ein großflächiger **pn-Übergang** ist.

- Wir konzentrieren uns hier deshalb erstmal auf eine "ideale" Solarzelle (die es in der harten Realität aber nicht wirklich gibt) und schauen uns deshalb als erstes den **beleuchteten pn-Übergang** an.
- Wichtig ist dabei *nur* der Feldstrom. Schauen wir uns das mal im Vergleich dunkel / beleuchtet an:



Hinweis: In dieser Abbildung sind die Teilströme noch englisch beschriftet: Feldstrom = reverse current j_F

- In *Dunkeln* ergibt sich der gezeigte Feldstrom der Elektronen als Ladung $q = -e$ mal *rein thermische* Generationsrate G_{ther} mal Einzugsgebiet = *Diffusionslänge* L . Im Gleichgewicht rekombiniert weit weg von dem **pn-Übergang** genau so viel wie generiert wird, d.h. die Rekombinationsrate $R = G = n_{min} / \tau$.
- Jetzt beleuchten wir das Ganze mit Licht irgendeiner Intensität, das genügend Energie hat, um die Bandlücke zu überwinden, d. h. $h\nu \geq E_G$.
- Überall im Halbleiter werden jetzt durch Absorption der Photonen *zusätzliche* Elektron-Loch-Paare generiert, und zwar mit der *zusätzlichen* Generationsrate G_{ph} . Weit weg vom **pn-Übergang** verschwinden diese zusätzlichen Ladungsträger wieder durch Rekombination. Die Rekombinationsrate geht dann ebenfalls entsprechend hoch und es gilt weiterhin $R = G$, allerdings sind das nicht mehr die Gleichgewichtsraten!
- In der Nähe des **pn-Übergangs** tragen die photogenerierten Minoritäten jetzt aber mit j_{ph} zum Feldstrom bei. Er erhöht sich damit auf

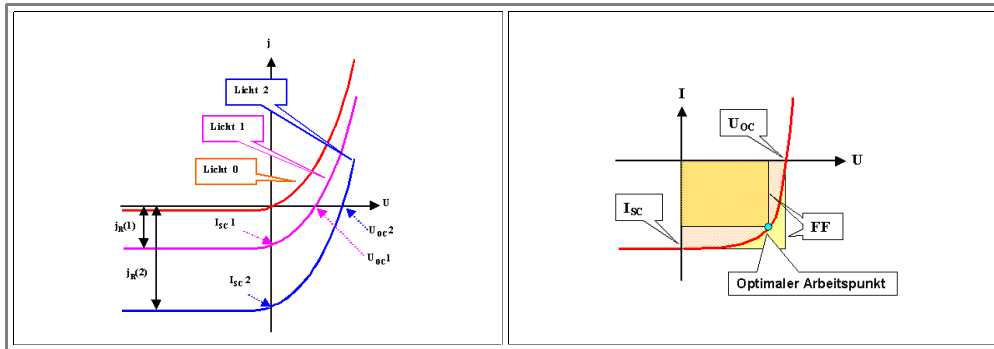
$$j_F(\text{beleuchtet}) = j_F(\text{dunkel}) + j_F(\text{Licht})$$

- Wieviel Feldstrom $j_F(\text{Licht}) = j_{ph}$ produziert wird, hängt in relativ klarer Weise offenbar im wesentlichen von Lichtintensität und Diffusionslänge ab.
- Fertig**. Wir haben alles, was wir brauchen, wir müssen es nur noch aufschreiben oder aufmalen.
- Wir gehen zurück zur Kennlinie des **pn-Übergangs** und verwenden jetzt $j_F(\text{beleuchtet})$ statt $j_F(\text{dunkel})$. Wir erhalten (was man auch direkt sehen kann) für die Stromdichte-Spannungs-Kennlinie oder **Diodengleichung bei Beleuchtung**:

$$j(U_{ex}) = \left(\frac{e \cdot L \cdot n_{Min}(L)}{\tau} + \frac{e \cdot L \cdot n_{Min}(V)}{\tau} \right) \cdot \left(\exp\left(\frac{eU_{ex}}{k_B T}\right) - 1 \right) - j_F(\text{Licht})$$

Wir müssen also von einer gegebenen Kennlinie immer nur $j_F(\text{Licht})$ oder, um einen anderen Namen zu benutzen, $j_F(\text{solar})$ abziehen, denn alles andere bleibt unverändert. Das gilt auch dann noch, wenn eine graphisch vorliegende Kennlinie auf sehr viel komplexeren Gleichungen als der obigen beruht. Schauen wir uns die resultierende Kennlinie mal graphisch an.

Wir schauen auf die **alte Zeichnung** und ziehen – je nach Lichteinfall – einen mehr oder weniger großen konstanten (Feld-)Strom ab. Das sieht dann so aus:



Hinweis: In dieser Abbildung sind die Teilströme noch englisch beschriftet: Feldstrom = reverse current j_R

Alles ist klar und berechenbar. Bei näherer Betrachtung sehen wir, daß nur der **4. Quadrant** interessant ist; er ist im rechten Bild groß dargestellt.

Offenbar erhalten wir bei Leerlauf (engl. "open circuit", abgekürzt **OC**), d. h. es fließt per definitionem kein externer Strom, jetzt eine **Leerlaufspannung** U_L bzw. "**open circuit voltage**" U_{OC} an den beiden Enden des pn-Übergangs = Anschlüssen der Solarzelle. Sie ist nach der obigen Formel berechenbar; das wollen wir auch mal in einer Übung tun.

Übungsaufgabe 10.1-1

Leerlaufspannung einer Solarzelle

Als anderes Extrem können wir die Solarzelle = pn-Übergang auch kurzschließen, d. h. per definitionem ist die Spannung jetzt $U = 0 \text{ V}$. Dann fließt der Kurzschlußstrom I_K bzw. der "**short-circuit current**" I_{SC} , der beträchtlich sein kann. Wie beträchtlich, sehen wir aus der schnellen Übung:

Fragebogen

Schnelle Fragen zu 10.1

Wir wollen aber weder Strom I noch Spannung U , sondern Leistung $P = UI$. Dazu definieren wir einen **Arbeitspunkt** (d. h. einen Punkt auf der Kennlinie), bei dem UI maximal wird. Dieser **optimale Arbeitspunkt = Arbeitspunkt maximaler Leistung** (engl.: maximum power point, MPP) definiert gleichzeitig den exakten Wert des Verbraucherwiderstands. Auch dazu machen wir uns in der **Übung** ein paar eigene Gedanken.

Im obigen Bild ist die Kennlinie zwischen zwei Rechtecken geführt, das kleinere ist durch den optimalen Arbeitspunkt definiert. Die Fläche des großen Rechtecks ist offenbar $U_{OC} \cdot I_{SC}$, die Fläche des kleineren Rechtecks ist nicht auf Anhieb klar, aber bei gegebener Kennlinie wohl berechenbar. Das **Verhältnis der Flächen** nennen wir den **Füllfaktor** (FF), er ist eine wichtige Kenngröße von (realen) Solarzellen.

In Formeln: $FF = U_{OC} \cdot I_{SC} / (U_{MPP} \cdot I_{MPP})$

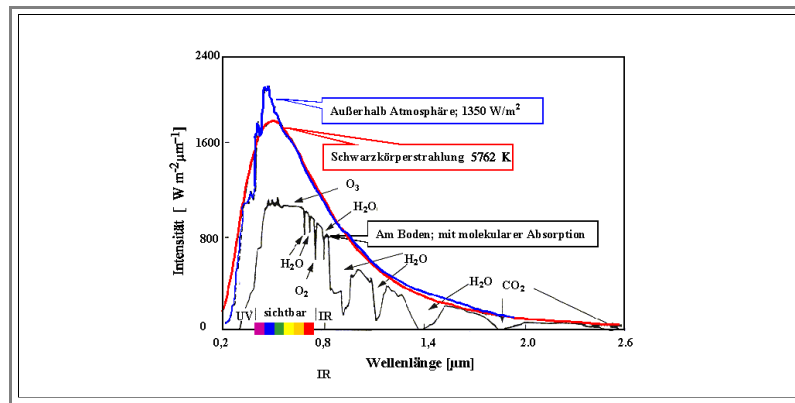
Das sind einfache Definitionen, und wir halten mal fest: Leerlaufspannung, Kurzschlußstrom, optimaler Arbeitspunkt, Füllfaktor, was immer wir wollen – wir können es über die Kennlinie **ausrechnen**, als Funktion der **Material- und Technologie-Parameter** sowie der **Temperatur**.

Zum vollständigen Glück fehlt uns nur noch $j_F(\text{solar})$ selbst, der zusätzliche beleuchtungsbedingte Feldstrom. Der ist aber nicht so ganz einfach zu packen; wir geben uns damit zufrieden, daß er groß wird, wenn die Diffusionslänge groß ist.

Maximaler Wirkungsgrad und absolute Energieproduktion

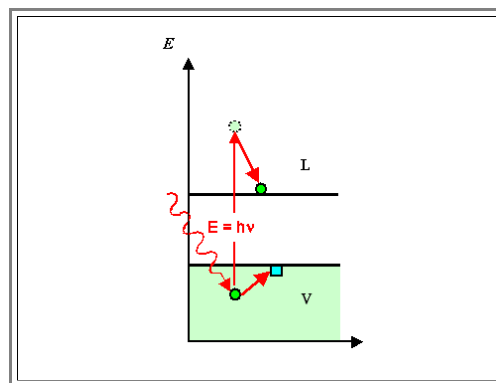
Was uns brennend interessiert, ist natürlich die bei allen Energiewandlern immer im Vordergrund stehende Frage nach dem **Wirkungsgrad** η , d. h. dem Verhältnis zwischen Energie raus und Energie rein (in %).

Wollen mal sehen. Die Sonne sendet uns Photonen mit allen möglichen Energien – entsprechend allen möglichen "Farben" (die unsichtbaren inklusive), von Infrarot (**IR**) bis zum Ultraviolett (**UV**). Wir haben ein festes Sonnenspektrum. Es sieht (als Funktion der Wellenlänge $\lambda = c/\nu$; ν : Frequenz) so aus:



Zunächst mal stellen wir fest:

- Nur Photonen mit einer Energie größer als die der Bandlücke (oder $\lambda < hc/E_G$) werden im Halbleiter absorbiert. Sie befördern ein Elektron aus dem Valenzband ins Leitungsband, generieren also ein Elektron-Loch-Paar und tragen damit zum Solarteil des Feldstroms bei.
- Für **Si** sind das im obigen Bild alle bei $\lambda < \text{ca. } 1 \mu\text{m}$; wir nehmen also einen Teil der Infrarotstrahlung noch mit. Einen Teil aber verlieren wir, der Wirkungsgrad η kann damit schon nicht mehr **100 %** erreichen. Um diese Verluste zu vermeiden, können wir natürlich einen Halbleiter mit kleinerer Bandlücke wählen, z. B. **Ge**.
- Die Photonen mit genug Energie werden absorbiert und können damit brauchbare elektrische Energie produzieren. Das tun sie aber nur mit Einschränkungen.
- Den grundlegenden Prozeß der Absorption haben wir bereits betrachtet; hier ist nochmals ein passendes Bild. Es zeigt, was ein Photon mit großer Energie im **Si** so anrichtet.



- Ein Elektron energetisch tief im Valenzband wird um $h\nu \gg E_G$ weit nach oben ins Leitungsband geworfen; ein hochenergetisches Elektron-Loch-Paar ist entstanden. Die beiden frischgebackenen Ladungsträger werden sich aber sofort (innerhalb 10^{-13} s) auf energetisch attraktivere Plätze begeben – die Löcher steigen auf zur Valenzbandkante, die Elektronen fallen runter auf die Leitungsbandkante. Von der Anfangsenergie $h\nu$ ist nur noch E_G übrig, der Rest hat nur das **Si** aufgewärmt. Das geht natürlich vom Wirkungsgrad ab. Was als nutzbarer Anteil übrigbleibt, ist [hier](#) gezeigt.

- Die Lösung für diesen Verlust ist einfach: Wir nehmen einen Halbleiter mit größerer Bandlücke, z. B. **GaAs**.

Wie nun – kleinere oder größere Bandlücke? Wir haben ein klassisches *Dilemma* (griechisch; Zwangslage; Wahl zwischen zwei Übeln). Politiker vermeiden in so einem Fall eine Entscheidung und fangen zur Ablenkung einen Krieg an (oder zerreden das Problem bis zur Unkenntlichkeit); Theologen postulieren, dass durch göttliche Intervention irgendwie doch beides gleichzeitig geht (z. B. Kinder haben *und* Jungfrau bleiben!). Ingenieure wissen, daß jetzt nur noch die *Optimierung* hilft: Wir machen das Beste daraus.

- Für *terrestrische* Anwendungen (als Abgrenzung zur Raumfahrt) haben wir nur das **solare Spektrum** – so wie es bei uns auf dem Grund des Lufozeans ankommt (oben eingezeichnet).

Damit erhält man folgendes Ergebnis (siehe [hier](#)):

- Die optimale Bandlücke E_G^{opt} liegt bei ca. **1,4 eV** (also gerade noch [im Infraroten](#)); **GaAs** würde als Material [gut passen](#).
- Der zugehörige maximale Wirkungsgrad ist $\eta_{\text{max}}(E_G^{\text{opt}}) \approx 30 \%$. Mehr ist aus einer Solarzelle aus *einem* Optimalmaterial nicht herauszuholen.
- Für **Si** mit einem *nicht* optimalen Bandgap von **1,1 eV** erhält man $\eta_{\text{max}}(\text{Si}) \approx 28 \%$.

Soweit zur idealen Solarzelle. Real erzielbare Wirkungsgrade mit realen (= billigen) Solarzellen in einer Massenproduktion liegen deutlich niedriger. $\eta_{\text{real}}(\text{Si}) \approx (15 - 17) \%$ kann als derzeit (**2009**) guter Wert gelten. (Nachtrag: Im Jahr 2016 gilt ein Wirkungsgrad um die 20 % als Standard.)

Die Sonne und Du

- Was schickt uns die Sonnen an Lichtleistung denn so? Am Äquator, in Kiel oder sonstwo? Mittags oder um Mitternacht?
- Wir merken uns nur Größenordnungen mit Zehnerzahlen.
- Die absolute Leistungsdichte der Sonnenstrahlung (Äquator, "high noon", keine Wolken) liegt ganz grob (und leicht zu merken) bei **1 kW/m²**. Daran wird auch noch so viel Forschung nichts ändern. Allenfalls die Zerstörung der Ozonschicht (O₃) bringt hier Fortschritte, wie ein Blick auf's [Spektrum](#) zeigt; aber zu Risiken und Nebenwirkungen sollten Sie hier **wirklich** dringend ihren Arzt und Apotheker befragen (und eventuell Ihren Politiker schlagen)!
- Der **maximale** Output einer Solarzelle mit $\eta = 10\%$ liegt demnach – Faustregel – bei **100 W/m²**.
 - Da aber auch am Äquator nachts die Sonne nicht scheint und in höheren Breiten noch ein **cos** des Breitengrades einberechnet werden muß, wird man als Mittelwert über alles (Tag/Nacht, Sonne/Regen, Sommer/Winter, Tropen/Arktik) ganz ganz grob allenfalls **10 %** der Peakleistung im Jahresmittel ernten, also gerade mal **10 W/m²**.
 - Das sind aber alles glatte "Zehnerzahlen" zum Merken; in Wahrheit liegen wir günstiger, derzeit (**2009**) in Deutschland etwa bei mittleren **13 W/m²** (weiterhin bezogen auf den zuvor angesetzten Wirkungsgrad von 10 %)
 - Hier eine kleine Übersicht über wichtige "ungefähre" Zahlen; im Zweifel immer pro **m²**. Der [Link](#) bietet noch mehr Zahlen.
 - Maximale Sonnenleistung: **1kW**
 - "Peak"-Leistung von Solarmodulen: **200 W**
 - effektiver Mittelwert Solarmodul übers Jahr: **25 W**
 - Mittlerer Solarenergieertrag pro Jahr: **25 W · 24 h · 365 = 219 kWh**
 - Jahresbedarf elektr. Energie pro deutschem Kopf: **1 750 kWh** (wofür man die Stromrechnung zahlt)
 - Platzbedarf (pro Kopf) für Solarzellen, um Elektrizität zu erzeugen: **knapp 10 m²**.
 - Platzbedarf (pro Kopf) für Solarzellen, um alle Energie zu erzeugen: **ca. 40 m²**.
 - Dieser [Link](#) führt zu einer Powerpoint-Präsentation zum Generalthema.
- Es kann also nur darum gehen, das prinzipiell Mögliche erst mal überhaupt zu erreichen – und dann auch noch billig.
- Wie wichtig das ist, wird anhand von [Hintergrundinformationen zur Photovoltaik und zur allgemeinen Energiesituation](#) deutlich (sehr empfehlenswert; bitte diesen Link im Familien- und Freundeskreis verbreiten).
- Es wird Zeit für die Übungsaufgaben und die Verständnisfragen:

[Übung 10.1-2](#)

Solarenergie quantitativ

[Fragebogen](#)

Schnelle Fragen zu 10.1.1