

ET I Übung 13

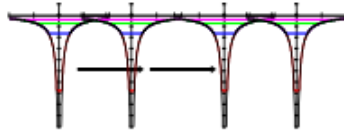
Aufbau:

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



n.ethz.ch/~kursulovic

Mindmap



Grundlagen

Atomarer Aufbau / Leitungsbänder

Ladungsträgerverteilung

Dotierung

Ladungsträgeränderungen

- + Driftstrom
- + Diffusionsstrom
- + Generation und Rekombination

Alles zusammen

Kontinuitätsgleichung
Poissongleichung

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

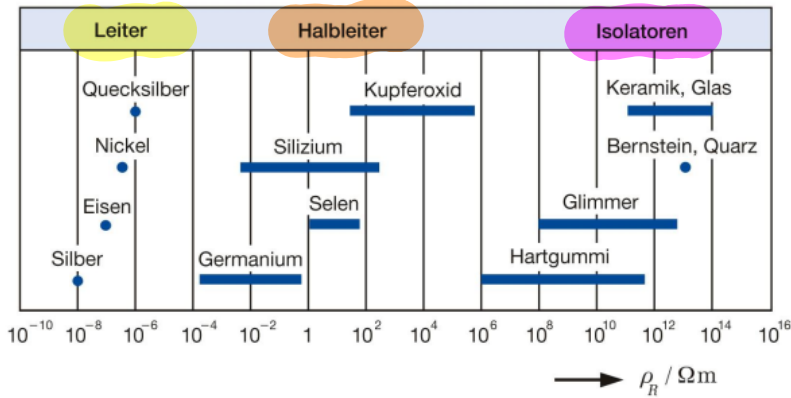


Abbildung 4.5: Spezifischer Widerstand fester Körper nach [16]

Spezifischer Widerstand

Widand erstreckt sich über mehrere Dekaden für HL

⇒ Abhängigkeit vom Reinheitsgrad (Donatoren)

⇒ Abhängigkeit von Temperatur (HL sind NTCs)

In PSE:

Perioden	Das Periodensystem der Elemente																Hauptgruppen										VIII													
	I		II		Nebengruppen																III	IV	V	VI	VII	II														
1	H																				5	6	7	8	9	10	He													
2	Li		Be																			B	C	N	O	F	Ne													
3	Na	Mg			IIIa	IVa	VA	VIa	VIIa	VIIIa		IA		IIA	13	14	15	16	17	18																				
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																						
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																						
7	Fr	Ra	Ac	Ku	Ha																																			
Lanthanoide																					58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71						
Actinoide																					90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103						
																					Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr						
																					Wasserstoff					Alkalimetalle					Erdalkalimetalle					Metalle				
																					Halbleiter					Nichtmetalle					Edelgase					radioaktiv				

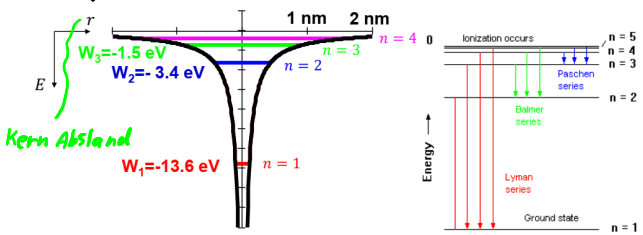
Element-Halbleiter: Si, Ge ...

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

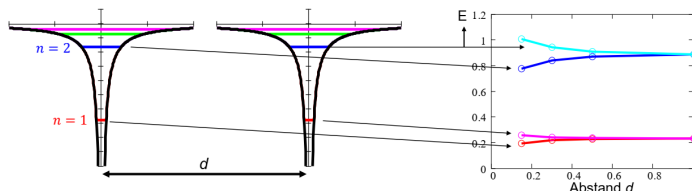
Aus Chemie (und Quantenmechanik) wissen wir:

- Elektronen haben verschiedene Energieniveaus pro Schale!

Bsp H-Atom!

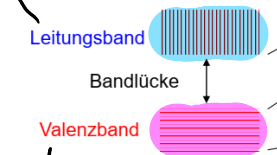


Bei mehreren Atomen verschieben sich diese Niveaus: (Z Elektronen dürfen nie den gleichen Zustand haben!)



→ Dies führt zu Energiebänder!

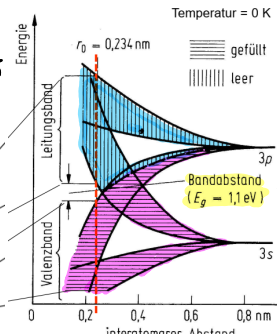
Erstes unbesetztes Band



Höchstes Band voll besetzt mit e^-

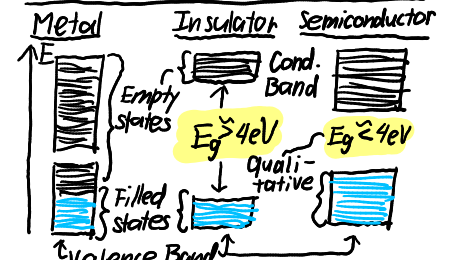
⇒ Die e^- müssen also aus dem Valenzband heraus ins Leitungsband.

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: $E_g [0.7 \text{ eV}, 4 \text{ eV}]$

Si	$E_g = 1.12 \text{ eV}$
Ge	$E_g = 0.67 \text{ eV}$
GaAs	$E_g = 1.42 \text{ eV}$

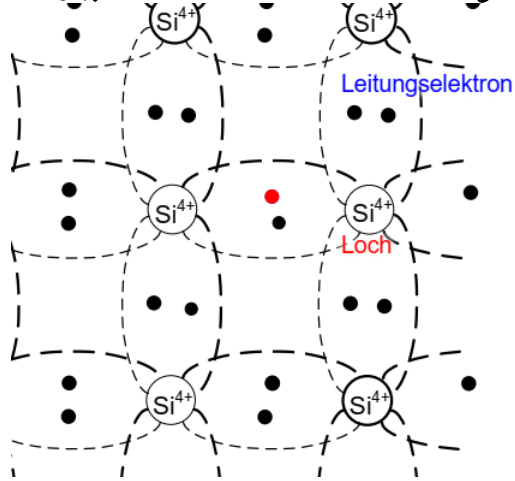
STROMLEITUNG-AUSFLUG IN DIE QUANTUMMECHANIK (Nächstes Semester bei D.J. Norris)

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.

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

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

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

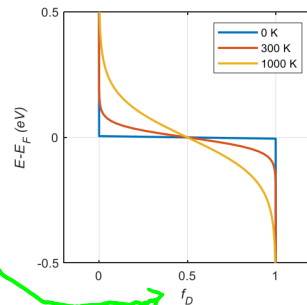
(Boltzmann konst)

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: (welle ↔ Teilchen)

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

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

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

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

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

a bunch of
QM

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

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

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

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

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

Ladungsträgerdichte im Valenzband Äquivalente Zustandsdichte im Valenzband N_V

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: $n_i^2(T) = n p$

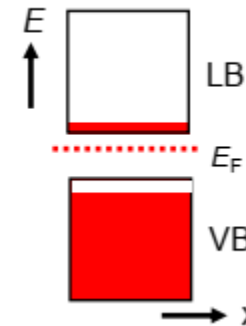
Typische Werte bei $T = 293 \text{ K}$

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 :

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



DOTIERUNG Verstehen was n- & p-Dotiert heisst

Durch Legierung: Wir bauen Fremdatome im Gitter ein.

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

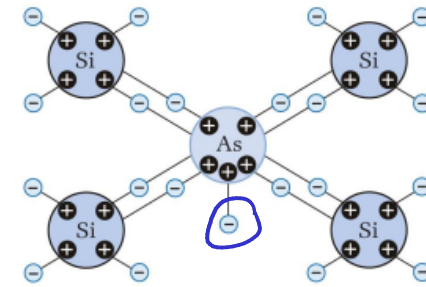
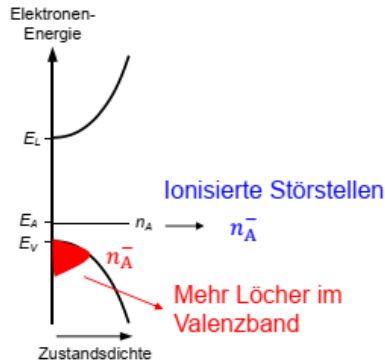
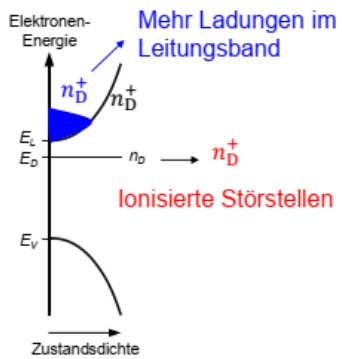


Abbildung 4.8: Atomare Struktur mit Donator-Atom

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

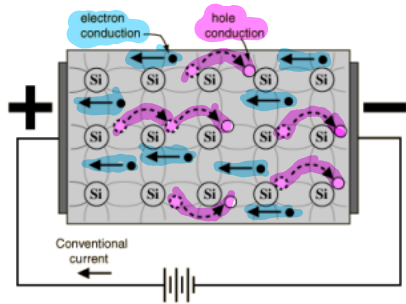
Alternativ Bor ⇒ p-Dotiert, Akzeptor

DRIFT & DIFFUSIONSSTROM (Weniger wichtig)

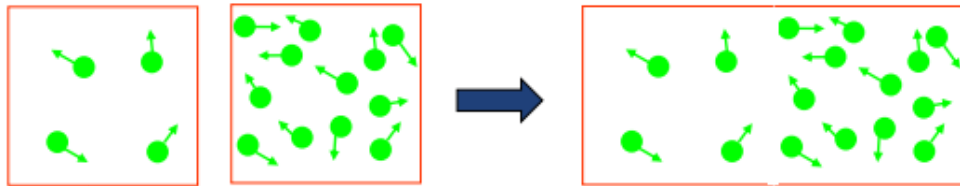
Drift-/Konvektionsstrom ist der Strom, der entsteht aufgrund eines E-Felds (schon bekannt)

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

↳ 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)

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

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

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

↑
Diffusionskonstante 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)

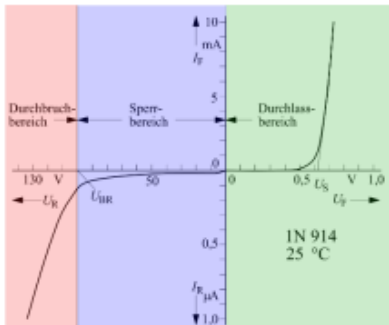
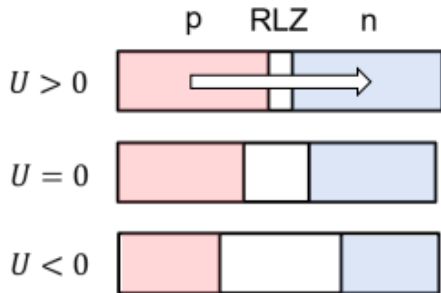
HALBLEITER Z-BAUELEMENTE (wichtiger Funktion verstehen)

Formelsammlung; S. 19-20

Mindmap

pn Übergang → pn Diode

Anode (+) ———▶ Kathode (-)



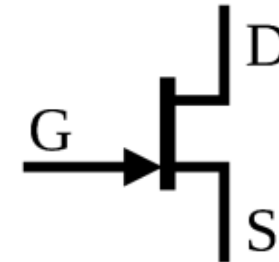
$$I = I_S (e^{\frac{eU}{kT}} - 1)$$

Damit lassen sich alle andern Halbleiterbauelemente verstehen.

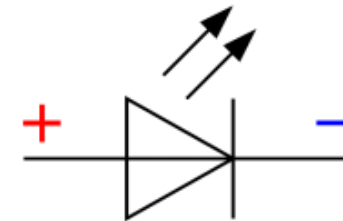
Zenerdiode



Transistor



LED



Photodiode/
Solarzelle

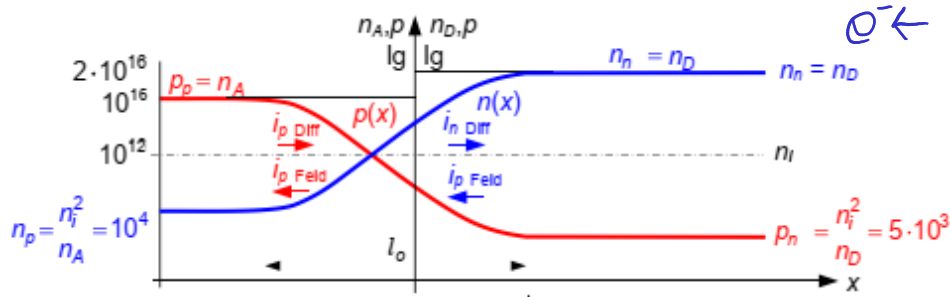
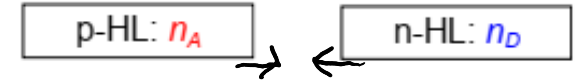
$$I = I_S (e^{\frac{eU}{kT}} - 1) - I_L$$

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

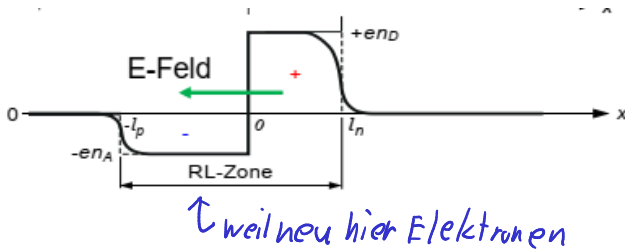
PN-ÜBERGÄNGE (Konzept verstehen)

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:

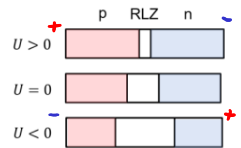
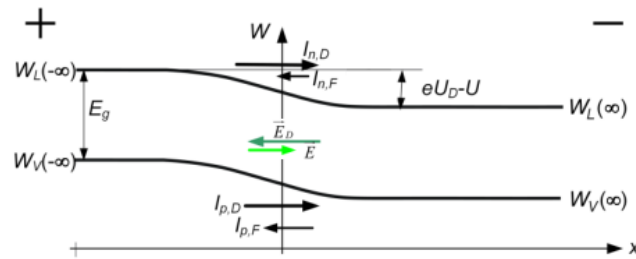


⇒ Ein E-Feld an der grenzschicht aufgrund Ladungsverteilung

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

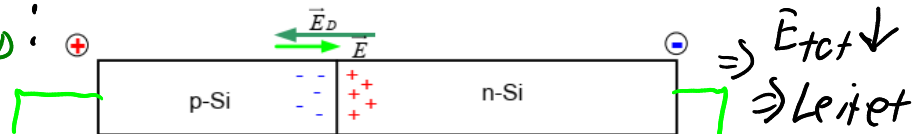


⇒

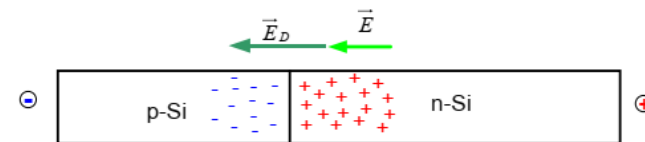
$E_{tot} \uparrow$
⇒ Sperrt

Was passiert bei anlegen von äußeren Spannungen?

Entgegen $\vec{E}_D$:

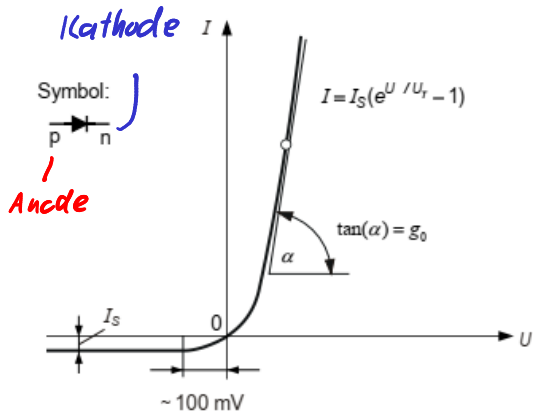


⇒ $E_{tot} \downarrow$ Gleichgerichtet $\vec{E}_D$:



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:

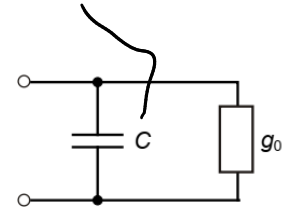
$$g(U) = \frac{dI}{dU} = \frac{e}{k_B T} (I(U) + I_S)$$

g, Kleinsignal Leitwert

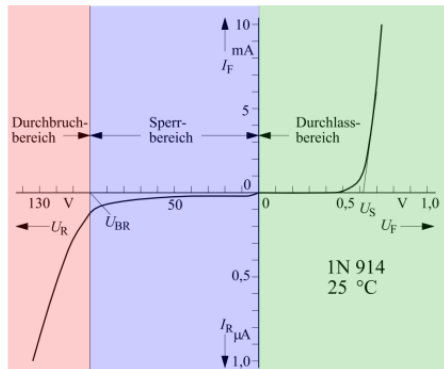
⇒ Ersatzschaltbild

Sperrschichtkapazität:

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

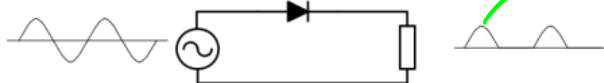


* Dioden können nicht viel Strom aushalten, irgendwann Schmelzen sie durch, oder Brechen durch, wenn sie in Sperrrichtung betrieben werden:



Nutzung: Gleichrichter Dioden

(a) Einweggleichrichter



Nur eine halbwelle!

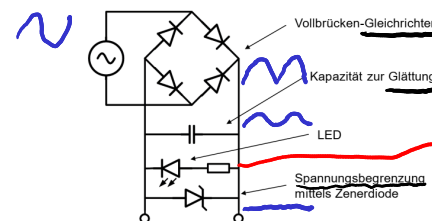
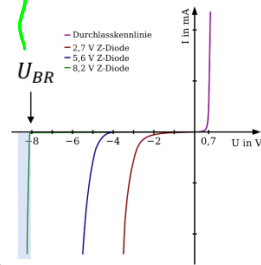
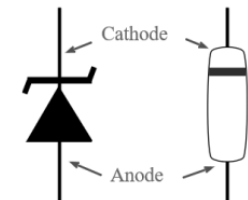
(b) Zweiweggleichrichter (Brückengleichrichter nach Graetz)



Zener Dioden!

- werden in Sperrrichtung betrieben.
- Spannungsstabilisator, Überspannungsschutz

Durchbruch nach bestimmter Spannung

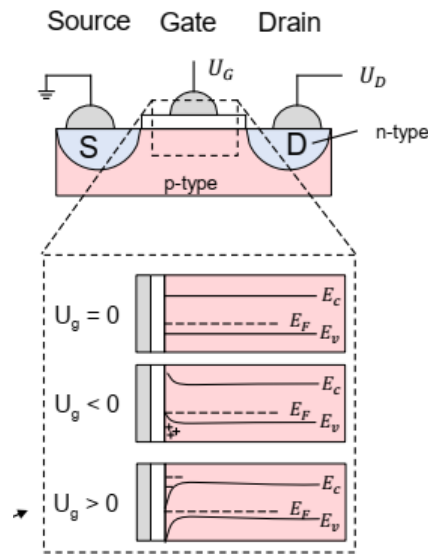
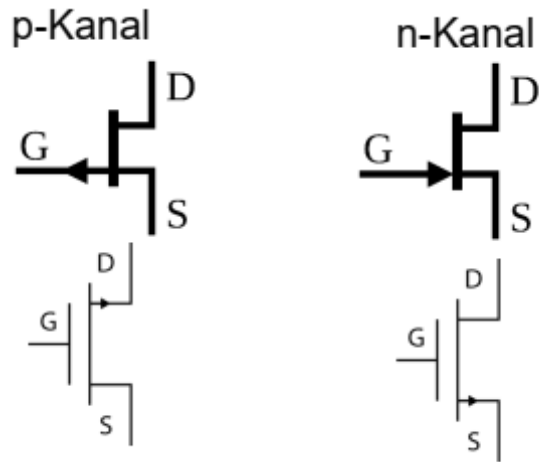


Verwiderstand!

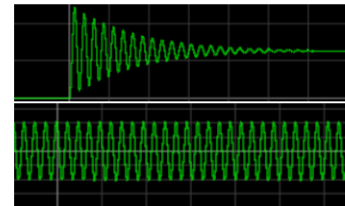
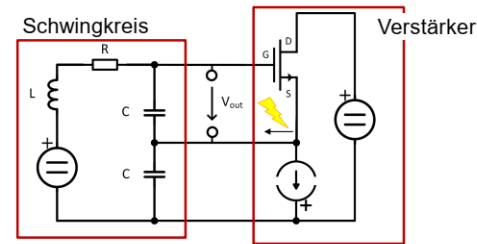
TRANSISTOREN (Es wird nur der MOSFET Transistor angeschaut → Es gibt noch andere Arten)

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

⇒ Stromfluss durch Drain-Source

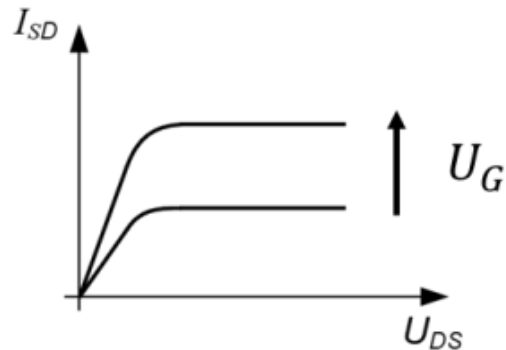


Bsp. Als Verstärker



← Ohne Verstärker

← Mit Verstärker



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

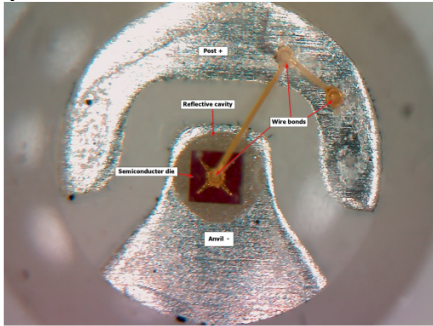
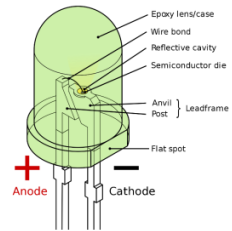
Sättigung: $I_{DS} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2$

LEDs & PV-ZELLEN

Light Emitting Diode

Photo Voltaik

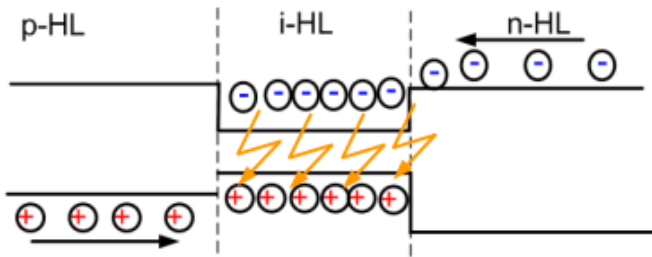
Aufbau LED:



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

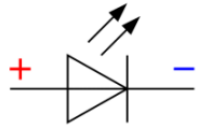
⇒ Nutzt Rekombination ⇒ Strahlt Photonen ab
 ⇒ Je nach Material andere Farbe.
 ⇒ Blau ist schwerer zu erzeugen, da kleine Wellenlänge

Heterostruktur pin-Laser Diode in Flusspolung

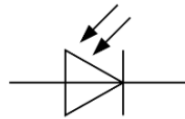


i-Dotierung

LED



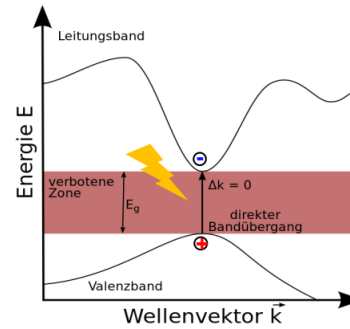
Solarzelle/Photodetektor



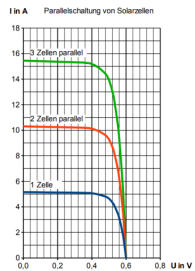
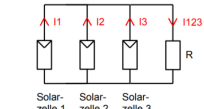
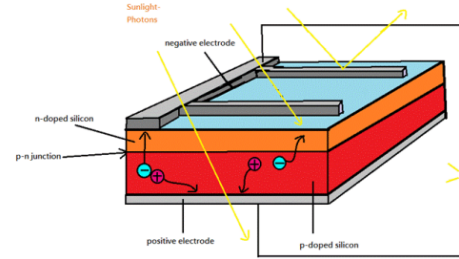
PD
 Photo diöden

Funktionieren genau umgekehrt:

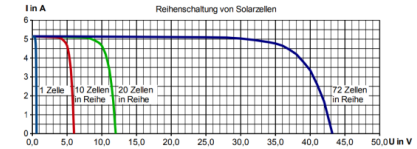
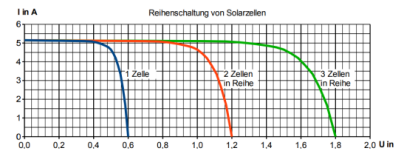
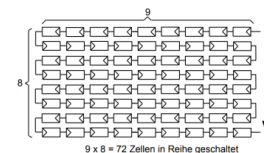
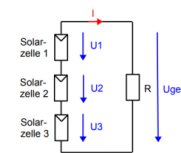
• Beim Einfall eines Photons wird ein Elektron ins Leitungsband befördert.



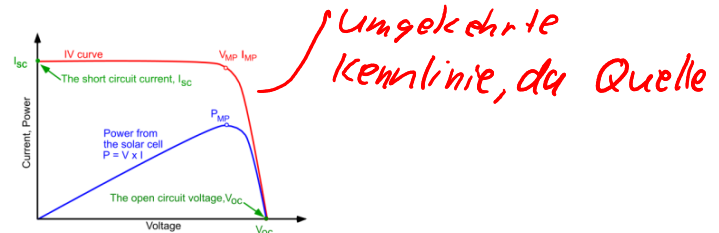
Um grössere Ströme zu erreichen können die PV-Zellen parallel geschaltet!



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, der Quelle

Tipp 5: Diese Serie ist weniger Prüfungsrelevant
Theoriefragen können jedoch kommen (siehe alte Prüf.)

Schwerpunkte der Übungen:

- Übung 1- Parasitäre Induktivität eines Verlängerungskabels:
 - Komplexe Wechselstromrechnung
 - Verständnis für Wirk-, Blind- und Scheinleistung aus komplexer Rechnung
 - Kompensieren von Blindleistung. L vs. C im Stromkreis
- Übung 2 - Halbleiter Grundlagen:
 - Verständnis über Bandlücke und Klassifizierung von Materialien
 - Fermi-Dirac vs. Boltzmann. Wann ist Approximation legitim?
 - Grundlagen zu Eigenhalbleiter
- Übung 3 - Leitfähigkeit und Dotierung:
 - Ladungsträgerdichten im intrinsischen und dotierten Halbleiter
 - Verständnis für p- vs. n- Dotierung.
 - Berechnung des Fermi-Niveaus mit Dotierung. Wichtig: welche Annahmen treffen wir?
 - Berechnung von Leitfähigkeit

Generell Prüfungsvorbereitungstipps:

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

Von mir:

- Ich werde mein komplettes Skript auf AMIV hochladen
- Vielen Dank fürs kommen und mit machen 😊

VIEL GLÜCK !!!

