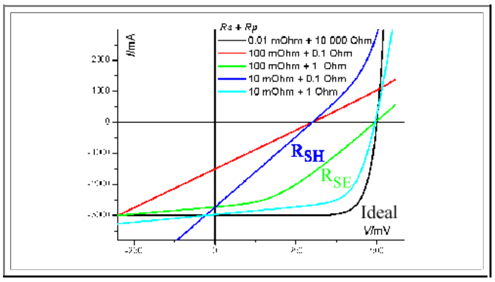
10.4.2 Was man wissen muss

- Ganz tief verinnerlicht ist der Zusammenhang von Diodenkennlinie und Solarzellenkennlinie.
    - Wir verstehen, was mit den durch Licht zusätzlich generierten Ladungsträgern passiert und dass nur diejenigen, die den **pn**-Übergang erreichen, zum Strom beitragen. Die Bedeutung der *Diffusionslänge* in diesem Zusammenhang ist uns klar.
    - Die wichtigen Solarzellenparameter *Leerlaufspannung* ("open circuit") U_{OC}, *Kurzschlussstrom* ("short circuit") I_{SC}, *Füllfaktor* **FF**, *optimaler Arbeitspunkt*, *Wirkungsgrad* η können wir erläutern und, soweit möglich, in eine Kennline eintragen
- Wir verstehen, warum bei gegebenem Sonnenspektrum der Wirkungsgrad ein Optimum für ein bestimmtes Bandgap erreicht, und wir wissen, dass mehr als $\eta \approx$ **30 %** für einen einzelnen **pn**-Übergang nicht möglich ist.
- Wir kennen die wichtigsten Zahlen zur Solarenergie:

Typ. Sonnenleistung ("Europa"):	**1 kW/m^2**
"Peak"-Solarzellenleistung:	**W_P = 1 kW/m^2 · 10 % = 100 W/m^2**
Mittelwert Solarleistung:	**W_m = W_P · 10 % = 10 W/m^2**
Energieernte pro Jahr:	**E_a = W_m · 365 · 24 = 100 kWh/(a · m^2)**
Gesamtenergiebedarf je Deutscher	**6.000 kWh/a**
Platzbedarf für Solarzellen je Deutscher	**50 m^2**

- Wir wissen, dass für reale Solarzellen die technische Herausforderung nur in *einer* Eigenschaft liegt: Sie produzieren (demnächst, so um **2015**) Strom zu "grid parity"-Kosten.
    - Das bedeutet **2** billige, aber gute Solarzellen / 3 Sekunden in der Fertigung – und das ist sehr schwer!
- Wir können ein Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle geben und die Bedeutung von Shunt- und Serienwiderstand erläutern.
    - Dabei ist uns klar, warum man zur Diskussion der beiden Widerstände zweckmäßigerweise die Fälle "Leerlauf" und "Kurzschluss" betrachtet.



- Wir können die wichtigsten Eigenschaften von Transistoren definieren und folgende Bilder zeichnen:
    - Schematischer Aufbau Bipolartransistor.
    - Banddiagramm Bipolartransistor.
    - Stromflüsse im Bipolartransistor.
    - Querschnitt **MOS**-Transistor
    - Wir können die Stromverstärkung im Bipolartransistor erklären und in einer einfachen Näherungsformel wiedergeben, wobei wir die Näherung über die Geometrie begründen können.
    - Wir können das Prinzip des **MOS**-Transistors beschreiben, wobei das *Massenwirkungsgesetz* zur Geltung kommt.
    - Wir können über die Bedeutung des "**O**" im **MOS**-Transistors einiges sagen und auch Größenordnungen zur Geometrie und kritischen Größen wie Feldstärke angeben.

Zahlen und Formeln

Unbedingt erforderlich:

Anmerkung: In der Regel reichen "Zehner"-Zahlen; genauere Werte sind in Klammern gegeben.

Zahlen neu			
Größe		**Zehnerwert**	**Besserer Wert**
Technischer Wirkungsgrad Solarzellen:	≈	**10 %**	**15 % ... 20 %**
Gesamtenergiebedarf **und Solarzellen-Platzbedarf "Deutscher Bürger"**	≈	**6.000 kWh/a** **50 m^2**	

Zahlen alt			
Größe		**Zehnerwert**	**Besserer Wert**
Energielücke E_G von Si	=	**1 eV**	**1,1 eV**
Lebensdauer **Diffusionslänge**	≈	**Direkte HL (GaAs): ns und nm** **Indirekte HL (Si): ms und mm**	
Typische **Dotierkonzentrationen in Si:**	≈	**As od. P für n-Typ; B für p-Typ** **(10^{15} ... 10^{19}) cm^{-3}**	
Typische spezif. Widerstände **ρ**		**ρ Metall: ≈ 1 µΩcm** **ρ Halbleiter (dotiert): ≈ 1 Ωcm** **ρ Isolator: >> 1 Ωcm**	
Typische Energielücken E_G		**Metall: ≈ 0 eV** **Halbleiter: ≈ (0,5 ... 2,5) eV** **Isolator: > 2,5 eV**	
Permeabilität μ_r		**Diamagnete: <≈ 1** **Paramagnete: >≈ 1** **Ferromagnete: >> 1; bis >1000**	
Frequenzabhängigkeit **Magnetismus**		**relevant nur <≈ GHz;** **darüber μ_r ≈ 1**	
Durchschlagsfestigkeiten E_{max}	≈	**(0,1 ... 10) MV/cm**	**≈ 15 MeV/cm (Limit)**
Maximale Stromdichten j_{max}	≈	**(10^3 ... 10^5) A/cm^2**	

Einige Dielektrizitäts-konstanten ϵ_r		**$\epsilon_r(H_2O)$: ≈ 80** **$\epsilon_r(SiO_2)$: ≈ 3,7** **ϵ_r(Halbleiter): ≈ 10 ... 20**	
"Interessante" Frequenzen		**≈ 10 GHZ: Relaxation H_2O** **≈ 10^{13} Hz: Resonanz Ionenpolarisation** **≈ 10^{15} Hz = "Optik": Resonanz Elektronenpolarisation**	
Daten Licht: **Wellenlänge** **Frequenz** **Energie**	≈ ≈ ≈	**1 µm** **10^{14} Hz** **1 eV**	**500 nm** **$5 \cdot 10^{14}$ Hz** **2,5 eV**
Avogadrokonstante		**10^{24} mol^{-1}**	**$6 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}**
Bildungs- und Wanderungs-energie Leerstelle	≈	**1 eV**	**ca. (0,5 ... 5) eV**
$(k_B T)_{RT}$	≈	**1/40 eV = 0,025 eV**	
Typische Gitterkonstante *a*	≈	**1 Å = 0,1 nm**	**2 Å ... 5 Å**
Größe eines Atoms	≈	**1 Å = 0,1 nm**	**1 Å ... 3 Å**
Photonenenergie Licht	≈	**1 eV**	**(1,6 ... 3,3) eV**
Vibrationsfrequenz Atome im Kristall	≈	**10^{13} Hz**	

Formeln neu

Größe	**Formel**
Stromverstärkung Bipolartransistor	$\beta = \dfrac{I_K}{I_B} = \dfrac{j_F(BK)}{j_D(BE)} = \dfrac{j_D(EB)}{j_D(BE)} = \dfrac{N_{Dot}(E)}{N_{Dot}(B)}$

Formeln alt

Größe	**Formel**
Konzentration Majoritäten (Si, RT)	$n_{Maj} = N_{Dot}$

Konzentration Minoritäten (Si, RT)	$n_{\mathrm{Min}}(T) = \dfrac{n_i^2(T)}{N_{\mathrm{Dot}}}$
Generationsrate, Rekombinationsrate, Gleichgewichtsbedingung	$\mathrm{R} = \mathrm{G} = \dfrac{n_{\mathrm{Min}}}{\tau} = \dfrac{n_i^2}{N_{\mathrm{Dot}} \cdot \tau}$
Intrinsische Ladungsträgerdichte	$n_i = N_{\mathrm{eff}} \cdot \exp\left(-\dfrac{E_G}{2k_BT}\right)$
Sperrstrom beim pn-Übergang = Generationsstrom	$j_{\mathrm{Gen}} = \pm e \cdot G \cdot L = \dfrac{\pm e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_{\mathrm{Dot}} \cdot \tau} = \mathrm{const.}$
Diodengleichung	$j(U_{\mathrm{ex}}) = \left(\dfrac{e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_A \cdot \tau} + \dfrac{e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_D \cdot \tau}\right) \cdot \left(\exp\left(\dfrac{eU_{\mathrm{ex}}}{k_BT}\right) - 1\right)$
Ohmsches Gesetz	$j = \sigma \cdot E = \dfrac{E}{\rho}$
Spezif. Leitfähigkeit	$\sigma = q \cdot n \cdot \mu$
"Masterformel" für Teilchendichten; hier Dichte e⁻ im Leitungsband	$n_e^L(T) = \int_{E_L}^{\infty} D(E) \cdot f(E; E_F, T)\, dE$ $= N_{\mathrm{eff}} \cdot \exp[-(E_L - E_F)/(k_BT)]$
Dichte h^+ im Valenzband	$n_h^V(T) = N_{\mathrm{eff}} \cdot \exp[-(E_F - E_V)/(k_BT)]$
Massenwirkungsgesetz	$n_e \cdot n_h = n_i^2$

Magnetische Größen	$B = \mu_0 \cdot H + J = \mu_0 \cdot (H + M)$ $M = J/\mu_0 = (\mu_r - 1) \cdot H = \chi_{mag} \cdot H$ $\mu_r = \chi_{mag} + 1$
Dielektrische Größen	$\underline{\mu} = q \cdot \underline{\xi}$ $\underline{P} = \dfrac{\Sigma\, \underline{\mu}}{V} = \langle \underline{\mu} \rangle \cdot N_V$ $\epsilon_r = \chi + 1$
Schwingungsgleichung und Resonanzfrequenz	$m \dfrac{d^2 x}{dt^2} + m k_R \cdot \dfrac{dx}{dt} + k_F x = q\, E_0 \cos(\omega t)$ $\omega_0' = \left(\dfrac{k_F}{m}\right)^{1/2}$
Komplexer Brechungsindex *n*	$(n + i\, \kappa)^2 = \epsilon' - i \cdot \epsilon''$

Entropie S_i	$S_i = k_B \cdot \ln p_i$
Freie Energie *G*	$G = U - TS$
Stirling-Formel	$\ln x! \approx x \cdot \ln x$
Dichte Teilchen bei *E*	$n(E) = D(E) \cdot w(E) \cdot dE$
Boltzmann-Näherung an Fermiverteilung f(*E*) für $\Delta E = E - E_F > 2k_B T$	$f(E) \approx \exp\left(-\dfrac{\Delta E}{k_B T}\right)$
Boltzmannfaktor (Wahrscheinlichkeit für *E*)	$w(E) = \exp[-E/(k_B T)]$

Boltzmannverteilung	$\dfrac{n(E)}{n(E_0)} = \exp\left(-\dfrac{E - E_0}{k_B T}\right)$
Leerstellenkonzentration **(E^F : Bildungsenergie)**	$c_V = \exp[-E^F/(k_B\, T)]$
Sprungrate *r* atomarer Defekte **(E^M: Wanderungsenergie)**	$r = \nu_0 \cdot \exp[-E^M /(k_B\, T)]$
Diffusionsstromdichte $\underline{j}_{Diff}$ (Vektor!)	$\underline{j}_{Diff} = -D\, \nabla c$
Diffusionslänge *L*	$L = (D\, \tau)^{½}$
Coulombpotential	$U_{Cou} = \dfrac{e^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$
Beziehung Kraft $\underline{F}(\underline{r})$ — Potential $U(\underline{r})$	$\underline{F}(\underline{r}) = -\nabla U(\underline{r})$
Mech. Spannung σ, Dehnung ϵ, E-Modul *E*	$\sigma = \dfrac{F}{A}$ $\epsilon = \dfrac{l(\sigma) - l_0}{l_0}$ $E = \dfrac{d\sigma}{d\epsilon}$
Innere Energie pro Freiheitsgrad **(Gleichverteilungssatz; einzelnes Teilchen)**	$U_{Freiheitsgrad} = ½ k_B T$
Mittlere thermische Energie **eines klassischen Teilchens** **(innere Energie; Def. der Temperatur)**	$U_{Teilchen} = ½ f k_B\, T$ **(*f*: Anzahl der Freiheitsgrade)**
Thermische Energie **(Größenordnung von $U_{Teilchen}$)**	$E_{therm} = k_B T$ $(U_{Teilchen} \approx k_B T)$