

Kraun

$$T_{\text{sunne}} = 5800 \text{ K}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

Elementarladung

$$q = 1e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

Boltzmann-Konstante

$$k \text{ oder } k_B = 8,62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$$

$$\text{Plancksches Wirkungsquantum } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$$

Lichtgeschwindigkeit

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

$$\text{Stefan-Boltzmann-Konstante } \sigma_B = \frac{4\pi^5 \cdot k_B^4}{15h^3 \cdot c^3} = 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

$$\text{STC: } T = 25^\circ \text{C} \rightarrow \frac{kT}{q} (\text{STC}) = 0,0259 \text{ V}; \quad k \cdot T = 25,9 \text{ meV}$$

$$\frac{q}{kT} (\text{STC}) = 38,7 \frac{1}{\text{V}}$$

Optimierung von realen Solarzellen

- hoher Füllfaktor FF ($R_s = 0, R_p = \infty$)
- hoher Kurzschlussstrom J_{sc}
- hohe Leerlaufspannung V_{oc}

Optimierung im Füllfaktor FF ist relativ einfach, sofern J_{sc} und V_{oc} groß sind, dazu müssen elektrische Widerstandsverluste verhindert werden.

Eine hohe Kurzschlussstromdichte J_{sc} ist auch (relativ) einfach, meistens mit einer Optimierung der optischen Eigenschaften der Zelle verbunden.

Optimierung der Leerlaufspannung V_{oc} ist am Schwierigsten, aber der effektivste Weg den Wirkungsgrad der Zelle zu erhöhen - die "Sperrsättigungsstromdichte" J_0 muss so niedrig wie möglich werden und die Lebensdauer der Ladungsträger möglichst hoch (und die Idealität möglichst gering sein).

Die Zelle die am meisten Licht durch lässt sollte der Sonne zugewandt sein = Zelle mit größter Bandlücke

$$1 \text{ m}^2 = 10000 \text{ cm}^2 = 10^6 \text{ mm}^2$$

$$1 \text{ cm}^2 = 100 \text{ mm}^2$$

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 1000 \text{ mm} = 1 \cdot 10^6 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^9 \text{ nm}$$

$$1 \text{ cm} = 10 \text{ mm} = 10000 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^7 \text{ nm}$$

Solarstrahlung und Energieumsatz

Optische Leistung P_{opt} (schwarzer Strahler)

$$P_{opt} = \sigma_B \cdot A \cdot T^4 \quad ; \quad \sigma_B = \text{Stefan-Boltzmann-Konstante}$$

$$\sigma_B = \frac{4\pi^5 \cdot k_B^4}{15h^3 \cdot c^3} = 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad ; \quad k_B = \text{Boltzmannkonstante}$$

$$P_{opt} = N_{phot} \cdot E_{phot}$$

$$k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$$

h = Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} J_s = 4,136 \cdot 10^{-15} eVs$$

$$c = \text{Lichtgeschw.} = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Raumwinkel Ω

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad \rightarrow \quad \Omega_S = \Omega_E \rightarrow \frac{A_S}{r_S^2} = \frac{A_E}{r_E^2}$$

Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^3 \mu m \cdot K$$

Air Mass m :
$$m = \frac{l}{h} = \frac{1}{\sin(\gamma_s)} = \frac{1}{\cos(\gamma')}$$

STC: AM1,5G, $25^\circ C = 300 K$

AM1,5G

G = global, Standardspektrum für terrestrische Solarzellen

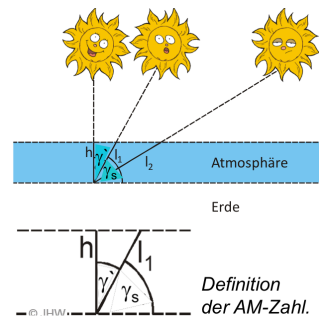
gesamte auf horizontale Fläche ankommende Strahlung durch Atmosphäre hindurch

KEIN senkrechter Einfall, $\gamma = 41,8^\circ$, $m = 1,5$

$P_{opt} = 1,000 kW/m^2$.

Beachte: Wert nach oben korrigiert (eigentlich nur $0,835 kW/m^2$)!!

[$\gamma = 41,8^\circ$, $m = 1,5$, für AM1,5 ergibt geometrische Reduktion von $1367 W/m^2$ auf $911 W/m^2$, weiteres Absinken auf $835 W/m^2$ durch Absorption und Streuung]



Planck'sches Strahlungsgesetz

$$L_\lambda = \frac{d^3 \Phi}{dA d\Omega d\lambda} = \frac{2 \cdot h c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{h \cdot c_0 / (\lambda kT)} - 1} \left[\frac{W}{m^2 sr \mu m} \right]$$

mit Φ = Leistung

A = Oberfläche

Ω = Raumwinkel

λ = Wellenlänge

h = Planck'scher Wirkungsquantum

c_0 = Lichtgeschw.

L_λ = Spektrale Leistungsdichte

Photonenenergie E und Wellenlänge λ

Photonenenergie

$$E = h \cdot \nu \quad \text{mit } h = \text{Planck-Konstante}$$

ν = Lichtfrequenz

Lichtgeschwindigkeit

$$c = \nu \cdot \lambda$$

$$\rightarrow E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda} \text{ eV } \mu m$$

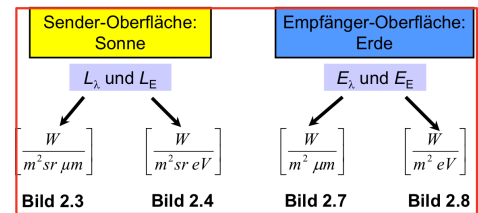
$$\rightarrow \frac{d\lambda}{dE} = - \frac{hc}{E^2} \rightarrow \left| \frac{1}{d\lambda} \right| = \frac{E^2}{hc} \left| \frac{1}{dE} \right|$$

Spektrale Leistungsdichte L_E

Unterschiedliche Leistungsdichten:

L_E = Leistungsdichte per Energieintervall

L_λ = Leistungsdichte per Wellenlängenintervall



$$L_E = L_\lambda \cdot \frac{\lambda^2}{h \cdot c} \quad \text{mit } E = h \cdot \nu \rightarrow L_E = \frac{2}{h^3 \cdot c^2} \cdot \frac{E^3}{e^{E/(kT)} - 1} \left[\frac{W}{m^2 sr eV} \right]$$

Sonneneinstrahlung

↳ De wird auf $1 m^2$ ca $1 kWh$ pro Jahr gestrahlt

→ 1000 Sonneneinstrahlung pro Jahr mit $1 \frac{kWh}{m^2}$

$$t_s = \frac{H_{opt}}{P_{opt}} \quad ; \quad H_{opt} = \text{jährliche Strahlungsenergie} \left[\frac{kWh}{m^2 a} \right]$$

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{t_s}$$

$$\eta_{Modul} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{P_{el}}{P_{opt}} = \frac{P_{el}/A_{PV}}{P_{opt,STC}} \quad ; \quad P_{opt,STC} \text{ flächenbezogen} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Kenngrößen von Solarzellen

Leitungsträgerdichte: $n_i = p_i = N_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

E_g = Bandlücke, T = Temperatur in K, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws K}^{-1}$ (Boltzmann-Konstante)
 $N_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (effektive Zustandsdichte von Silizium):
gibt an wie viele freie Elektronen bei hohen Temperaturen erzeugt werden können

Es Außerdem gilt das Massenwirkungsgesetz im thermodynamischen Gleichgewicht:

$$n \cdot p = n_i^2 \text{ (Erhöhung Majorität erniedrigt Minorität)}$$

$$n_{i, \text{Si}} \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ (} T = 300 \text{ K)}$$

Stromdichte J

$$J = J_0 \left(e^{\frac{qV}{n_{id} \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - J_{\text{photo}} ; J_0 = \text{Diodenstromdichte}$$

J_{photo} = Photostromdichte

q = Elementarladung

V = angelegte Spannung

n_{id} = Idealitätsfaktor

k = Boltzmannkonstante = $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

Leerlaufspannung V_{oc} (Open-circuit)

$$V_{oc} = \frac{n_{id} \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{J_{\text{photo}}}{J_0} + 1 \right) \text{ oder } V_{oc} = \frac{n_{id} \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right)$$

typische Werte für AM1,5G: $650 \text{ mV} \leq V_{oc} \leq 740 \text{ mV}$

Kurzschlussstromdichte J_{sc} (Short-circuit)

Im Kurzschlussfall gilt $V=0 \rightarrow J = J_0 \cdot \underbrace{\left(e^{\frac{qV}{n_{id} \cdot k \cdot T}} - 1 \right)}_{=0} - J_{\text{photo}}$

$$J|_{V=0} = -J_{sc} = -J_{\text{photo}} ; J_{sc} = EQE \cdot q \cdot \phi_{\text{abs}}$$

Füllfaktor FF

$$FF = \frac{J_{\text{max}} \cdot V_{\text{max}}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} < 1 \quad \text{typische Werte: } 0,75 \leq FF \leq 0,85$$

Wirkungsgrad $\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{el. Leistung der Solarzelle}}{\text{eingestrahlte optische Leistung}}$

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{opt}} = \frac{J_{\text{max}} \cdot V_{\text{max}}}{P_{opt}} = \frac{J_{\text{mpp}} \cdot V_{\text{mpp}}}{P_{opt, \text{SC}}} = FF \cdot \frac{J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{opt}} \quad \text{typische Werte: } 17\% \leq \eta \leq 22\%$$

$$P_{el} = J_{\text{max}} \cdot V_{\text{max}} = FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} ; P_{opt} = A_{\text{phot}} \cdot E_{\text{phot}}$$

$A_{\text{ges}} =$
 $\hookrightarrow$ A-Zelle $\cdot$ N-Zelle

Wenn Modulanzahl und Zellengröße gegeben: $P_{el} = FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} ; J_{sc} = J_{sc} \cdot A_{\text{ges}}$

Strromdichte im Dunkeln

$$J = J_0 \left(e^{\frac{qV}{n_{id} \cdot k \cdot T}} - 1 \right)$$

Modultechnik:

Reihenschaltung:

$$V_{ges} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

$$I_{ges} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots$$

Parallelschaltung

$$V_{ges} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots$$

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Anzahl Zellen:

$$\text{Reihe: } n_{Zelle} = \frac{V_0}{V_{mpp}}$$

$$\text{Parallel: } n_{Zelle} = \frac{I_0}{I_{mpp}}$$

für Modul:

Reihe:

$$V_{oc,m} = n_{Zelle} \cdot V_{oc}$$

$$V_{mpp,m} = n_{Zelle} \cdot V_{mpp}$$

$$V_{durch,m} = n_{Zelle} \cdot V_{durch}$$

$$I_{sc,m} = I_{sc}$$

$$I_{mpp,m} = I_{mpp}$$

$$P_{mpp,m} = V_{mpp,m} \cdot I_{mpp,m}$$

Parallel

$$V_{oc,m} = V_{oc}$$

$$V_{mpp,m} = V_{mpp}$$

$$V_{durch,m} = V_{durch}$$

$$I_{sc,m} = n_{Zelle} \cdot I_{sc}$$

$$I_{mpp,m} = n_{Zelle} \cdot I_{mpp}$$

$$P_{mpp,m} = V_{mpp,m} \cdot I_{mpp,m}$$

Wenn Zellen halbiert werden:

$$I_{Zelle,neu} = \frac{1}{2} I_{Zelle}$$

Konzentratorzelle

$$\gamma = \frac{P_{el}}{P_{opt}} ; P_{el} = \gamma \cdot P_{opt} \cdot A \cdot c \quad c = \text{Konzentrationsfaktor}$$

$$V_{oc,c} = \underbrace{n_{id} \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)}_{V_{oc}} + \underbrace{n_{id} \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln(c)}_{\text{Erhöhung durch Konzentration}}$$

wenn $I_{sc} \gg I_0$
kann +1 vernachlässigt werden

$$= V_{oc} + n_{id} \cdot \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln(c)$$

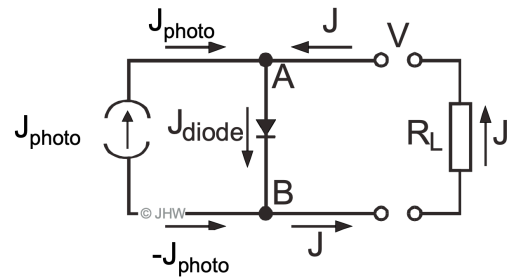
Ersatzschaltbilder

elektrisch optimiert:

ohne Beleuchtung: $J = J_{\text{diode}} = J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$

mit Beleuchtung: $-J_{\text{photo}} + J_{\text{diode}} - J = 0$

$$J = J_{\text{diode}} - J_{\text{photo}} = J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - J_{\text{photo}}$$



reale Solarzelle:

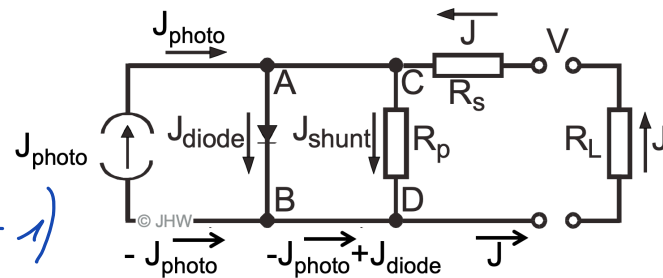
ohne Beleuchtung: $J = J_0 \cdot \underbrace{\left(e^{\frac{q}{n_{id} \cdot k \cdot T} \cdot (V - J R_s)} - 1 \right)}_{J_{\text{diode}}} + \underbrace{\frac{V - J R_s}{R_p}}_{J_{\text{shunt}}}$

mit Beleuchtung: $J = J_0 \cdot \left(e^{\frac{q}{n_{id} \cdot k \cdot T} \cdot (V - J R_s)} - 1 \right) + \frac{V - J R_s}{R_p} - J_{\text{photo}}$

R_s = Serienwiderstand
 R_p = Parallelwiderstand
 = Shuntwiderstand

Leerlaufspannung: $V_{oc} = n_{id} \cdot \ln \left(\frac{J_{\text{photo}} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{J_0} + 1 \right)$

$$V_{oc} = n_{id} \cdot \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right)$$



Kurzschlussstromdichte: $J|_{V=0} = J_{sc} \approx \frac{J_{\text{photo}}}{1 + \frac{R_s}{R_p}}$; gilt für $J_{sc} \cdot R_s < \frac{n_{id} \cdot k \cdot T}{q}$

Füllfaktor: FF-Verlust durch Serienwiderstand R_s :

$$FF_{\text{series}} = FF_0 \cdot \left(1 - \frac{R_s}{R_{\text{char}}} \right) ; R_{\text{char}} = \frac{V_{oc}}{J_{sc}}$$

FF-Verlust durch Parallelwiderstand R_p :

$$FF_{\text{shunt}} = FF_{\text{series}} \left(1 - \frac{V_{oc} + 0,7 \cdot \frac{FF_{\text{series}}}{R_p}}{V_{oc}} \right) ; V_{oc} = \left(\frac{n_{id} \cdot k \cdot T}{q} \right) \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right)$$

Optimierte und reale Solarzelle

Parameter Optimierte Solarzelle $n_{id} = 1$, $R_s = 0$, $R_p = \infty$

reale Solarzelle $n_{id} > 1$, $R_s \neq 0$, $R_p \neq \infty$

Kennlinie $J = J_0 \left(e^{\frac{q}{n_{id} k T} V} - 1 \right) - J_{photo}$

Wenn nach
Sperrstromdichte
 J_0 gefragt ist:
 $J = 0$ setzen

$J = J_0 \left(e^{\frac{q}{n_{id} k T} (V - J R_s)} - 1 \right) + \frac{V - J R_s}{R_p} - J_{photo}$

Kurzschlussstromdichte
[A/cm²] $J_{sc} = J_{photo}$

$J_{sc} \approx \frac{J_{photo}}{1 + R_s / R_p}$

Leerlaufspannung
[V] $V_{oc} = n_{id} \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right)$

$V_{oc} = n_{id} \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right)$

Wirkungsgrad
[%] $\eta = \frac{P_{el}}{P_{opt}} = FF \frac{J_{sc} V_{oc}}{P_{opt}}$

$\eta = \frac{P_{el}}{P_{opt}} = FF \frac{J_{sc} V_{oc}}{P_{opt}}$

Füllfaktor
[%] $FF := \frac{J_{mpp} V_{mpp}}{J_{sc} V_{oc}}$

Rechnerische Näherung für Füllfaktor:

$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1}$, mit $v_{oc} = \frac{V_{oc}}{n_{id} k T / q}$,

für $v_{oc} > 10$ Näherung auf 4 sign. Stellen genau

Nur für den Fall der idealen Solarzelle: $FF = FF_0$

$FF := \frac{J_{mpp} V_{mpp}}{J_{sc} V_{oc}}$

$FF_{series} = FF_0 \left(1 - \frac{R_s}{V_{oc} / J_{sc}} \right)$,

$FF_{shunt} = FF_{series} \left(1 - \frac{v_{oc} + 0,7}{v_{oc}} \frac{FF_{series}}{R_p / (V_{oc} / J_{sc})} \right)$,

für $v_{oc} > 10$ Näherung auf 3 sign. Stellen genau

reale Zelle:
wenn $R_p = \infty$:
 $FF_{shunt} = FF_{ser} \rightarrow FF = FF_{ser}$
wenn $R_s \neq 0$ & $R_p \neq \infty$:
 $FF = FF_{shunt}$

$FF_{shunt} = FF_{ser} \cdot \left(1 - \frac{v_{oc} + 0,7}{v_{oc}} \cdot FF_{ser} \cdot \frac{V_{oc}}{R_p \cdot J_{sc}} \right)$

$\rightarrow FF_{shunt} = FF_{ser} - (FF_{ser})^2 \cdot \frac{v_{oc} + 0,7}{v_{oc}} \cdot \frac{V_{oc}}{R_p \cdot J_{sc}}$

alles einsetzen: $(FF_{ser})^2 - b \cdot FF_{ser} + c = 0$

$\rightarrow$ Mitternachtsformel $\rightarrow FF \leq 1 !!$

R_p aus Steigung der Kennlinie:

$R_p = \frac{V_1 - V_2}{J_1 - J_2}$

$\eta_0 = FF_0 \cdot \frac{J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{opt}}$

$\eta_{ser} = FF_{ser} \cdot \frac{J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{opt}}$

$\eta_{shunt} = FF_{shunt} \cdot \frac{J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{opt}}$

Antireflexschicht:

$R = \left(\frac{n_0 \cdot n_{Si} - n_{SiN_x}^2}{n_0 \cdot n_{Si} + n_{SiN_x}^2} \right)^2$

$R =$ Reflexion

d_{SiN} = Dicke der Siliziumnitrid (SiN) Schicht

n_{Si} = Brechungsindex Silizium

n_0 = Brechungsindex Luft

n_{SiN} = Brechungsindex SiN-Schicht

$\rightarrow n_{SiN_x} |_{R=0} = \sqrt{n_0 \cdot n_{Si}}$

$n_{SiN_x} |_{n_0=1} \approx 2$

$d_{SiN_x} = \frac{\lambda}{(4 \cdot n_{SiN_x})}$

Absorption und Quantenausbeute

Transmission

$$t = \frac{\Phi_t}{\Phi_o} \quad ; \quad \Phi_t = \text{Transmissionsintensität}, \quad \Phi_o = \text{Einfallintensität}$$

Beersches Absorptionsgesetz

$$\Phi(x) = \Phi_o \cdot e^{-\alpha \cdot x} = \Phi_o \cdot e^{-\frac{x}{L_\alpha}}$$

α = Absorptionskonstante $[\frac{1}{cm}]$

$L_\alpha = \alpha^{-1}$ = Absorptionslänge $[cm]$

x = dicke des absorbierenden Mediums

$$\text{oder } N_{\text{phot,trans}} = N_{\text{phot,o}} \cdot e^{-\alpha x}$$

An der Stelle $x = L_\alpha$ gilt:

$$\Phi(L_\alpha) = \Phi_o \cdot e^{-1} = 37\% \cdot \Phi_o$$

Externe Quantenausbeute

$N_{e,h}$ = im Kurzschlussfall eingesamelte photogenerierte Ladungsträger (Elektronen- oder Loch-paare) $[\frac{1}{cm^2 \cdot s}]$

$$EQE(\lambda) = \frac{N_{e,h}}{N_{\text{phot}}} = \frac{J_{sc}(\lambda)/q}{P_{\text{opt}}/h\nu}$$

N_{phot} = gesamte einfallende Photonen

$$N_{\text{phot}} = \frac{P_{\text{opt}}}{E_{\text{phot}}} \quad ; \quad E_{\text{phot}} = \frac{1,24}{\lambda[\mu m]} \text{ eV} ; \quad 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Ws} \quad ; \quad E_{\text{phot}} = E_g \text{ (Bandlücke)}$$

Einheit beachten λ meistens in nm angegeben

$$J_{sc} = \frac{q \cdot EQE \cdot P_{\text{opt}}}{E_{\text{phot}}} = EQE \cdot q \cdot \Phi_{abs} = q \cdot N_{e,h}$$

Wenn Φ_{abs} nicht gegeben;

$$J_{sc} = \frac{EQE \cdot \Phi \cdot q}{E_{\text{phot}}}$$

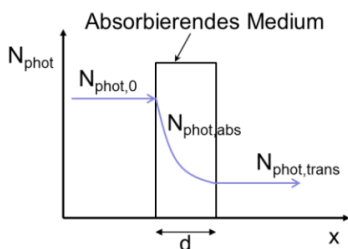
$$J_{sc} = EQE \cdot q \cdot \Phi_{abs} \cdot A$$

Interne Quantenausbeute

$$IQE = \frac{EQE}{1 - Ref} \quad ; \quad Ref = \text{Reflexion}$$

bezieht sich nur auf nicht reflektierte in Zelle ein- dringende Photonen d.h. wenn in Aufgabe: „gehen sie davon aus, dass alle Photonen ein Elektron-Loch-Paar freisetzen“: $IQE = 1$

Absorbierte Photonenflussdichte $N_{\text{phot,abs}}$ oder Φ_{abs}



$$N_{\text{photo,abs}} = N_{\text{phot,o}} - N_{\text{phot,trans}} = N_{\text{phot,o}} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot d})$$

$$N_{\text{phot,trans}} = N_{\text{phot}} \cdot e^{-\alpha \cdot d}$$

$$\Rightarrow N_{\text{phot,abs}} = N_{\text{phot,o}} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot d})$$

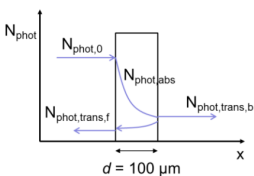
Absorbierte Leistungsdichte

$$P_{abs} = \Phi_{abs} \cdot E_{\text{phot}}$$

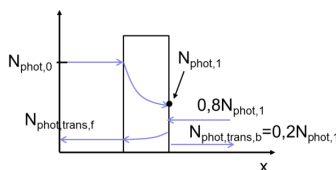
$$E_{\text{phot}} = \frac{1,24}{\lambda[\mu m]} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

$$\eta = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc}}{\Phi_o \cdot E_{\text{phot}}} \quad \left| \quad \frac{\Delta \eta}{2} = \frac{\eta_{\text{höher}} - \eta_{\text{niedrig}}}{2} \right.$$

transmittierte Photonenflussdichte Vorder- & Rückseite



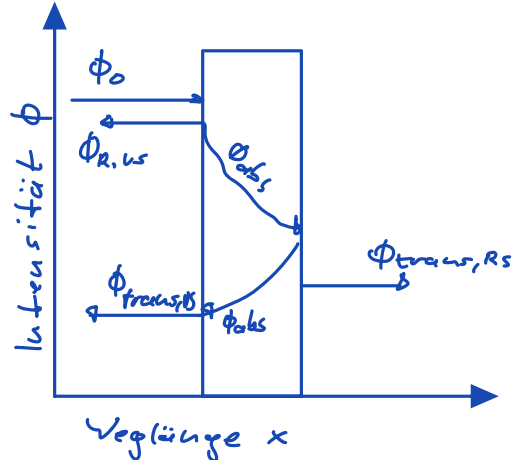
$$N_{\text{phot,trans,b}} = N_{\text{phot,o}} \cdot e^{-\alpha \cdot d} \cdot (1 - R_b)$$



$$N_{\text{phot,trans,f}}$$

$$= N_{\text{phot,1}} \cdot R_b \cdot e^{-\alpha \cdot d}$$

$$= N_{\text{phot,o}} \cdot e^{-\alpha \cdot d} \cdot R_b \cdot e^{-\alpha \cdot d}$$



$$\phi_{r,us} = \phi_0 \cdot R_{vs}$$

$$\phi_{trans,rs} = \phi_0 \cdot (1 - R_{vs}) \cdot e^{-\alpha d} \cdot (1 - R_{rs})$$

$$\phi_{trans,us} = \phi_0 \cdot (1 - R_{vs}) \cdot e^{-\alpha d} \cdot R_{rs} \cdot e^{-\alpha} \cdot (1 - R_{vs})$$

$$\phi_{verlust} = \phi_{r,us} + \phi_{trans,rs} + \phi_{trans,rs}$$

$$\phi_{abs} = \phi_0 - \phi_{verlust}$$

PV-Materialien und Technologien

Diffusionslänge $L = \sqrt{D \tau} = \sqrt{\mu \frac{k \cdot T}{q} \cdot \tau}$; μ = Beweglichkeit der Elektronen

es gilt $L_n = 2 L_p$

$$\mu_{n,si} = 1100 \frac{cm^2}{Vs}$$

$$\mu_{p,si} = 300 \frac{cm^2}{Vs}$$

$$\tau = \text{Lebensdauer}$$

Umformung Diodegleichung: (Wenn Modül nur noch mit $\frac{1}{2} P_{opt}$ bestrahlt wird)

hier 1 statt 2 verwendet:

$$I_{app} = I_0 \left(e^{\frac{V_{app}}{n_{id} \cdot \frac{kT}{q}}} - 1 \right) - I_{sc,neu}$$

Wird vernachlässigt

$$I_{app,neu} = I_0 e^{\frac{V}{n_{id} \cdot \frac{kT}{q}}} - I_{sc,neu}$$

$$V = \frac{n_{id} \cdot kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{app,neu} + I_{sc,neu}}{I_0} \right)$$

I_0 bleibt bei V_{oc} gleich

$$0 = I_0 e^{\frac{V_{oc}}{n_{id} \cdot \frac{kT}{q}}} - I_{sc} \rightarrow I_0 = I_{sc} \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{n_{id} \cdot \frac{kT}{q}}}$$

$$V_{app,neu} = \frac{n_{id} \cdot kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{app,neu} + I_{sc,neu}}{I_{sc}} \right) + V_{oc}$$

relativer Fehler

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta FF}{FF} + \frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} + \frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} + \frac{\Delta A}{A}$$