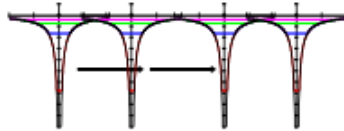


ET I Übung 13

Aufbau:

- Fragen zu letzter Woche
- Nachbesprechen alter Serie
- Theorie Repetition
- Kaffichränzli

Mindmap



Grundlagen

Atomarer Aufbau / Leitungsbänder

Ladungsträgerverteilung

Dotierung

Ladungsträgeränderungen

- + Driftstrom
- + Diffusionsstrom
- + Generation und Rekombination

Alles zusammen

Kontinuitätsgleichung
Poissonsgleichung

MATERIALIEN & BANDLÜCKEN (Weniger Wichtig für Prüf. höchstens Theoriefrage)

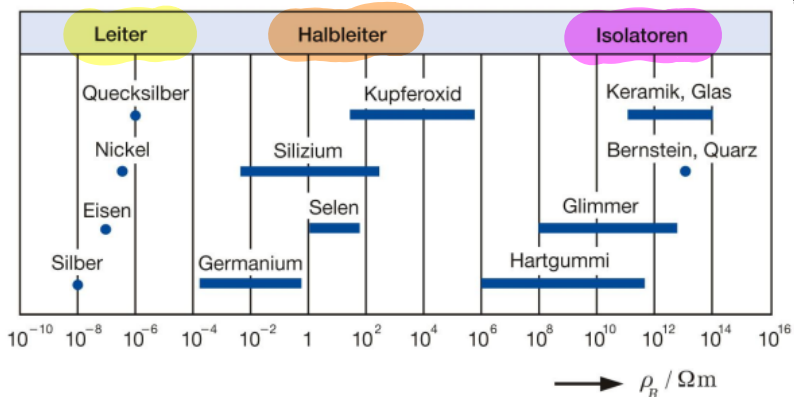


Abbildung 4.5: Spezifischer Widerstand fester Körper nach [16]

Spezifischer Widerstand

Widerstand erstreckt sich über mehrere Dekaden für HL

⇒ Abhängigkeit vom Reinheitsgrad (Donatoren)

⇒ Abhängigkeit von Temperatur (HL sind NTCs)

In PSE:

Das Periodensystem der Elemente

Perioden	Hauptgruppen	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1		H	He						
2		Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
3		Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4		K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
5		Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru
6		Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os
7		Fr	Ra	Ac	Ku	Ha			

Wasserstoff Alkalimetalle Erdalkalimetalle Metalle
Halbleiter Nichtmetalle Edelgase radioaktiv

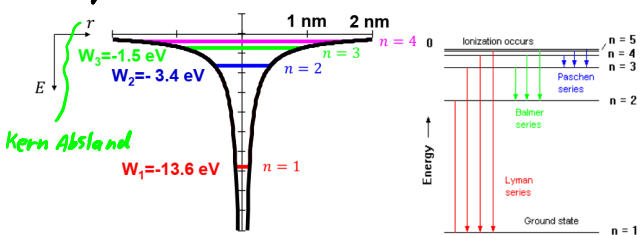
Lanthanoide Actinoide

Element-Halbleiter: Si, Ge ...
Verbindungs-Halbleiter: InSb, GaAs, GaN, SiC, HgCdTe, InGaAs ...

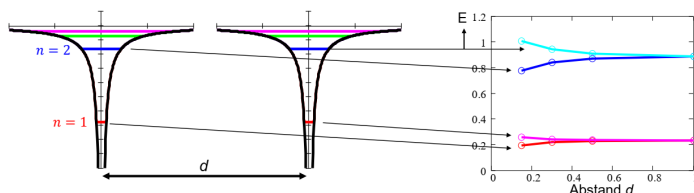
Aus Chemie (und Quantenmechanik) wissen wir:

- Elektronen haben verschiedene Energieniveaus pro Schale!

Bsp H-Atom!



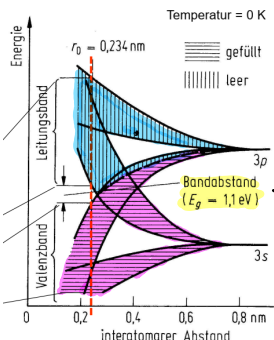
Bei mehreren Atomen verschieben sich diese Niveaus:
(Z Elektronen dürfen nie den gleichen Zustand haben!)



→ Dies führt zu Energiebänder!

Erstes unbesetztes Band

Leitungsband
Bandlücke
Valenzband



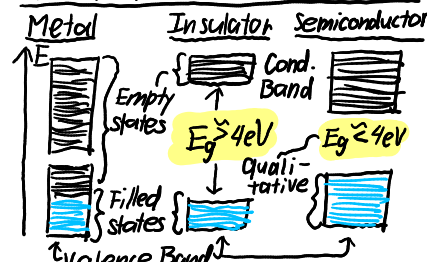
Höchstes Band voll besetzt mit e⁻

⇒ Die e⁻ müssen also aus dem Valenzband heraus ins Leitungsband.

Dazu müssen sie die Bandlücke überwinden.
hierfür Brauchen sie E_G

$$E_G = E_L - E_V$$

Metal vs Insulator vs Semiconductor



Electricity bcs. Metals have partially filled bands (e⁻ need empty states)

Die Größe der Lücken unterscheidet Metalle, Halbleiter und Isolatoren

Für HL gilt: E_G [0.7 eV, 4 eV]

Si	E _G = 1.12 eV
Ge	E _G = 0.67 eV
GaAs	E _G = 1.42 eV

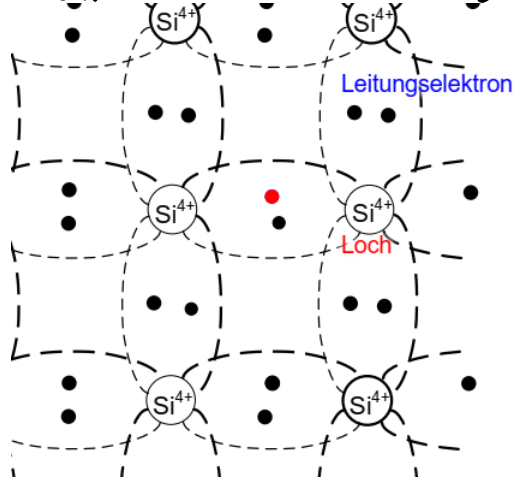
STROMLEITUNG-AUSFLUG IN DIE QUANTUMMECHANIK (Nächstes Semester bei D.J. Norris)

Sehr Oberflächlich

(Weniger Wichtig für Prüf. höchstens Theoriefrage)

Wenn ein Elektron ins Leitungsband

Wechselt hinterlässt es ein Positiv geladenes Loch.



Doch wieviele Elektronen können überhaupt ins Leitungsband wechseln?

aus QM

Elektronen im Leitungsband

Löcher im Valenzband

Anzahl freie elektronen

$$n = \int_{E_L}^{\infty} f_{FD}(E) \rho_n(E) dE$$

Anzahl Löcher

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} (1 - f_{FD}(E)) \rho_p(E) dE$$



siehe unten rechts für einfachere Formel

f_{FD} "Fermi Dirac Verteilung" für die Wahrscheinlichkeit, dass Zustand mit Energie E besetzt ist.

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}}$$

$$k_B = 1.380 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

$$k_B = 8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$$

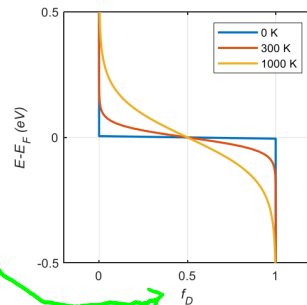
(Boltzmann konst)

E_F : Fermienergie

Für E weit von E_F :

=> Näherung: Boltzmann-Verteilung

$$f_B(E) = e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$$



ρ "Zustandsdichte" Anzahl zustände für eine Energie pro Volumen (Fermiteilchen (elektronen) können nur einen Zustand besetzen)

Zustand: Spin & schale => e.g. $\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow$
↳ Impuls / E_{kin}

impuls (englisch: momentum)

Wie Berechnet man dies? :

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m}$$

De Broglie:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

$$\hbar = h/2\pi, \text{ reduzierte Planck'sche K.}$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

(welle ↔ Teilchen)

a bunch of

QM

Ladungsträgerdichte im Leitungsband, mit Boltzmann-Annäherung Äquivalente Zustandsdichte im Leitungsband N_L Ladungsträgerdichte im Valenzband Äquivalente Zustandsdichte im Valenzband N_V

$$n = N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{k_B T}\right)$$

$$N_L = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_{eff,n} \cdot k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_{eff,p} \cdot k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$E_{tot} = \frac{\hbar^2 k^2}{2 m_{eff}} \text{ "effektive" "masse"}$$

(Eines Elektrons)
= $E_{kin} + E_{pot}$

EIGENLEITER & FERMİ NIVEAU (Weniger Wichtig für Prüf. höchstens Theoriefrage)

- Ein **Eigenhalbleiter** (intrinsic semiconductor) ist ein Halbleiter, der nur verschwindend kleine Spuren von Verunreinigungen enthält. 10^{10}

↳ Löcher und e^- im Leitungsband entstehen paarweise $\Rightarrow n = p = n_i$ Diese H/L nennt man:
• Eigenleitend (intrinsisch)
Eigenleitungsträgerdichte

Das Massenwirkungsgesetz (MWG) besagt: $n_i^2(T) = n p$

Typische Werte bei $T = 293 \text{ K}$

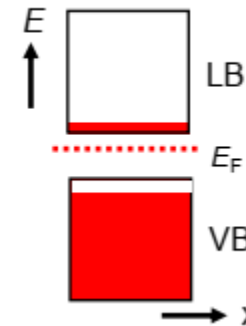
Ge	$n_i = 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Si	$n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
InP	$n_i = 1.2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$
GaAs	$n_i = 1.8 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$

↓
Zunehmender
Bandgap

Lage des Fermi Niveaus E_F :

"Energie die man braucht
um ein Elektron raus
zu schleudern"

$$E_F(T) = \frac{1}{2}(E_V + E_L) + k_B T \ln \left(\sqrt{\frac{N_V}{N_L}} \right)$$
$$= \frac{1}{2}(E_V + E_L) + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right)$$



DOTIERUNG Verstehen was n- & p-Dotiert heisst

Durch Legierung: Wir bauen Fremdatome im Gitter ein.

⇒ Änderung von n (Freien elektronen) oder p (löcher)

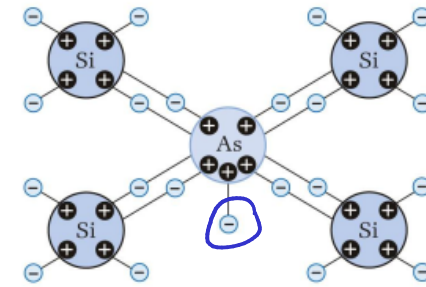
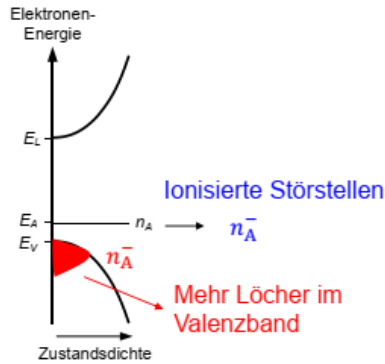
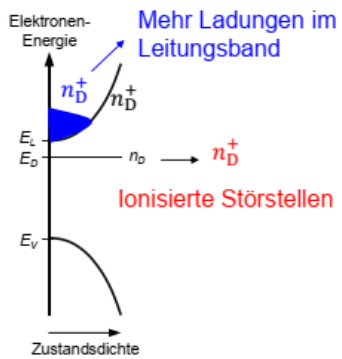


Abbildung 4.8: Atomare Struktur mit Donator-Atom

n-Dotiert
bzw.
n-Halbleiter
⇒ As als Donator

Donator Niveau Akzeptor Niveau



Donatorenniveau E_D

Akzeptorenniveau E_A

Ladungsneutralität

$$\Delta E_D = E_L - E_D$$

$$\Delta E_A = E_A - E_V$$

$$n + n_A^- = p + n_D^+$$

E_D ist unter dem Leitungsband

E_A ist über dem Valenzband

n_A^- , ionisierte Akzeptorendichte

n_D^+ , ionisierte Donatorendichte

Fermi Niveau

n-Dotiert $E_F - E_L = -k_B T \ln \frac{N_L}{n_D}$

p-Dotiert $E_F - E_V = k_B T \ln \frac{N_V}{n_A}$

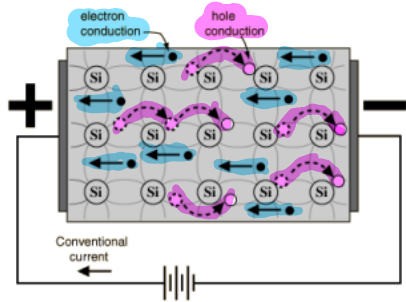
Alternativ Bor ⇒ p-Dotiert, Akzeptor

DRIFT & DIFFUSIONSSTROM (Weniger wichtig)

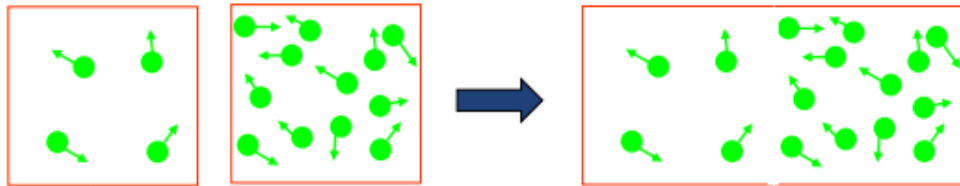
Drift-/Konvektionsstrom ist der Strom, der entsteht aufgrund eines E-Felds (schon bekannt)

$$\vec{J}_{\text{Drift}} = [en\mu_n + ep\mu_p] \vec{E} \quad \text{mit Leitfähigkeit: } \kappa = en\mu_n + ep\mu_p \quad \rightarrow \text{Siehe W2 Mobilität}$$

↳ entsteht durch freie e^- & Löcher



Diffusionsstrom ist der Strom, der entsteht aufgrund vom Konzentrationsunterschied



Tiefe Ladungsträgerkonzentration
Hohe Ladungsträgerkonzentration

Durchschnittliche Bewegungsrichtung beim Zusammenbringen

Löcher und freie Elektronen werden ständig generiert und rekombiniert.

Einschuss v. Ladungsträgern

$$pn > n_i^2$$

$$\Delta n = \Delta p = g \tau_{n/p}$$

n , Elektronendichte
 p , Löcherdichte
 g , Generationsrate
 $\tau_{n/p}$, Lebensdauer von Elektronen (n) und Löchern (p)

$$\vec{J}_{\text{Diff}} = \vec{J}_{n, \text{Diff}} + \vec{J}_{p, \text{Diff}}$$

$$\vec{J}_{n, D} = +eD_n \nabla n$$

$$\vec{J}_{p, D} = -eD_p \nabla p \quad \text{gradient}$$

Diffusionskonstant e

(Stromrichtung entgegen Konzentrationsgradienten)

Ficksches Gesetz

RAUMLADUNGSDICHTE, TOTALE STROMDICHTE, POTENTIAL Back to the roots

Aus der differentiellen Form der Kontinuitätsgleichung (alles was rein fließt muss auch raus fließen):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = -e(g_n - r_n) + e(g_p - r_p) \quad \rho, \text{Raumladungsdichte}$$

$$\rho = e(p + n_D^+ - n - n_A^-)$$

Folgt:

$$\text{Elektronenstromdichte} \quad \vec{J}_n = \vec{J}_{n,\text{Drift}} + \vec{J}_{n,\text{Diff}} \quad \vec{J}_n, \text{totale Elektronen-Stromdichte}$$

$$\vec{J}_n = en\mu_n \vec{E} + eD_n \nabla n$$

$$\text{Löcherstromdichte} \quad \vec{J}_p = \vec{J}_{p,\text{Drift}} + \vec{J}_{p,\text{Diff}} \quad \vec{J}_p, \text{totale Löcher-Stromdichte}$$

$$\vec{J}_p = ep\mu_p \vec{E} - eD_p \nabla p$$

$$\text{Kontinuitätsgleichung für Löcher} \quad \frac{\partial(ep)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_p = e(g_p - r_p) + eg_{\text{ext}}$$

$$\text{Kontinuitätsgleichung für Elektronen} \quad \frac{\partial(-en)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_n = -e(g_n - r_n) - eg_{\text{ext}}$$

Und schließlich zur Poisson Gleichung auf die Potentialdifferenz

$$\text{Poisson Gleichung} \quad \Delta\phi = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{e}{\epsilon}(p + n_D^+ - n - n_A^-)$$

ϕ , Potential
 ρ , Raumladungsdichte
 ϵ , Permittivität

(Nächstes Semester in Fluid Dynamik genauer)

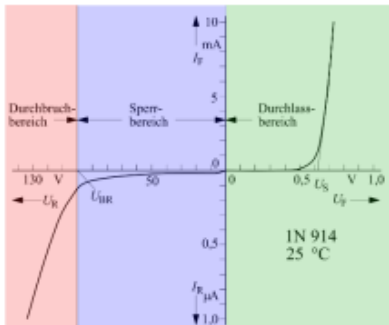
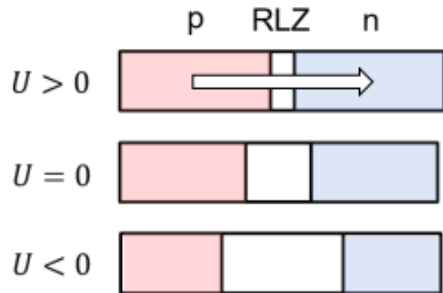
HALBLEITER Z-BAUELEMENTE (wichtiger Funktion verstehen)

Formelsammlung; S. 19-20

Mindmap

pn Übergang → pn Diode

Anode (+) ———▶ Kathode (-)



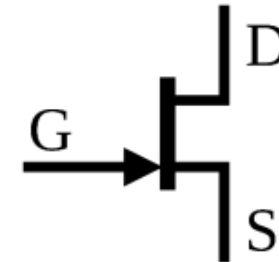
$$I = I_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

Damit lassen sich alle andern Halbleiterbauelemente verstehen.

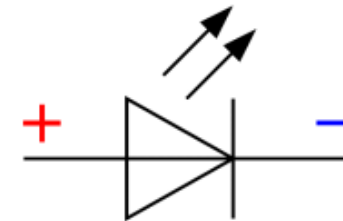
Zenerdiode



Transistor



LED



Photodiode/
Solarzelle

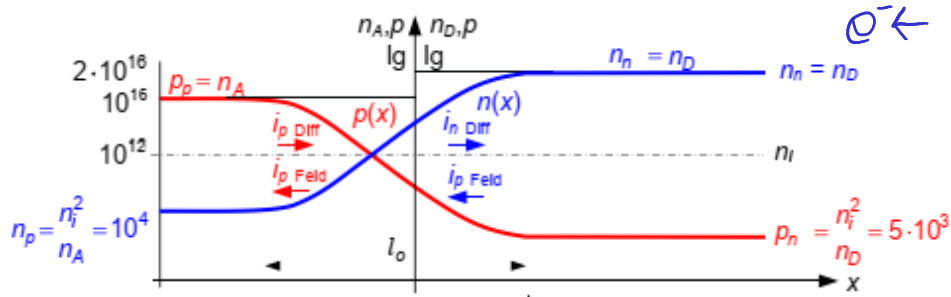
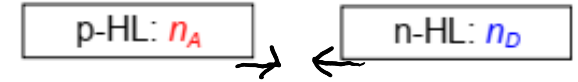
$$I = I_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_L$$

$$I = I_L - I_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

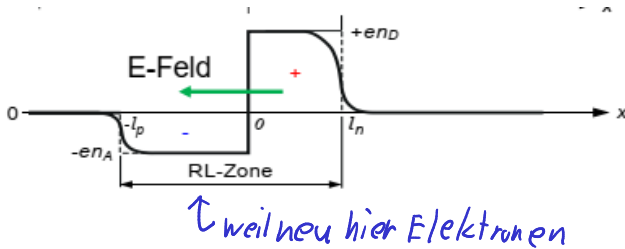
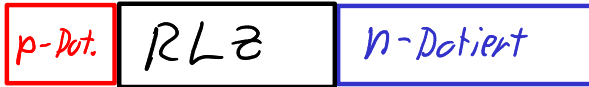
PN-ÜBERGÄNGE (Konzept verstehen)

Wir Bringen ein **p-Dotiertes** und ein **n-Dotiertes** Material zusammen

- Es entsteht ein Diffusionsstrom! (Elektronen fließen zu Löchern an Grenzfläche)



- Daraus entsteht eine Raumladungszone RLZ:

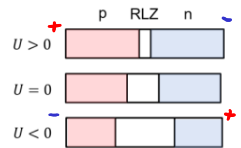
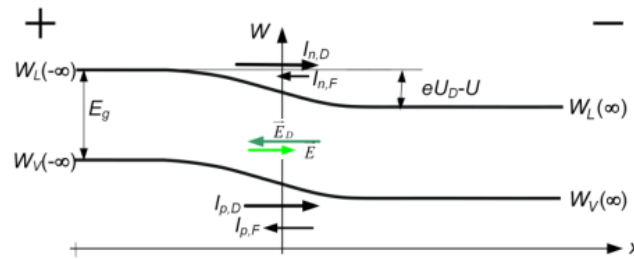


⇒ Ein E-Feld an der grenzschicht aufgrund Ladungsverteilung

E-Feld ⇒ Diffusionsspannung:

$$U_D = - \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E} dx = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{n_D n_A}{n_i^2} \right)$$

Dieses E-Feld entspricht den Energien der Leitungs-/Valenzbänder

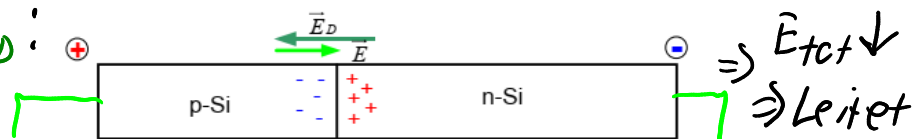


⇒

$E_{tot} \uparrow$
⇒ Sperrt

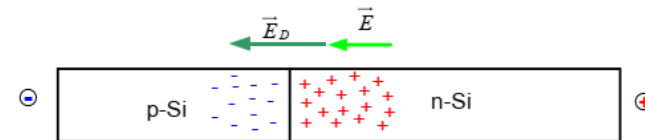
Was passiert bei anlegen von äußeren Spannungen?

Entgegen $\vec{E}_D$:



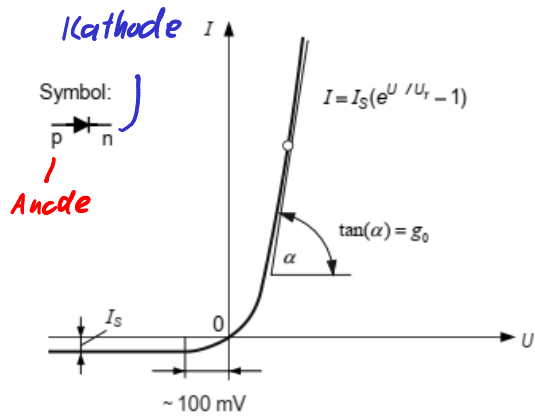
⇒ $E_{tot} \downarrow$ Gleichgerichtet $\vec{E}_D$:

⇒ Leitet



DIODE

⇒ Stromfluss in eine Richtung, andere gesperrt:



⇒ Strom steigt exponentiell an!

$$I = I_n + I_p = I_S \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

⇒ Für kleine Änderungen approx. Linear:

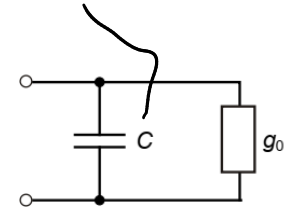
$$g(U) = \frac{dI}{dU} = \frac{e}{k_B T} (I(U) + I_S)$$

g, Kleinsignal Leitwert

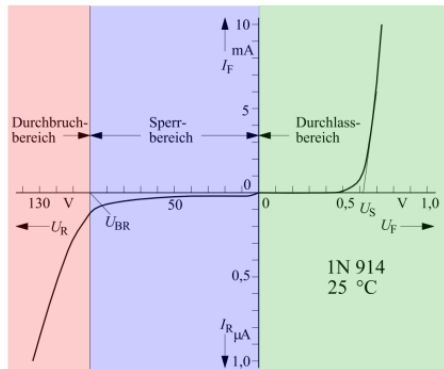
⇒ Ersatzschaltbild

Sperrschichtkapazität:

$$C_S = \frac{dQ}{dV} = \frac{A}{l} \epsilon_r \epsilon_0$$



* Dioden können nicht viel Strom aushalten, irgendwann Schmelzen sie durch, oder Brechen durch, wenn sie in Sperrrichtung betrieben werden:



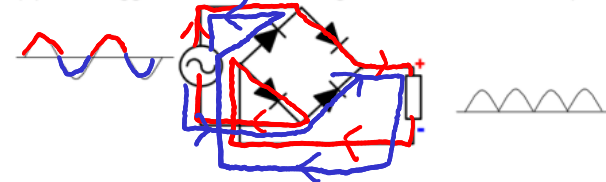
Nutzung: Gleichrichter Dioden

(a) Einweggleichrichter



Nur eine halbwelle !!

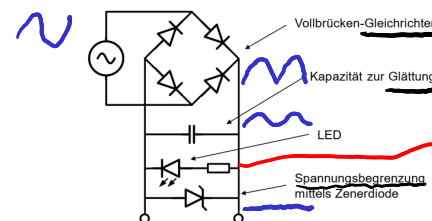
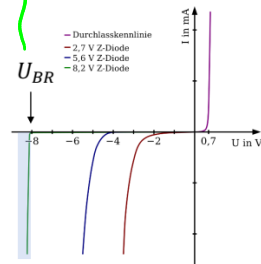
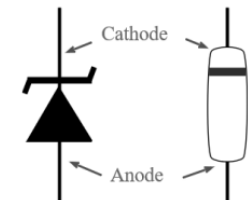
(b) Zweiweggleichrichter (Brückengleichrichter nach Graetz)



Zener Dioden!

- werden in Sperrrichtung betrieben.
- Spannungsstabilisator, Überspannungsschutz

Durchbruch nach bestimmter Spannung

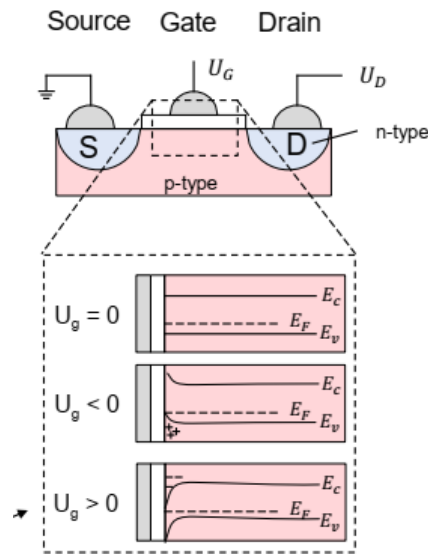
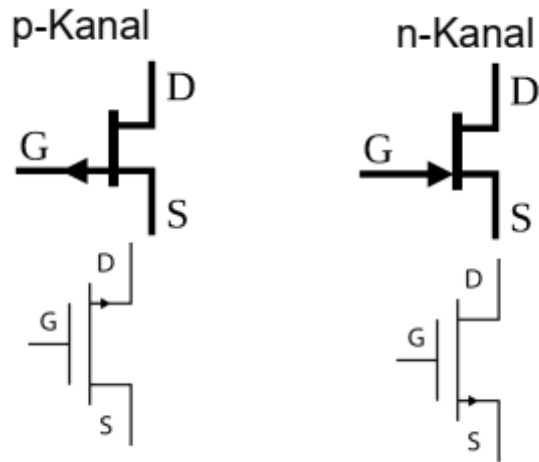


verwider stand!

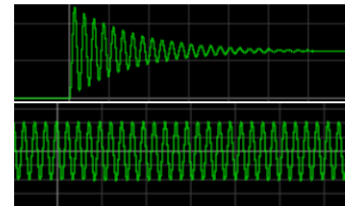
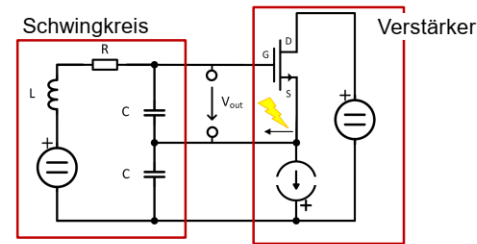
TRANSISTOREN (Es wird nur der MOSFET Transistor angeschaut → Es gibt noch andere Arten)

Aktives Bauteil. mit der Gate-Source-Spannung können wir den Transistor Ein-/Ausschalten

⇒ Stromfluss durch Drain-Source

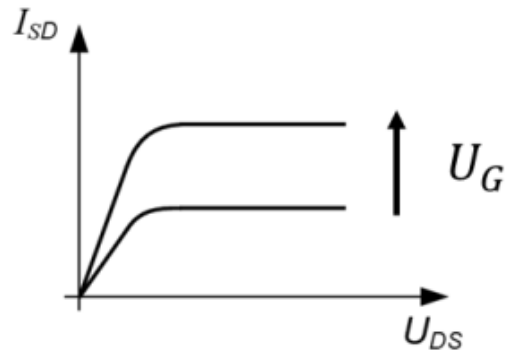


Bsp. Als Verstärker



← Ohne Verstärker

← Mit Verstärker



Linear: $I_{DS} = \beta(V_{GS} - V_T)V_{DS}$

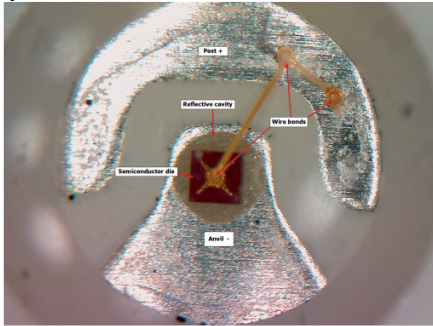
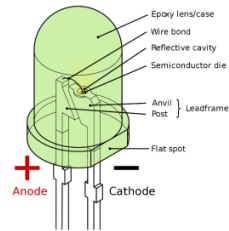
Sättigung: $I_{DS} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2$

LEDs & PV-ZELLEN

Light Emitting Diode

Photo Voltaik

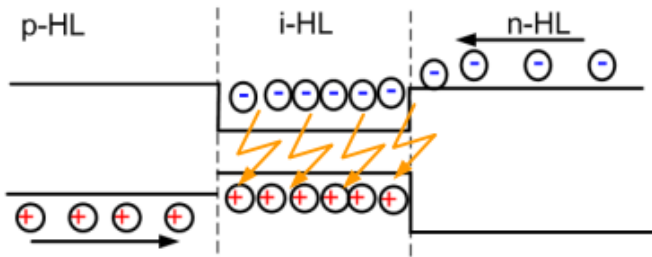
Aufbau LED:



https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode

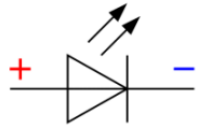
⇒ Nutzt Rekombination ⇒ Strahlt Photonen ab
 ⇒ Je nach Material andere Farbe.
 ⇒ Blau ist schwerer zu erzeugen, da kleine Wellenlänge

Heterostruktur pin-Laser Diode in Flusspolung

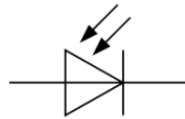


i-Dotierung

LED



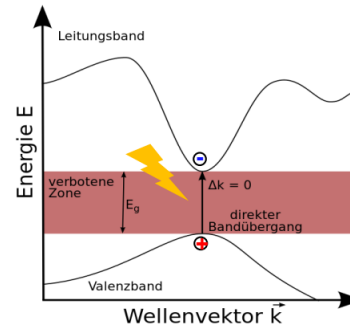
Solarzelle/Photodetektor



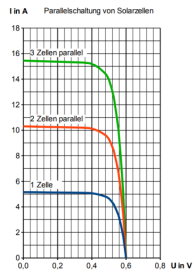
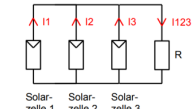
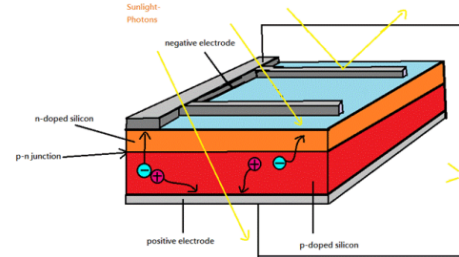
PD
Photo diöden

Funktionieren genau umgekehrt:

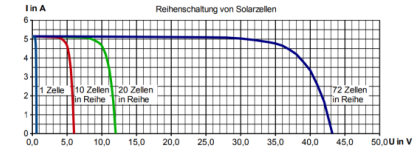
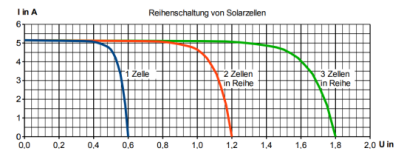
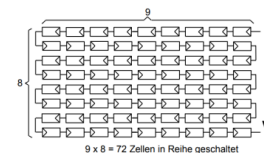
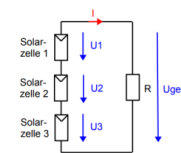
- Beim Einfall eines Photons wird ein Elektron ins Leitungsband befördert.



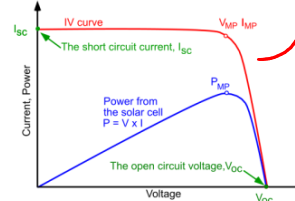
Um grössere Ströme zu erreichen können die PV-Zellen parallel geschaltet!



Um die PV mit grösseren Spannung zu erreichen, können diese in Serie geschaltet werden.



$$I = I_L - I_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$



Umgekehrte Kennlinie, da Quelle

Generell Prüfungsvorbereitungstipps:

- Mit alten Prüfungen üben
- Auf Zeit üben
- Bei Fragen gerne ein Mail schreiben: kursulovic@ethz.ch

- Vielen Dank fürs kommen und mit machen 😊

VIEL GLÜCK!!!

