Elementar

Bohrsches Atommodell: $\boxed{N_{max} = 2 \cdot n^2}$ mit N_{max} = max. Anzahl Elektronen/Schale und n =Schalennummer von innen startend, Sonderregel: Äußerste Schale max. 8 Elektronen (Edelgaskonfi.)

Eigenschaften: Halbleiter: 4, Verbindungshalbleiter: 3 oder 5, Metalle: 1 bis 3 Valenzelektronen

Bindungsarten

Metallbindung: Kristallbildung in Metallen Valenzelektronen nicht beteiligt → daher gute Stromleiter

Elektronenpaarbindung: Teilen sich Valenzelektronen, Edelgaskonfi möglich → schwer zu lösen → Halbleiter

Leitungsmechanismen in Halbleiter

Leitungsmechanismen in Halbleiter: Methode **1.) Eigenleitung** Methode **2.) Störstellenleitung**

1.) Eigenleitung: (bei reinen Halbleitern einzige Methode)

a) Paarbildung: Bei Energiezufuhr verlässt Valenzelektron sein Platz, es entsteht Loch, Löcher wandern → positiver Ladungsträger

b) Rekombination: freies Elektron wird durch ein Loch wieder eingefangen

$\boxed{\underbrace{n_0 = p_0}_{\text{Konzentration gleich}} = \underbrace{n_i}_{\text{Gleichgewicht zwischen a) und b)}} = f(T)}$

Intrinsic-Zahl, Temp-Abhängig

$n_{i\,(Silizium)}$ =1,5 ·10^{10} cm^{-3}, T_0 = Bezugstemperatur (300K), [Wg] = eV → mal 1,6 · 10^{-19} As

$$\boxed{n_i = n_{i0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{W_G \cdot (T-T_0)}{2 \cdot k \cdot T \cdot T_0}}}$$

2.) Störstellenleitung: Fremdatome werden hinzugefügt (Ziel: Leitfähigkeit erhöhen)

a) Dotieren mit 5-wertigen Fremdatomen (n-Halbleiter) (z.B. Phosphor, Arsen)

Fremdatom wird Donator genannt, kleine Ionisierung Energie, negativer Ladungsträger → n-leitender Halbleiter

b) Dotieren mit 3-wertigen Fremdatomen (p-Halbleiter) (z.B. Bor, Aluminium)

Fremdatom wird Akzeptor genannt, kleine Ionisierung Energie, positiver Ladungsträger → p-leitender Halbleiter

Formeln zu 2.) Ladungsträger im <u>thermodynamischen Gleichgewicht</u> → homogen dotiert → Kristall neutral

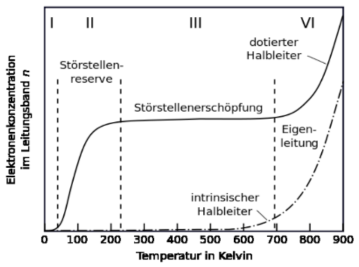
Neutralitätsbedingung: $\boxed{p_0 + {N_D}^+ = n_0 + {N_A}^-}$ Massenwirkungsgesetz: $\boxed{n_0 \cdot p_0 = {n_i}^2}$

Bei einfacher Dotierung ist $\boxed{\text{endweder } {N_D}^+ \; oder \; {N_A}^- = 0}$

Konzentration der freien Ladungsträger im thermod. Gleichgewicht:

$$n_0 = \frac{1}{2}\left({N_D}^+ - {N_A}^- + \sqrt{({N_D}^+ - {N_A}^-)^2 + 4 \cdot {n_i}^2}\right)$$

$$p_0 = \frac{1}{2}\left({N_A}^- - {N_D}^+ + \sqrt{({N_A}^- - {N_D}^+)^2 + 4 \cdot {n_i}^2}\right)$$



Majorität/Minoritätsträger

Majoritätsträger: aus Dotierung → bei n-Halbleiter Elektronen $\mathbf{n_{n0}}$ in Überzahl, bei p-Halbleiter Löcher $\mathbf{p_{p0}}$ in Überzahl

Minoritätsträger: aus Eigenleitung → bei n-Halbleiter Löcher $\mathbf{p_{n0}}$ in Unterzahl, bei p-Halbleiter sind Elektronen $\mathbf{n_{p0}}$ in Unterzahl

Ladungsträgerkonzentration

Ladungsträgerkonzentration im n-leitenden Halbleiter:

Einfachdotierung: (Es wird nur mit N_D doniert) $N_D >> n_i$

Majoritätsträger-Konzentration: $\boxed{n_{n0} \approx {N_D}^+ \approx N_D}$ (Dotierungskonzentration)

Minoritätsträger-Konzentration: $\boxed{p_{n0} \approx {n_i}^2 / \, N_D}$ (Konzentration ist kleiner als die obige)

Mehrfachdotierung: $N_D > N_A$ und $(N_D - N_A) >> n_i$

Majoritätsträger-Konzentration: $\boxed{n_{n0} \approx N_D^+ - {N_A}^- \approx N_D - N_A}$

Minoritätsträger-Konzentration: $\boxed{p_{n0} \approx {n_i}^2 / (N_D - N_A)}$

Ladungsträgerkonzentration

Ladungsträgerkonzentration im p-leitenden Halbleiter:

Einfachdotierung: (Es wird nur mit N_A doniert) $N_A >> n_i$

Majoritätsträger-Konzentration: $\boxed{p_{p0} \approx N_A^- \approx N_A}$ (Dotierungskonzentration)

Minoritätsträger-Konzentration: $\boxed{n_{p0} \approx {n_i}^2 / N_A}$

Mehrfachdotierung: $N_A > N_D$ und $(N_A - N_D) >> n_i$

Majoritätsträger-Konzentration: $\boxed{p_{p0} \approx N_A^- - N_D^+ \approx N_A - N_D}$

Minoritätsträger-Konzentration: $\boxed{n_{p0} \approx {n_i}^2 / (N_A - N_D)}$

Leitfähigkeit

Leitfähigkeit eines Halbleiterkristalls: mit μ siehe Tabelle, Angabe

Leitfähigkeit: $\boxed{\kappa = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)}$ hohe Dotierungskonzentration → hohe Wärmeschwingung → geringe Beweglichkeit → geringe Leitfähigkeit

Ladungsträgerbeweglichkeit: $\boxed{\mu(T) = \mu(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{3}{2}}}$ → temperaturabhängig $\boxed{[\mu] = \frac{cm^2}{Vs}\ ,\ [\kappa] = \frac{S}{m}}$

Energiebändermodell

Das Energie-Bändermodell: ***Valenzband und Leiterband***

Bei Hoher Energiedichte sind die einzelnen Energieniveaus nicht mehr voneinander unterscheidbar

Valenzband → Elektron kann sich leicht lösen und frei bewegen (durch Wechselwirkung benachbarte Atome)

Bei Metalle: Valenzband und Leitungsband überlappen → keine verbotene Zone → keine Energiezufuhr nötig → leiten

Bei Nichtleitern: Elektronen können sich im Valenzband nicht frei bewegen da zwischen Atomen „eingesperrt“→ fürs leiten müssten sie ins Leitungsband, das verhindert eine Bandlücke ≙ verbotenes Band ≙ $\mathbf{W_G}$ (Energie wird benötigt)

Bei Halbleiter: Bandlücke ist klein (bereits bei Raumtemperatur gelangen paar ins Leitungsband) $\mathbf{W_G}$ wird überwindet

Für Eigenleitung gilt: $\boxed{n_0 \cdot p_0 = {n_i}^2 = N_C \cdot N_V \cdot e^{\frac{-W_G}{k \cdot T}}}$ mit Bandabstand: $\boxed{W_G = W_C - W_V}$

Für dotierten Halbleiter (Störstellenleitung): Dotieren mit Fremdatomen → Energie-Terme im verbotenen Band (Störterme)

Temperatur

Temperaturabhängigkeit von Halbleiterdaten:

f Für $\mu_n,\ \mu_p, N_C, N_V$ → $\boxed{f(T) = f(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{3}{2}}}$

Für W_G: $\boxed{W_G(T) = W_{G0} - \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta}}$

	W_{G0} [eV]	α [eV·K⁻²]	β [K]
Si	1,17	$4{,}73 \cdot 10^{-4}$	636
Ge	0,74	$4{,}44 \cdot 10^{-4}$	235
GaAs	1,52	$5{,}41 \cdot 10^{-4}$	204

pn-Übergang

Der pn-Übergang: (Grenzschicht zwischen n-dotierten und p-dotierten Zone)

Raumladungsdichte: Dichte der ortsfesten negativen Ladung in der p-Zone: $\boxed{\rho_p = -e \cdot N_A^-}$ $\boxed{x_p \cdot \rho_p = x_n \cdot \rho_n}$

Dichte der ortsfesten positiven Ladung in der n-Zone : $\boxed{\rho_n = e \cdot N_D^+}$

Diffusionsspannung: = gegenseitige Aufladung von p- und n-Zone erzeugt eine elektrische Spannung zwischen den beiden Zonen

Sperrschichtweite: $\mathbf{W_s}$ (Raumladungszone) erstreckt sich von x_p bis x_n

Sperrschichtweite ohne äußere anliegende Spannung: $\boxed{W_{S0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \cdot U_D}}$

Sperrschichtweite mit Sperrspannung: $\boxed{W_{S_R} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \cdot (U_D + U_R)} = W_{S0} \cdot \sqrt{\frac{U_D + U_R}{U_D}}}$ (U_R positiv einsetzen)

Sperrschichtkapazität: Die Raumladungszone mit den enthaltenen elektrischen Ladungen wirkt wie ein geladener Plattenkondensator.

Sperrschichtkapazität Allgemein: $\boxed{C_S = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{W_S}}$

Sperrschichtkapazität Sperrpolung: $\boxed{C_S = \frac{C_S}{A} = \frac{\varepsilon}{W_{S_R}} = C_{S0} \cdot \sqrt{\frac{U_D}{U_D + U_R}}}$ C_{S0} = Kapazität des spannungslosen pn-Übergangs

Spannung am pn-Übergang:

Sperrpolung: $\boxed{U_{pn} = U_D + U_R}$ mit U_R= Sperrspannung → Spannung die man außen anliegt

Flusspolung: $\boxed{U_{pn} = U_D - U_F}$

Durchbruch bei hoher Feldstärke in Sperrrichtung:

1.) Lawinen-Effekt bei (>8V) Übergang der beiden Effekte zwischen 6 und 8 Volt Durchbruchspannung

2.) Zener Effekt bei (<6V)

Temperaturabhängigkeit der Kennlinie: (Beeinflusst alle Bereiche der Kennlinie eines pn-Überganges)

<u>Durchlassspannung</u> (bei unverändertem Strom) => $U_{\vartheta 2} = U_{\vartheta 1} + D_\vartheta \,.\, \Delta\vartheta$

mit D_ϑ = Temperaturdurchgriff ≈> $D_\vartheta \approx -\frac{\Delta U_F}{\Delta T} \approx -2\text{mV/K}$ (Gleichhaltung Durchlassstrom)

<u>Durchlassstrom</u> (bei unveränderter U_F) => $I_F(T) = I_F(T_0) \cdot e^{\,0{,}05K^{-1}\cdot(T-T_0)}$

<u>Sperrstrom</u> => $I_R(T) = I_R(T_0) \cdot e^{\,0{,}07K^{-1}\cdot(T-T_0)}$

das bedeutet ≈ eine Verdoppelung pro 10K => $I_R(T) = I_R(T_0) \cdot 2^{\frac{\Delta\vartheta}{10K}}$

<u>Spannungsdurchbruch</u> (1. Durchbruch) => $U_Z(T) = U_Z(T_0) \cdot (1+\alpha_{uz} \cdot \Delta\vartheta)$

Zenerdurchbruch mit $\alpha_{uz} \approx -0{,}1\% / K$

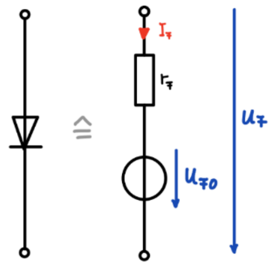
Lawinendurchbruch mit $\alpha_{uz} \approx +0{,}1\% / K$

<u>**Die Diode**</u>

Sperrpolung → Sperrrichtung → nur kleiner Sperrstrom fließt

Flusspolung → Durchlassrichtung → mit Spannung exponentiell stark ansteigender Durchlassstrom

Gesamtstrom durch idealen pn-Übergang $\boxed{I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1\right)}$



Differenzielle Widerstand: $\boxed{r_F = \frac{\Delta U}{\Delta I}}$

Lineare Ersatzschaltung der Diode in Durchlassrichtung $\boxed{U_F = U_{F0} + r_F \cdot I_F}$

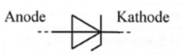
(U_{F0} ist Schnittpunkt der Tangente mit der X-Achse U im Kennliniendiagramm)

Durchlassverluste bei Gleichstrom: Verlustleistung $\boxed{P_D \approx U_F \cdot I_F}$

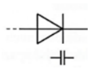
Durchlassverluste bei zeitlich verändertem Strom: Verlustleistung $\boxed{P_D = U_{F0} \cdot I_{F_{AV}} + r_F \cdot \left(I_{F_{eff}}\right)^2}$ bei Sinus mal 0,5

mit $I_{F_{AV}}$ = arithmetischer Mittelwert des Durchlassstroms, $I_{F_{eff}}$= Effektivwert des Durchlassstroms

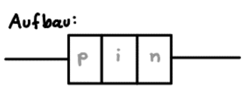
Z-Diode: Bauteile die im Durchbruchbereich betrieben werden.



Kapazitätsdiode: spannungsabhängig veränderbare Sperrschichtkapazität genutzt

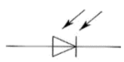


PIN-Diode: am pn-Übergang ist ein eingeschobener, nicht-dotierter (intrinsischer) Bereich

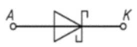


→ Sperrspannung wird erhöht

Photodiode: pn-Übergang wird beleuchtet →elektron-Loch-Paare erzeugt → Fotostrom (Sperrstrom) fließt

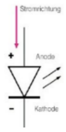


Schottky-Diode: kein pn-Übergang sondern Metall-Halbleiterübergang

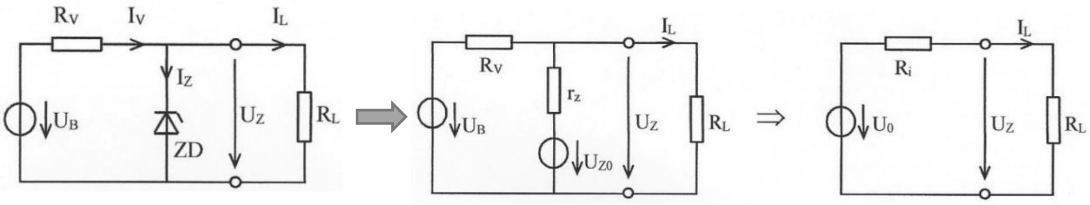


+ Kleinere Durchlassspannung, **+** Nur eine Ladungsträgerart ist für den Stromtransport zuständig → Keine Speicherladung, deshalb praktisch keine Rückstromspitze beim Ausschalten. Dadurch sehr kleine Umschaltverluste und Anwendung bei hohen Schaltfrequenzen möglich, **-** Höhere, mit der Temperatur stärker ansteigende Sperrströme als die pn-Diode,**-** Auf Siliziumbasis nur bis Sperrspannung 60 bis 80 Volt verfügbar (Ausnahme SiC)

Lumineszenzdiode (LED) und Laserdiode: Energie des Elektron-Loch-Paars W_g wird als Lichtquant frei



Stabilisierungsschaltung mit Z-Diode dient Erzeugung einer konstanten, relativ lastunabhängigen Gleichspannung aus einer höheren GS



$$U_0 = U_B \cdot \frac{r_Z}{R_V + r_Z} + U_{Z0} \cdot \frac{R_V}{R_V + r_Z}$$

$$R_i = R_V // r_Z$$

$$U_L = U_Z = U_0 \cdot \frac{R_L}{R_i + R_L} \qquad I_L = \frac{U_0}{R_i + R_L}$$

Zulässiger Arbeitsbereich der Z-Diode: $P_{tot} = I_{Zmax} \cdot U_{Zmax}$ Sicherheitsfaktor (z.B. 0,8)

(max. zulässiger Z-Strom I_{Zmax} bei $\vartheta_j = \vartheta_{jmax}$ für ϑ_U=25°C)

exakt: $I_{Zmax} = -\frac{U_{Z0}}{2r_Z} + \sqrt{\frac{P_{tot}}{r_Z} + \left(\frac{U_{Z0}}{2r_Z}\right)^2}$ mit $U_{Z0} = U_Z - r_{Z\,dyn} \cdot I_Z$ (ohne r_{th}) Für grob: $I_{Z\,max} \approx \frac{P_{tot}}{U_{Z\,max}}$

$T_j = T_u + R_{thJA} \cdot P_V$ mit T_u = Umgebungstemperatur, mit $P_V = U_{Z(temp)} \cdot I_Z$

Grenzwerte für die Versorgungsspannung U_B:

Maximum: bei gegebenem Laststrom: $U_{Bmax} = (I_{Zmax} + I_L) \cdot R_V + U_{Zmax}$

bei gegebenen Lastwiderstand: $U_{Bmax} = I_{Zmax} \cdot R_V + U_{Zmax}\left(1 + \frac{R_V}{R_L}\right)$

Minimum: bei gegebenem Laststrom: $U_{Bmin} = (I_{Zmin} + I_L) \cdot R_V + U_{Zmin}$

bei gegebenen Lastwiderstand: $U_{Bmin} = I_{Zmin} \cdot R_V + U_{Zmin}\left(1 + \frac{R_V}{R_L}\right)$

Grenzwerte für I_Z:

$I_{Z\,grenz} \approx \frac{P_{Z\,grenz}}{U_Z}$ für $P_{Z\,grenz}$ kann man P_{tot} einsetzen

Grenzwerte für den Vorwiderstand R_V:

Maximum: $R_{V\,max} = \frac{U_{B\,min} - U_{Z\,min}}{I_{Z\,min} + I_{L\,max}} \qquad R_{V\,max} = \frac{U_{B\,min} - U_{Z\,min}}{I_{Z\,min} + (\frac{U_{Z\,min}}{R_L})}$

Minimum: $R_{V\,min} = \frac{U_{B\,max} - U_{Z\,max}}{I_{Z\,max} + I_{L\,min}} \qquad R_{V\,min} = \frac{U_{B\,max} - U_{Z\,max}}{I_{Z\,max} + (\frac{U_{Z\,max}}{R_L})}$

Grenzwerte für den Lastwiderstand R_L:

Maximum: $R_{Lmax} = \frac{U_{Zmax} \cdot R_V}{U_B - U_{Zmax} - I_{Zmax} \cdot R_V}$

Minimum: $R_{Lmin} = \frac{U_{Zmin} \cdot R_V}{U_B - U_{Zmin} - I_{Zmin} \cdot R_V}$

Grenzwerte für den Laststrom I_L:

Maximum: $I_{Lmax} = \frac{U_B - U_{Zmin}}{R_V} - I_{Zmin}$

Minimum: $I_{Lmin} = \frac{U_B - U_{Zmax}}{R_V} - I_{Zmax}$

Genauere Betrachtung des differenziellen Widerstandes:

Durchbruchspannung der Z-Diode ist temperaturabhängig: $\boxed{U_Z(\vartheta) = U_Z(\vartheta_1)\cdot[1+\alpha\cdot(\vartheta_2-\vartheta_1)]}$

Durchbruchspannung für konstante Temperatur Sperrschichttemperatur ϑ_J = 25 °C : $\boxed{U_{Z(25°C)} = U_{Z0} + I_Z \cdot r_{Zdyn}}$

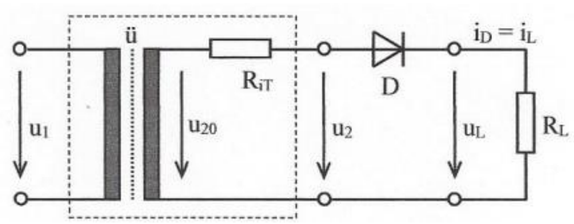
Durchbruchspannung der Z-Diode ist temperaturabhängig: $\boxed{U_{Z_U} \approx U_{Z0} + r_{ZU}\cdot I_Z \quad mit \quad r_{ZU} = r_{Zdyn} + \alpha\cdot {U_Z}^2\cdot R_{th}}$

Statisches Betriebsverhalten bei 25°C differenzielle Widerstand r_{zu} maßgebend: $\boxed{r_{ZU} = r_{Zdyn} + r_{Zth} \quad mit \quad r_{Zth} = \alpha\cdot {U_Z}^2\cdot R_{th}}$

Brummspannung am Lastwiderstand: $\boxed{U_{Brumm} \approx u_{Z\sim} = \frac{r_{Zdyn}}{R_V}\cdot U_b}$ (mit U_b = Wechselspannungsanteil) nur r_{zdyn} !!!

Netzgleichrichter:

Einweggleichrichter (Einpuls-Mittlepunktschaltung M1):



$\boxed{u_{20} = \frac{u_1}{ü} = \hat{u}_{20}\cdot\sin(\omega\cdot t)}$

Nur eine Diode leitet während positive Halbwelle

Arithmetischer Mittelwert bei Einweggleichrichtung:

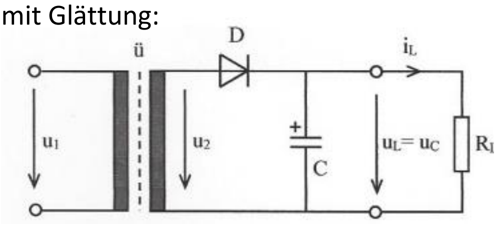
$\boxed{\bar{u}_L = 0{,}318\cdot\hat{u}_L}$

Effektiv-Spannung einer Einweggleichrichtung:

n = 1

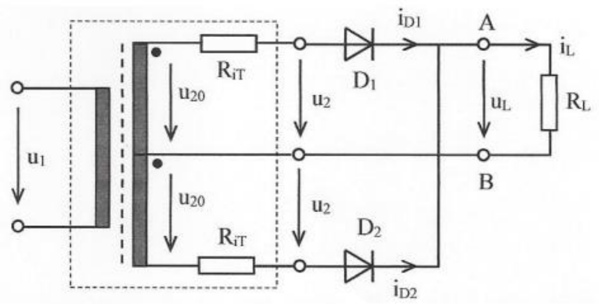
$\boxed{U_{L\,RMS} = U_{L\,eff} = \frac{\hat{u}_L}{2} \approx \frac{\hat{u}_{20}}{2}}$

mit Glättung:



- nur ein Nachladevorgang pro Sinusperiode
- große Kapazität erforderlich für kleine Welligkeit
- große Dioden- und Trafoverluste
- einseitige Transformator – Magnetisierung

Zweiweggleichrichter -Mittelpunktschaltung oder Zweipuls-Mittelschaltung auch M2-Schaltung:



n = 1

positive und negative Halbwelle wird genutzt

+ nur eine Diode im Strompfad → geringere Leistungsspannungsverluste
- zweite Sekundärwicklung am Transformator erforderlich

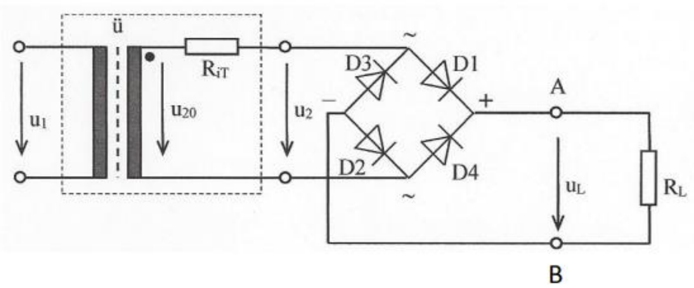
Arithmetischer Mittelwert der M2-Schaltung:

$\boxed{\bar{u}_L = 0{,}64\cdot\hat{u}_L}$

Effektiv-Spannung der M2 – Schaltung

$\boxed{U_{L\,RMS} = U_{L\,eff} = \frac{\hat{u}_L}{\sqrt{2}} \approx \frac{\hat{u}_{20}}{\sqrt{2}}}$

Brückengleichrichter (Zweipuls-Brückenschaltung) auch B2-Schaltung:



+ nur eine Sekundärwicklung

- 2 Dioden im Stromkreis = zweimal Verlustleistung

- kein gemeinsamer Bezugsleiter für Transformator und Last

Arithmetischer Mittelwert der B2-Schaltung:

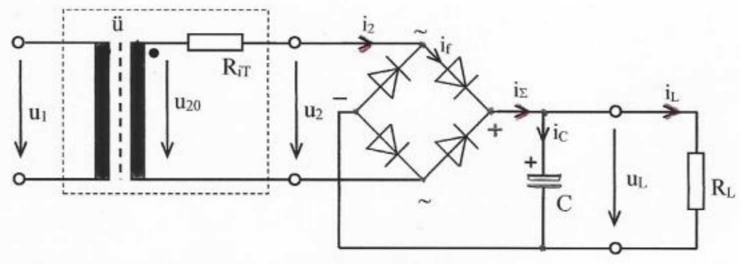
$$\bar{u}_L = 0{,}64 \cdot \hat{u}_L = U_{L\,eff} \cdot \sqrt{2} \cdot 0{,}64$$

Effektiv-Spannung der B2 – Schaltung

$$U_{L\,RMS} = U_{L\,eff} = \frac{\hat{u}_L}{\sqrt{2}} \approx \frac{\hat{u}_{20}}{\sqrt{2}}$$

n = 2

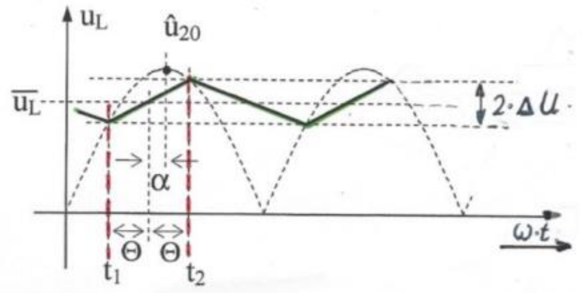
mit Glättung:



Genauere Betrachtung der Zweiweggleichrichter:

wenn: $\hat{u}_{20} < 20 \cdot n \cdot U_{F0}$ oder $R_L < 20 \cdot (R_{iT} + n \cdot r_f)$ → $\hat{u}_{20} - i_F \cdot R_{iT} - n(U_{F0} + i_F \cdot r_F) - i_F \cdot R_L = 0$

Stromflusszeit und Stromflusswinkel:



Welligkeit der Ausgangsspannung: $U_{SS} = \Delta U$

Stromflusszeit: $t_F = t_2 - t_1$

Stromflusswinkel: $2\theta = \omega \cdot t_F$ (in Bogenmaß)

Symmetrieverschiebung: α = Verschiebungswinkel zur Symmetrieachse

$\bar{u}_L$ = Mittelwert der Ausgangsspannung

Erforderliche Trafo-Sekundärspannung: $$U_{20\,RMS} = \frac{\overline{u_L} + n \cdot U_{T0}}{\sqrt{2} \cdot \cos(\Theta)}$$

mit $\bar{u}_L$ = Klemmenspannung an Ausgangsseite

U_{T0} = „U_{F0}" → Spannungsabfall Diode 0,7 V

Transformatorstrom i2: $i_2 = \hat{\imath}_2 \cdot cos(\omega' t)$

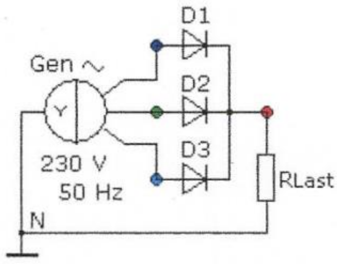
Scheitelwert $\hat{\imath}_2$: $$\hat{\imath}_2 = \frac{\pi^2}{4\theta} \cdot \overline{i_L}$$

Kapazität des Dämpfungskondensators: $$C_L = \frac{\bar{\imath}_l \cdot \left(\frac{T}{2} - t_F\right)}{\Delta U} = \frac{\bar{\imath}_l \cdot (\pi - 2\theta)}{\omega \cdot \Delta U} = \frac{\bar{\imath}_l \cdot \left(\frac{T}{2} - t_f\right)}{2 \cdot u_s}$$ achte auf Bogenmaß

mit $t_F = \frac{2 \cdot \theta \cdot T}{360°}$, $\bar{\imath}_l$ = Stromfluss zu Last, $\Delta U = u_{ss}$

Drehstrom Gleichrichtschaltung:

Ungesteuerte Dreipulsgleichrichtung – M3U



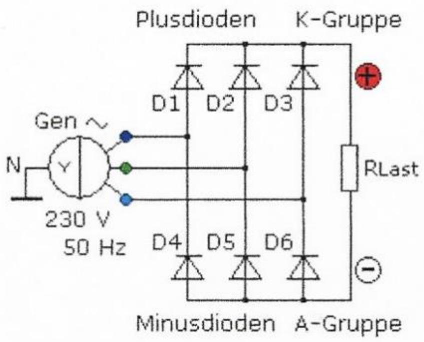
$$|\overline{u}| = \frac{1}{\frac{2}{3}\pi} \int_{30°}^{150°} \hat{u} \sin\varphi \, d\varphi$$

$$|\overline{u}| = \frac{3\hat{u}}{2\pi} [-(\cos 150° - \cos 30°]$$

$$|\overline{u}| = \frac{3\hat{u}}{2\pi} \left[-\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \hat{u}$$

$|\overline{u}| = 269 V$ Gleichrichtwert

Ungesteuerte Drehstrombrücke – B6U



$$|\overline{u}| = \frac{1}{\frac{1}{3}\pi} \int_{60°}^{120°} \sqrt{3}\, \hat{u} \sin\varphi$$

$$|\overline{u}| = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \hat{u} [-(\cos 120° - \cos 60°)]$$

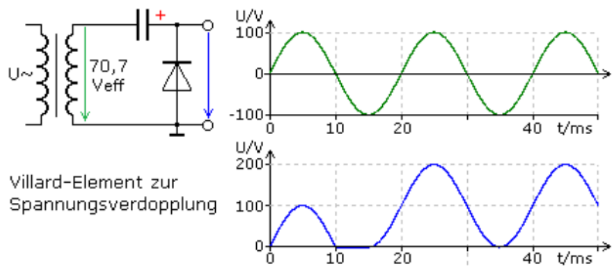
$$|\overline{u}| = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \hat{u} [-(-0{,}5 - 0{,}5)] = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \hat{u}$$

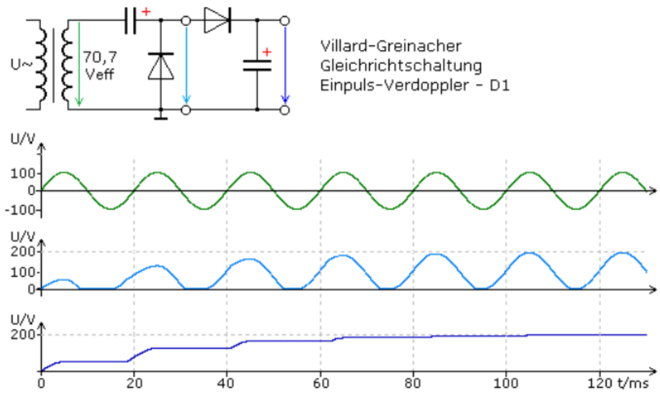
$\boxed{|\overline{u}| = 537{,}5 V}$ Gleichrichtwert

(Neutralleiter fließt kein Strom)

Spannungsvervielfachung mit Diodenschaltungen:

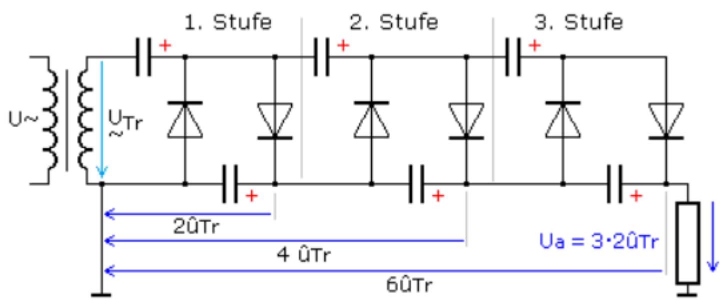
Einpuls-Spannungsverdoppler D1 nach Villard-Greinacher:





Positive Halbwelle → Diode sperrt → Negative Halbwelle → Diode Leitet → Kondensator links negativ aufladen → Kondensator rechts Masse → Ende Negative Halbwelle →Kondensator rechts auf Scheitelwert der Wechselspannung positiv aufgeladen → positive Halbwelle → Diode Sperrt → Kondensator kann nicht entladen → Spannung verschoben

Einpuls-Spannungsvervielfacher – Hochspannungskaskade:

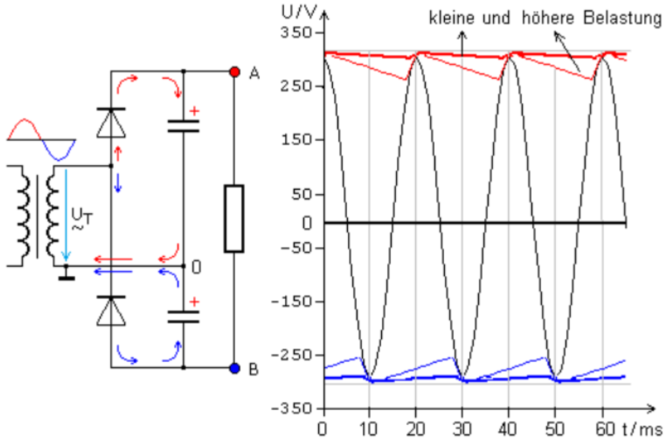


Der Diodenstrom erhöht sich mit der Stufenzahl n

Eingangsstrom: $\boxed{i_e = n \cdot i_a}$

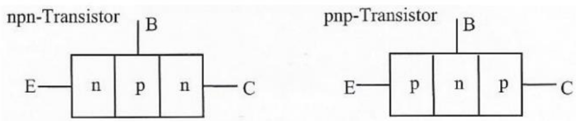
Ausgangsspannung: $\boxed{U_a = 2 \cdot U_e \cdot n}$

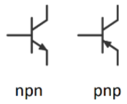
Zweipuls-Spannungsverdoppler D2 – Delon-Schaltung



Der bipolar Transistor:

Aufbau:



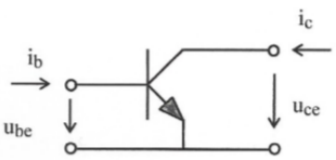


Emitter: hochdotiert, Basis: schwachdotiert und sehr dünn, Kollektor: mitteldotiert → Stromverstärkung funktioniert

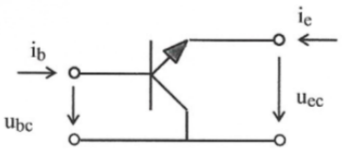
Knotengleichung: $\boxed{I_E + I_B + I_C = 0}$ **Maschengleichung:** $\boxed{U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}}$

Sperrstrom verdoppelt sich pro 10K

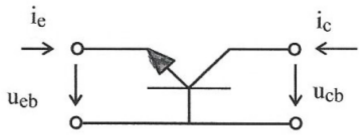
Leistung vom Transistor: $\boxed{P_{transistor} = U_{CE} \cdot I_C}$ **Temperatur:** $\boxed{\vartheta_J = \vartheta_u + \vartheta_{tran} = \vartheta_u + (r_{th} \cdot P_{transistor})}$



Emitterschaltung



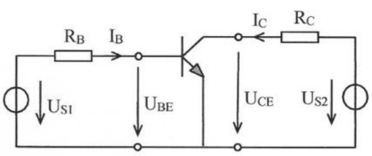
Kollektorschaltung



Basisschaltung

Early-Effekt: Einfluss von U_{CB} auf I_C , da U_{CB} Einfluss auf W_S von Kollektor-pn-Übergang und damit auf W_B

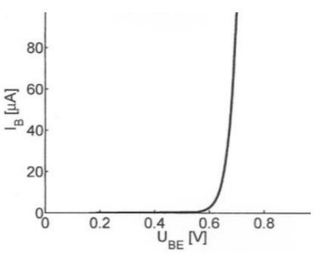
Emitterschaltung: (Ein und Ausgang über Emitterverbunden, auf Masse) (Ausgang am Kollektor)



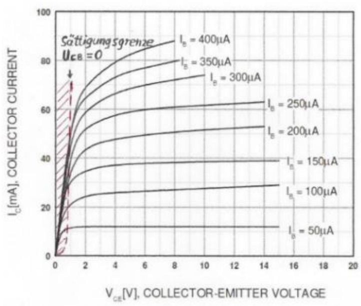
Eingangsstrom I_B Ausgangsstrom I_C

$\boxed{\text{Gleichstromverstärkung } B = \frac{I_C}{I_B}}$

Eingangskennlinie: $I_B = f(U_{BE})$ ungefähr Basis-Emitter Diode

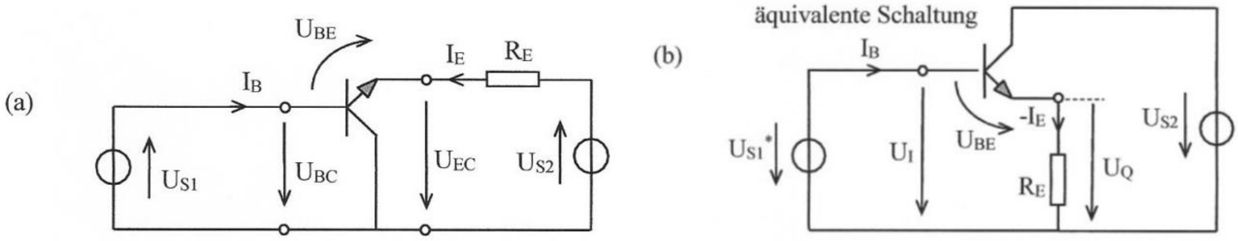


Ausgangskennlinie:



Sättigungsbetrieb: ($U_{CE} < U_{BE}$) → $U_{CB} < 0$ → Minoritätsträger werden aus Basis n.volls. abgesaugt → I_C sinkt, **Sättigungsgrenze:** $U_{CB} = 0$

Kollektorschaltung: (Eingang an Basis) (Ausgang beim Emitter) (Kollektor an Betrieb Spannung)

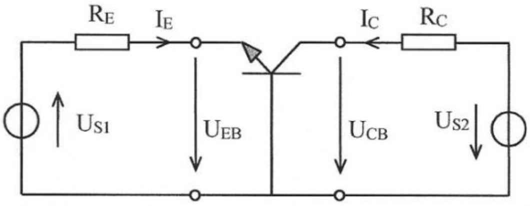


Eingangsstrom I_B Ausgangsstrom I_E

Kennlinien: Wie in Emitter Schaltung

Stromverstärkung: $\boxed{B+1}$ ***Spannungsverstärkung:*** $\boxed{A_U \approx 1}$

Basisschaltung: (Eingang am Emitter) (Ausgang am Kollektor) (Basis auf Masse)

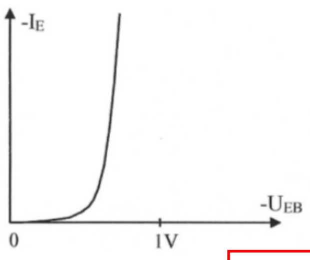


Eingangsstrom I_E Ausgangsstrom I_C

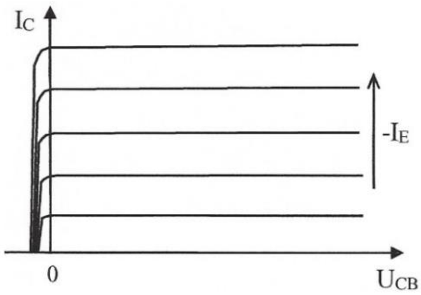
Eingangsspannung U_{EB} Ausgangsspannung U_{CB}

U_{EB} verändern → I_E stark verändert → I_C stark verändert →Spannungs-abfalländerung an R_C groß → U_{CB} Ausgangsspannung stark verändert

Eingangskennlinie:

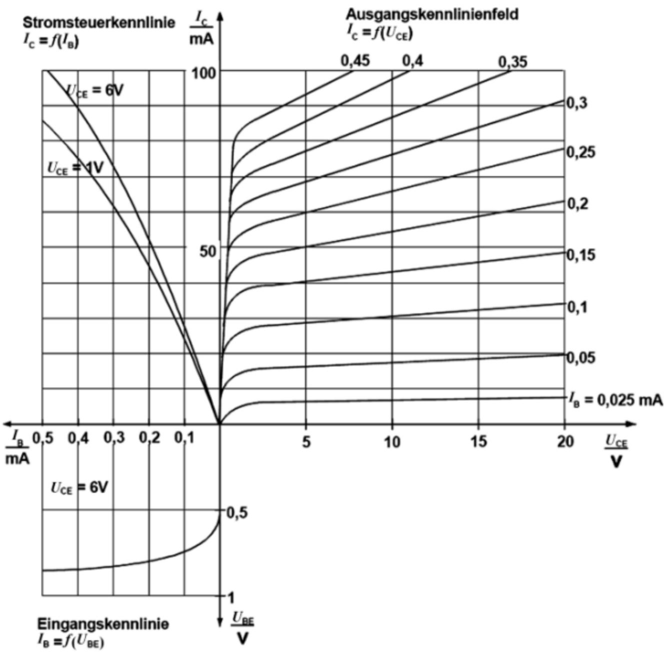


Ausgangskennlinie:

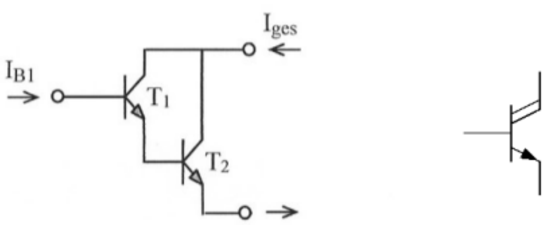


Stromverstärkung: $\boxed{\mathrm{A} \approx \frac{B}{B+1} \approx 1}$

Kennlinien in Vierquadranten-Darstellung



Darlington- oder Super-Beta-Schaltung



Stromverstärkung multipliziert sich:

$$\boxed{\begin{array}{c}\text{Es gilt näherungsweise } B_{ges} \approx B_1 \cdot B_2 \\ \text{und analog für Wechselsignale } \beta_{ges} \approx \beta_1 \cdot \beta_2\end{array}}$$

Arbeitspunkt des Bipolar-Transistor:

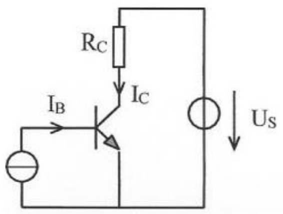
Einstellen des Arbeitspunktes: (U_{CE} und I_C)

1. Einprägung des Basisstromes:

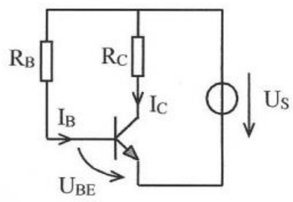
Widerstand R_C: $R_C = \frac{U_S - U_{CE}}{I_C}$

Widerstand R_B: $R_B = \frac{U_S - U_{BE}}{I_B}$

Kollektorstrom: $I_C \approx I_B \cdot B = \frac{U_S - U_{BE}}{R_B} \cdot B$



a): prinzipiell



b): technische Näherung durch Basis-Vorwiderstand R_B

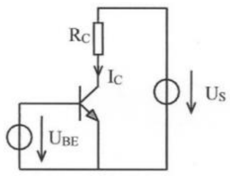
Kollektorspannung: $U_{CE} = U_s - U_{R_C} = U_s - (R_C \cdot I_C)$

2. Einprägung der Basis-Emitter-Spannung:

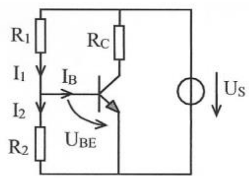
$$U_{BE} = U_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_B \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = \frac{U_S - U_{BE}}{I_1} = \frac{U_S - U_{BE}}{I_2 + I_B}$$

$$R_2 = \frac{U_{BE}}{I_2}$$

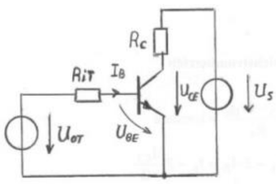


a): Prinzip



b): technische Näherung durch (Spannungsteiler)

=>

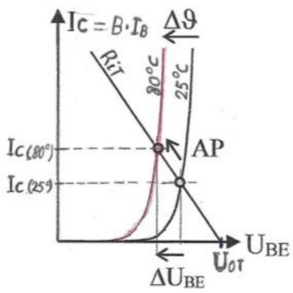


c): Ersatzschaltung

Ersatzschaltung dient zum Herleiten der obigen Formeln

I_C ergibt sich aus Spannungssteuerkennlinie $I_C = f(U_{BE})$

Einstellen der U_{CE} $R_C = \frac{U_S - U_{CE}}{I_C}$

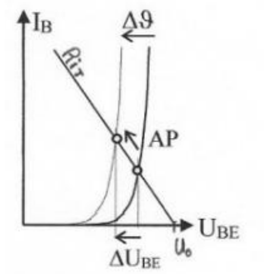


Stabilisierung des Arbeitspunktes:

Einflussgrößen auf AP-Verschiebung:

1. Temperaturabhängigkeit der U_{BE} (ΔU_{BE}-Effekt) (sinkt bei steigender Temperatur)

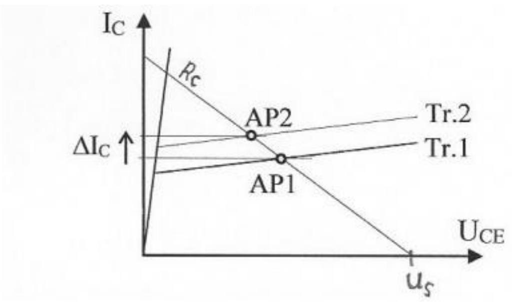
Bei Silizium-npn-Transistoren: $D_{\vartheta_{U_{BE}}} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial \vartheta} \approx -2 \frac{mV}{K}$



2. Änderung der Stromverstärkung B (ΔB-Effekt)

Ursache: Alterung oder Temperaturveränderung

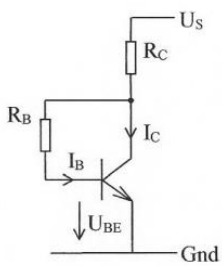
$$\frac{B_{max}}{B_{min}} \approx 1{,}8 \dots \dots 2{,}6$$



Gegenkopplungsmaßnahmen zur Arbeitspunkt-Stabilisierung:

Basisstrom-Einprägung mit Spannungsgegenkopplung (Parallelgegenkopplung)

$R_B = \frac{U_{CE} - U_{BE}}{I_B}$ $R_C = \frac{U_S - U_{CE}}{I_C + I_B}$ $I_C \approx B \cdot \frac{(U_S - U_{BE})}{R_B + B \cdot R_C}$

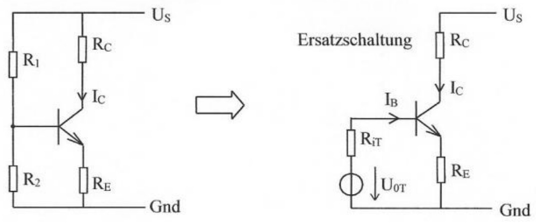


Steigt I_C um ΔI_C **infolge ΔB-Effekt** → U_{CE} sinkt → R_B am Kollektorpotential → I_B sinkt → I_C wieder reduziert

Basis-Spannungseinprägung mit Strom-Gegenkopplung (Reihengegenkopplung)

$$R_E = \frac{U_{RE}}{-I_E} \approx \frac{U_{R_E}}{I_C} \qquad \text{Gl. 10.9} \qquad R_C = \frac{U_S - U_{CE} - U_{R_E}}{I_C} \qquad \text{Gl. 10.10}$$

$$R_1 = \frac{U_S - U_{BE} - U_{R_E}}{I_{R_2} + I_B} \qquad \text{Gl. 10.11} \qquad R_2 = \frac{U_{BE} + U_{R_E}}{I_{R_2}} \qquad \text{Gl. 10.12}$$

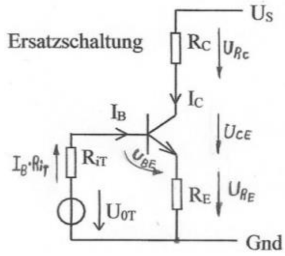


$$\boxed{U_{CE} = U_S - (I_C \cdot R_C) - (I_C \cdot R_E)}$$

Steigt I_C um ΔI_C infolge ΔU_{BE} -Effekt → Spannungsabfall U_{Re} erhöht → U_{0T} const → I_B kleiner → B-Kopplung → I_c kleiner

AP einer bereits dimensionierten Schaltung berechnen:

$$\boxed{U_{0T} = U_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad mit \;\; R_{iT} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \qquad I_C \approx B \cdot \frac{U_{0T} - U_{BE}}{R_{iT} + B \cdot R_E}}$$



Für B >> 1 → $I_E \approx I_C$

Verfahren zur Berechnung von Abweichungen des Arbeitspunktes

$\Delta I_C = f\,(\Delta U_{BE}, \Delta I_{CB0}, \Delta B, \Delta U_S, \Delta R_x)$

Berechnung von Abweichungen des Arbeitspunktes einer gegebenen Schaltung:

für ΔU_{BE} -Effekt:

$\boxed{\Delta I_C \approx \frac{B}{R_{iT} + B} \cdot 2\frac{mV}{K} \cdot \frac{\Delta\vartheta}{R_E}}$ Bzw. wenn R_{iT} vernb. $\boxed{\Delta I_C \approx \frac{2mV}{K} \cdot \frac{\Delta\vartheta}{R_E}}$ Ergebnis mit Präfix m, für $I_{C\,neu}$ weitere Rechnung

Für ΔB-Effekt:

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{R_{iT}}{R_E} \cdot \frac{B_{max} - B_{min}}{B^2} \qquad mit\; R_{iT} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} \cdot \frac{B_{max} - B_{min}}{B^2 \cdot R_E}$$

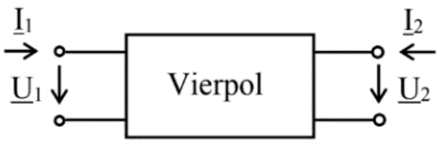
Bzw. wenn R_{iT} vernb. $\boxed{\Delta I_C \approx \frac{2mV}{K} \cdot \frac{\Delta\vartheta}{R_E}}$

Stabilisierung des Arbeitspunktes bei der Schaltungsdimensionierung:

Dimensionierung des Emitterwiderstand R_E $\boxed{R_E \geq \frac{2mV}{K} \cdot \frac{\Delta\vartheta}{\Delta I_C}}$

Dimensionierung des Spannungsteilers R_1, R_2 $\boxed{R_{iT} \leq \frac{\Delta I_C}{I_C} \cdot R_E \cdot \frac{(B_{typ})^2}{B_{max} - B_{min}}}$ mit $R_{iT} = R_1 \,//\, R_2$

Vierpoltheorie:



Kleinsignal-Stromverstärkung: $h_{fe} = h_{21e} = \beta \approx \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$

Eingangsimpedanz: $h_{ie} = h_{11e} = r_{be} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

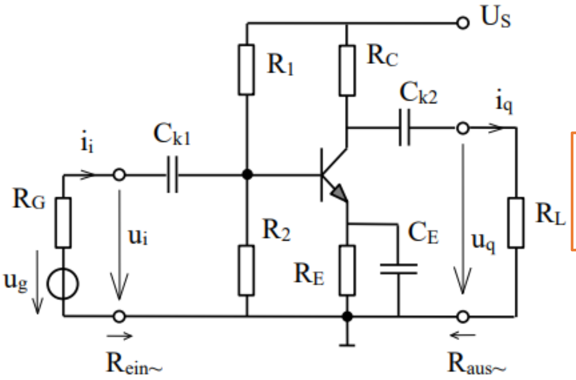
Ausgangsadmittanz: $h_{oe} = h_{22e} = \frac{1}{r_{ce}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}}$

Vierpolgleichungen mit H-Parametern (Hybrid-Parameter)	$\underline{U}_1 = \underline{H}_{11} \cdot \underline{I}_1 + \underline{H}_{12} \cdot \underline{U}_2$ $\underline{I}_2 = \underline{H}_{21} \cdot \underline{I}_1 + \underline{H}_{22} \cdot \underline{U}_2$

Übertragungsverhältnis der Gegenspannung: $h_{re} = h_{12e}$ vernachlässigbar

$$\boxed{h_{xy_{e/AP}} = H_{eI} \cdot H_{eU} \cdot h_{platzhalter}}$$

Wechselspannungsverstärker in Emitter Schaltung:



Eingangswiderstand

$$R_{ein\sim} = R_1 // R_2 // r_{be} = R_{iT} // r_{be}$$

Leerlauf-Spannungsverstärkung

$$V_{u0} = \frac{u_{q0}}{u_i} = \frac{-i_b \cdot \beta \cdot R_{aus\sim}}{i_b \cdot r_{be}} = -\beta \cdot \frac{R_{aus\sim}}{r_{be}}$$

Ausgangswiderstand

$$R_{aus\sim} = r_{ce} // R_C$$

Stromverstärkung (Ausgang belastet mit $R_L = 12\ k\Omega$)

$$V_i = \frac{i_q}{i_i} = \frac{u_q/R_L}{u_i/R_{ein\sim}} = V_u \cdot \frac{R_{ein\sim}}{R_L} = V_{u0} \cdot \frac{R_{ein\sim}}{R_{aus\sim} + R_L}$$

Spannungsverstärkung (Ausgang

$$V_u = \frac{u_q}{u_i} = V_{u0} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{aus\sim}}$$

Leistungsverstärkung (Ausgar

$$V_p = \frac{p_q}{p_i} = \frac{u_q \cdot i_q}{u_i \cdot i_i} = V_u \cdot V_i$$

$$V_{u0} = \frac{-\beta \cdot r_{ce} \cdot [(R_{E\sim} + r_{ce})//R_C]}{(R_{E\sim} + r_{ce}) \cdot [(\beta+1) \cdot R_{E\sim} + r_{be}]}$$

Mit $r_{ce} >> R_{E\sim}$ und $r_{ce} >> R_C$ wird daraus

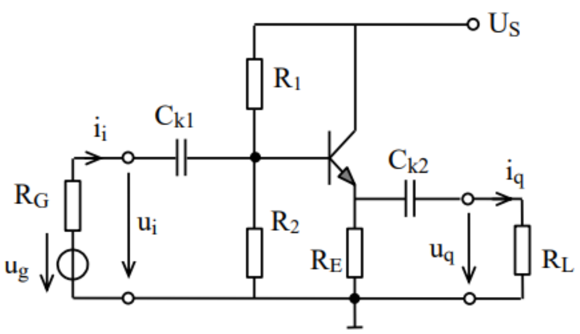
$$V_{u0} \approx \frac{-\beta \cdot R_C}{(\beta+1) \cdot R_{E\sim} + r_{be}}$$

Gilt auch $r_{be} << (\beta+1) \cdot R_{E\sim}$, so ergibt sich

$$V_{u0} \approx -\frac{R_C}{R_{E\sim}}$$

Transitfrequenz: die Frequenz wo Verstärkung auf 1 abfällt

Wechselspannungsverstärker in Kollektorschaltung:



$$R_{ein\sim} = R_1 // R_2 // [r_{be} + (\beta+1) \cdot (R_E // R_L // r_{ce})]$$

$$R_{aus\sim} = R_E // r_{ce} // \left[\frac{r_{be} + (R_G // R_1 // R_2)}{\beta + 1}\right]$$

$$V_{u0} = \frac{(\beta+1) \cdot (r_{ce}//R_E)}{r_{be} + (\beta+1) \cdot (r_{ce}//R_E)} = \frac{(r_{ce}//R_E)}{r_{eb} + (r_{ce}//R_E)}$$

$$V_u = V_{u0} \cdot \frac{R_L}{R_{aus\sim} + R_L}$$

	Emitterschaltung	**Kollektorschaltung[18]**	**Basisschaltung**
$R_{ein\sim}$	mittel 7 kΩ	groß (100 kΩ) 17 kΩ	klein 50 Ω
$R_{aus\sim}$	mittel 10 kΩ	klein (10 Ω) 10 Ω	mittel 10 kΩ
V_{u0}	groß 170	≤ 1 (0,99) 0,993	groß 180
V_i	mittel / groß 50	mittel / (groß) (90) 17	≤ 1 0,5
V_p	sehr groß 5000	mittel / (groß) (90) 16	mittel 40
φ (u_q)	180°	0°	0°

Legende für Formelzeichen:

n_0	Konzentration negativer Ladungsträger (Elektronen)
p_0	Konzentration positiver Ladungsträger (Löcher)
n_i	Gleichgewichtkonzentration, Ladungsträgerdichte, Intrinsic-Zahl
W_G	ΔE zwischen Valenz und Leitungsband → Bandabstand
W_C	Leitband-Kante
W_V	Valenzband-Kante
W_F	Fermi-Niveau (Fermi-Kante)
W_D	Energie-Niveau der Störterme
W_s	Sperrschichtweite
W_{vac}	Vakuumenergie
W_M	Austrittsarbeit
T_j	Sperrschichttemperatur
T_u	Umgebungstemperatur
u_1	primärseitige Klemmenspannung des Trafos
u_{20}	sekundärseitige Leerlaufspannung des Trafos
u_2	sekundärseitige Klemmenspannung des Trafos
R_{iT}	Ersatzwiderstand für Wicklungswiderstand
ü	Übersetzungsverhältnis

μ	Ladungsträger-Beweglichkeit
N_C	Effektive Zustandsdichte vom Leitungsband
N_V	Effektive Zustandsdichte vom Valenzband
$N_D{}^+$	Konzentration der ionisierten Donatoren
$N_A{}^-$	Konzentration der ionisierten Akzeptoren
n_{n0}	Konzentration der Elektronen im n-Halbleiter
p_{n0}	Konzentration der Löcher in n-Halbleiter
n_{p0}	Konzentration der Elektronen im p-Halbleiter
p_{p0}	Konzentration der Löcher im p-Halbleiter
κ	Leitfähigkeit
U_R	Sperrspannung
U_D	Diffusionspannung
U	Anliegende äußere Spannung
U_T	Temperaturspannung
I_s	Sperrsättigungsstrom

Konstanten: pn-Übergang Temperatur Energiebändermodell Leitfähigkeit

k	Bolzman-Konstante	$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$
e	Elementarladung	$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As
K	Kelvin	°C +273,15 = K
?	Temperaturdurc??	-2 mV/K
U_{BE}	Basis-Emitter-Spng.	0,7V
W_G	Bei Silizium	1,12eV= $1{,}12 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Ws

Dichte n_n Metall	$5 \cdot 10^{21}$ cm^{-3} < n_n < $5 \cdot 10^{22}$ cm^{-3}

Merkhilfen für Umrechnungen				
K	Kelvin	°C +273,15 = K		

10^{24}	Yotta	Y
10^{21}	Zetta	Z
10^{18}	Exa	E
10^{15}	Peta	P
10^{12}	Tera	T
10^{9}	Giga	G
10^{6}	Mega	M
10^{3}	Kilo	k
10^{2}	Hekto	h
10^{1}	Deka	da

Komma nach links → 10^1

10^{-1}	Dezi	d
10^{-2}	Zenti	c
10^{-3}	Milli	m
10^{-6}	Mikro	µ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Piko	p
10^{-15}	Femto	f
10^{-18}	Atto	a
10^{-21}	Zepto	z
10^{-24}	Yokto	Y

Komma nach rechts → 10^{-1}

$$\frac{x}{2\pi} = \frac{\alpha}{360°}$$