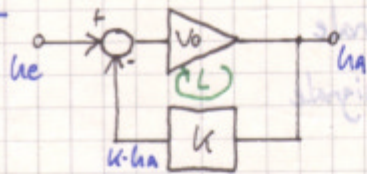


Formelsammlung Schaltungstechnik

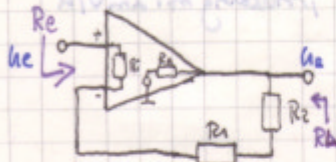
OPV:



$$V = \frac{u_a}{u_e} = \frac{V_o}{1 + K \cdot V_o} = \frac{V_o}{1 + L}$$

$V_o \hat{=}$ Leerlaufverstärkung
 $V \hat{=}$ resultierende Verstärkung (beschaltet)
 $L \hat{=}$ Schleifenverstärkung

Für $K \cdot V_o \gg 1$ gilt: $V = \frac{1}{K}$

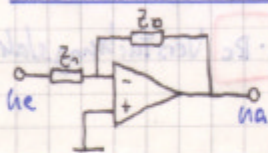


$$R_e = \frac{u_e}{i_e} = R_i (1 + L) \approx R_i \cdot L$$

$$R_L = \frac{R_a}{1 + L}$$

mit $(1 + L)$ Verbesserungsfaktor

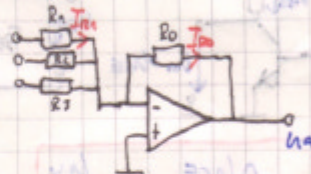
Invertierender OPV: (ideal)



$$V = \frac{u_a}{u_e} = -\frac{Z_0}{Z_1}$$

$$L = \frac{1}{L}$$

Summiererschaltung



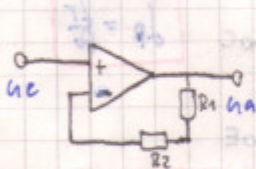
$$u_a = -I_{er} \cdot R_0$$

$$I_{er} = \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3}$$

$$u_a = -R_0 \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} \right)$$

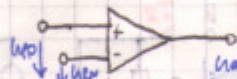
$L \hat{=}$ relativ. Rechenfehler

Nichtinvertierender OPV:



$$V = \frac{u_a}{u_e} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Differenzverstärker:



$$V_p = \frac{u_a}{u_{ep}} \bigg|_{u_{en}=0}$$

$$V_n = \frac{u_a}{u_{en}} \bigg|_{u_{ep}=0}$$

$$u_a = V_D \cdot (u_{ep} - u_{en})$$

$V_D \hat{=}$ Differenzverstärkung

$$\rightarrow V_D = V_n = V_p \text{ Sollbedingung}$$

Gleichtaktspannung:

$$u_D = u_{ep} - u_{en}$$

$u_D \hat{=}$ Differenzspannung

$$u_{GL} = \frac{u_{ep} - u_{en}}{2}$$

$u_{GL} \hat{=}$ Gleichtaktspannung

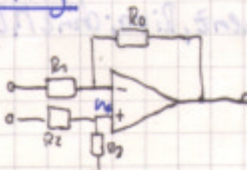
$$\rightarrow u_a = V_D \cdot u_D + u_{GL} \cdot u_{GL}$$

$$CMRR = 20 \log G$$

$$\frac{V_D}{V_{GL}} = G =$$

Gleichtaktunterdrückung

Realisierung:



$$u_+ = u_{ep} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = u_{ep} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}}$$

$$V_p = \frac{u_a}{u_+} \cdot \frac{u_+}{u_{ep}} = \frac{1 + \frac{R_0}{R_2}}{1 + \frac{R_3}{R_2}}$$

$$V_n = \frac{R_0}{R_1}$$

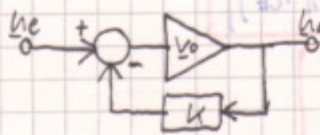
$$\frac{V_p}{V_n} = V_D$$

mit $V_p = V_n$:

$$\rightarrow \frac{R_1}{R_0} = \frac{R_2}{R_3}$$

$$V_D = \frac{R_0}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

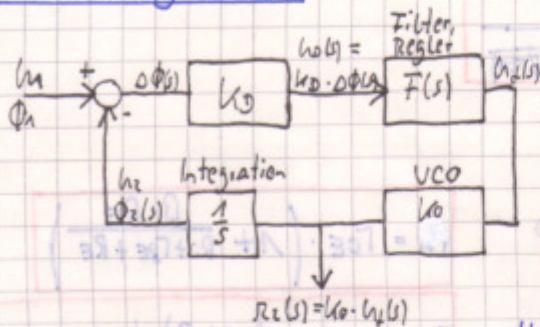
Frequenzgang und Stabilität am realen OPV



$$\underline{V} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{V_o}{1 + K \cdot V_o} = \frac{V_o}{1 + L}$$

$$VBP = V_{ideal} \cdot \omega_g \quad \text{Verstärkungs-Bandbreite-Produkt}$$

PLL-Phasenregelkreis:



$$[K_0] = \frac{\text{rad/s}}{V}, [K_D] = \frac{V}{\text{rad}}$$

$$H_T(s) = \frac{\phi_a(s)}{\phi_n(s)} = \frac{K_D \cdot F(s) \cdot K_0 \cdot \frac{1}{s}}{1 + K_D \cdot F(s) \cdot K_0 \cdot \frac{1}{s}}$$

$$H_e(s) = \frac{\Delta \phi(s)}{\phi_n(s)} = \frac{1}{1 + K_D \cdot F(s) \cdot K_0 \cdot \frac{1}{s}}$$

$$R_e(s) = K_0 \cdot u_z(s)$$

$H_T(s) \hat{=}$ Führungsübertragungs Lkt.

$H_e(s) \hat{=}$ Reglabweichungsübertragungs Lkt.

mit PI-Regler:

$$F(s) = \frac{1 + s \cdot T_2}{s \cdot T_1}, \quad T_1 = R_1 \cdot C, \quad T_2 = R_2 \cdot C$$

$$H_T(s) = \frac{K_0 \cdot K_D \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1 + s \cdot T_2}{s \cdot T_1}}{1 + K_0 \cdot K_D \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1 + s \cdot T_2}{s \cdot T_1}} = \frac{1 + 2 \cdot D \cdot \frac{s}{\omega_N}}{\frac{s^2}{\omega_N^2} + 2 \cdot D \cdot \frac{s}{\omega_N} + 1}$$

$$\omega_N = \sqrt{\frac{K_0 \cdot K_D}{T_1}}$$

$$H_e(s) = \frac{\Delta \phi(s)}{\phi_n(s)} = \frac{\frac{s^2}{\omega_N^2}}{\frac{s^2}{\omega_N^2} + 2 \cdot D \cdot \frac{s}{\omega_N} + 1}$$



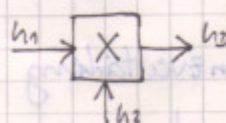
$$D = \frac{T_2 \cdot \omega_N}{2}$$

$$D^2 = \frac{K_0 \cdot K_D}{N \cdot T_1} \cdot \frac{T_2^2}{4}$$

Wenn noch T2er dabei sind!!!

Phasendetektoren (PD)

1. analoge PD's: z.B.: Analogmultiplizierer (u_1 und u_2 liegen als analoge Größe vor)



$$\underline{u_D} = \frac{u_1(t) \cdot u_2(t)}{u_n} = \frac{\hat{u}_1 + \hat{u}_2}{2 \cdot u_n} \cdot \cos \Delta \varphi = \frac{\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2}{2 \cdot u_n} \cdot \sin(90^\circ + \Delta \varphi)$$

$$u_D = \frac{\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2}{2 \cdot u_n} \cdot \sin \Delta \varphi = \pm \frac{\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2}{2 \cdot u_n} \quad \text{eingeschwungener Zustand bei Regler mit I-Anteil}$$

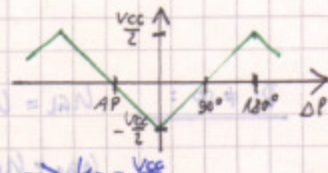
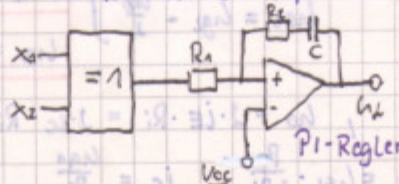
$$u_D = F(s) \cdot \frac{\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2}{2 \cdot u_n} \quad \text{in Umgebung der Arbeitspunkte}$$

2. digitale PD's: z.B.: Digitalmultiplizierer mit EXOR (u_1 und u_2 sind Digitalsignale)

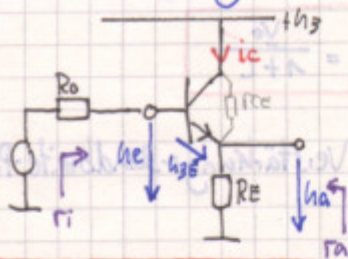
x_1	x_2	y
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	1

$$y = -x_1 \cdot x_2$$

x_1, x_2 : Rechteck, Tastverhältnis 50% ($t_i = t_p$) } $\bar{y} = 0$
 x_2 : $u_n \neq 90^\circ$ außer Phase



Kollektorschaltung:



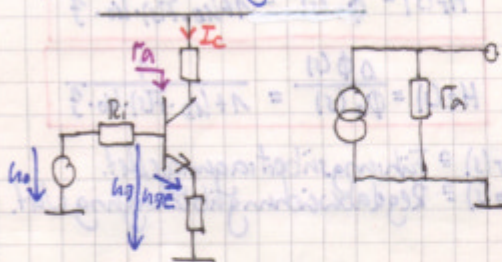
$$R_i = r_{BE} \cdot \left(1 + s \cdot (R_E \parallel r_{CE}) \right)$$

$$R_a = R_E \parallel \left(\frac{1}{s} + \frac{R_0}{\beta} \right)$$

$$u_a = i_E \cdot (R_E \parallel r_{CE}) = u_{BE} \cdot s \cdot (R_E \parallel r_{CE})$$

$$V = \frac{u_a}{u_{BE}} = \frac{s \cdot (R_E \parallel r_{CE})}{1 + s \cdot (R_E \parallel r_{CE})} = \frac{1}{1 + \frac{1}{s \cdot (R_E \parallel r_{CE})}}$$

Stromquellenschaltung:



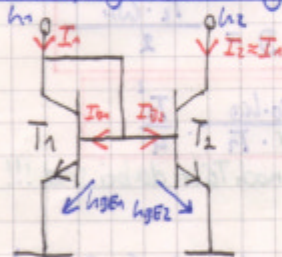
$$R_a = r_{CE} \cdot \left(1 + \frac{\beta \cdot R_E}{R_i + r_{BE} + R_E} \right)$$

$$R_{a \max} = r_{CE} \cdot (1 + \beta) \text{ bei } R_E \gg R_i + r_{BE}$$

$$I_C = \frac{u_{BE} - u_{BE}}{R_E}$$

Ri als Spannungsteiler: $\Rightarrow R_i = R_i \parallel R_E$

Stromspiegelschaltung: (identische Transistoren)



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta}}$$

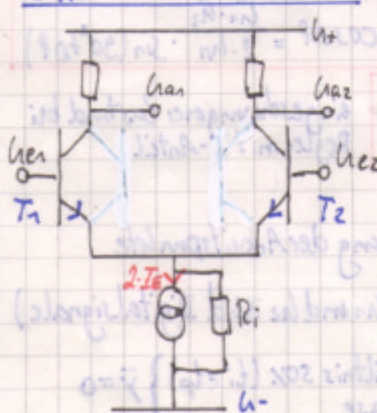
$$I_1 = I_2 = I_C$$

Kleinsignale:

$$r_e = \frac{1}{s} \parallel \frac{1}{2} r_{BE} \text{ Eingangswiderstand}$$

$$R_a = \frac{u_{CE}}{i_C} = r_{CE} \text{ Ausgangswiderstand}$$

Differenzverstärker:



$$V_D = \frac{-s \cdot R_E \parallel r_{CE}}{2} \text{ Differenzverstärkung}$$

$R_i \rightarrow \infty$: symmetrische Spannungsaussteuerung am

Eingang: $u_{E1} = -u_{E2}$

$$\rightarrow u_{A1} = -u_{BE1} \cdot s \cdot R_C = -\frac{1}{2} (u_{E1} - u_{E2}) \cdot s \cdot R_C$$

$$u_{A2} = -u_{BE2} \cdot s \cdot R_C = +\frac{1}{2} (u_{E1} - u_{E2}) \cdot s \cdot R_C$$

$$\left. \begin{aligned} u_{E1} &= u_{gl} + \frac{u_D}{2} \\ u_{E2} &= u_{gl} - \frac{u_D}{2} \end{aligned} \right\}$$

$$u_{A1} = \frac{u_{E1} + u_{E2}}{2}$$

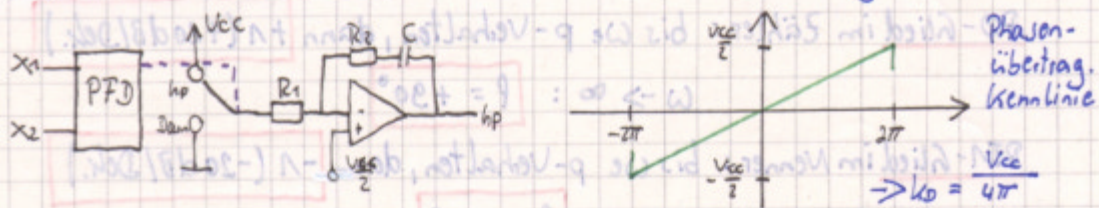
$$u_D = u_{E1} - u_{E2}$$

$$R_i \neq \infty: u_{A1} = u_0, u_0 = 2 \cdot i_E \cdot R_i = 2 \cdot i_C \cdot R_i$$

$$u_{A1} = u_{A2} = u_{A1} \cdot \frac{R_C}{s \cdot D} \quad i_C = \frac{u_{A1}}{R_C}$$

$$CMRR = \frac{V_D}{V_{A1}} \text{ "Gütemaß"}$$

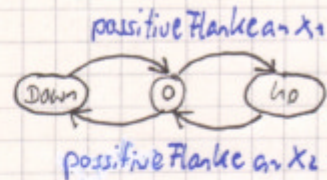
Phasenfrequenz-Detektor (PFD) : mit flankensensitive FF-Schaltung



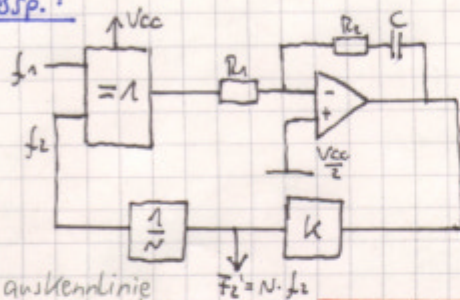
$R_1 > R_2$: mehr R_1 -Flanken als R_2 $\rightarrow$ Up-Zustand

$R_1 < R_2$: mehr R_2 -Flanken als R_1 $\rightarrow$ Down-Zustand

$R_1 = R_2$: keine Änderung $\rightarrow$ "0"-Zustand



Bsp.:



$L_1 \hat{=}$ einstellbar, F_1 : Fertfrequenz, möglichst groß

$\omega_N \hat{=}$ Bereich vorgegeben : $\omega_{Nmin} \dots \omega_{Nmax}$

$D \hat{=}$ $\geq 0,7$ (nahe an 0,7)

aus VCO-Kennlinie : $\frac{dL}{d\omega_N}$ Diminier ω_N minimal

$$k_0 = 2\pi \left(\frac{dL}{d\omega_N} \right) \left[\frac{\text{rad}}{\text{Vs}} \right]$$

$$k_0 = \frac{V_{cc}}{\pi} \left[\frac{\text{V}}{\text{rad}} \right]$$

$$\omega_N^2 = \frac{k_0 \cdot k_D}{N \cdot T_1}$$

$$D = \frac{\omega_N \cdot T_2}{2}$$

$$T_1 = \frac{k_0 \cdot k_D}{N \cdot \omega_N^2}$$

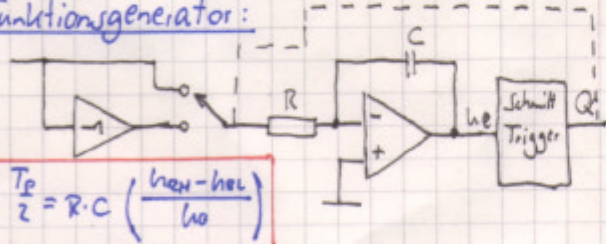
$$T_2 = \frac{2D}{\omega_N}$$

T_1 und T_2 für kleinstes D und größtem N wählen
 $N \hat{=}$ muß ganzzahlig sein } $F_1 = (100, 110, \dots) \text{ kHz}$
 $L_1 \hat{=}$ Multiplikator } $\rightarrow L_1 = 10 \text{ kHz}, N = 1; 2; 3; 4; 5$

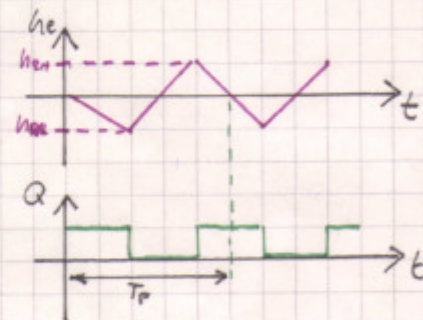
mit : $T_1 = R_1 \cdot C$
 $T_2 = R_2 \cdot C$

Coder R vorgeben, anderes ausrechnen
 ($R \rightarrow 1 \text{ kHz}$, damit I klein)

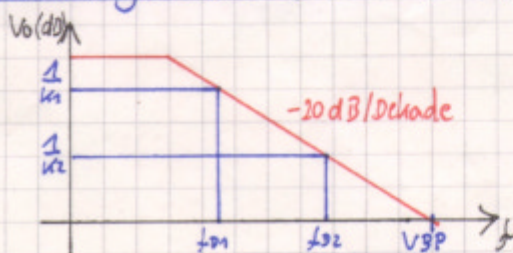
Funktionsgenerator:



$$T_P = R \cdot C \left(\frac{V_{H1} - V_{H2}}{V_{H1}} \right)$$



Verstärkungsbandbreiteprodukt (VBP)



$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{k_1} \cdot f_{01} &= \text{const.} \\ \frac{1}{k_2} \cdot f_{02} &= \text{const.} \end{aligned} \right\} \text{VBP}$$

k ist von der externen Beschaltung abhängig

invertierende Schaltung:

$$k_g = k_0 = \frac{VBP}{V_{id1} \cdot T_1}$$

nichtinvertierende Schaltung:

$$k_g = k_0 = \frac{VBP}{V_{id1}}$$

Zu OPV: (Bode-Diagramm)

PD-Glied im Zähler: bis we p-Verhalten, dann $+1$ ($+20 \text{ dB/Dek.}$)

$\omega \rightarrow \infty$: $\varphi = +90^\circ$

PT1-Glied im Nenner: bis we p-Verhalten, dann -1 (-20 dB/Dek.)

$\omega \rightarrow \infty$: $\varphi = -90^\circ$

Boolesche Algebra:

$$X = X \cdot X$$

$$0 = X \cdot X'$$

$$1 = X + X'$$

$$(X_1 + X_2 + X_3)' = X_1' \cdot X_2' \cdot X_3'$$

$$X = X''$$

$$0 = X \cdot 0$$

$$1 = X + 1$$

$$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 = (X_1' + X_2' + X_3)'$$

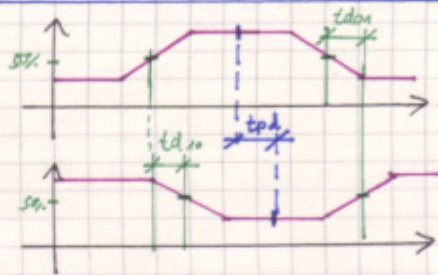
$$X = X \cdot 1$$

$$X = X + 0$$

Gray-Code:

G_3	G_2	G_1	G_0	Zustände Dek.
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	1	2
0	0	1	0	3
0	1	1	0	4
0	1	1	1	5
0	1	0	1	6
0	1	0	0	7
1	1	0	0	8
1	1	0	1	9
1	1	1	1	10
1	1	1	0	11
1	0	1	0	12
1	0	1	1	13
1	0	0	1	14
1	0	0	0	15

Zeit in kombinatorischen Netzen:



t_{don} $\hat{=}$ Verzögerungszeit steigende Flanke

t_{dlro} $\hat{=}$ " fallende Flanke

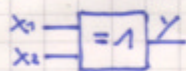
t_{pd} $\hat{=}$ Laufzeit

$$t_{pd} = \frac{t_{don} + t_{dlro}}{2} \approx \tau$$

Anstwertabelle für FF:

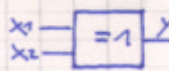
S	R	J	K	D	T	Q_i	Q_{i+1}	Bemerkung
0	X	0	X	0	0	0	0	nichtsetzen
1	0	1	X	1	1	0	1	setzen
0	1	X	1	0	1	1	0	rücksetzen
X	0	X	0	1	0	1	1	nicht löschen

Antivalenz (EXOR):



x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Äquivalenz:



x_1	x_2	y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

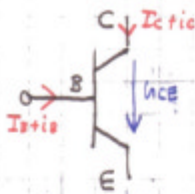
$$y = (x_1' \cdot x_2) + (x_1 \cdot x_2')$$

$$y = (x_1' \cdot x_2') + (x_1 \cdot x_2)$$

x_1	x_2	y	y'
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

x_1	x_2	y	y'
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

Bipolar Transistor



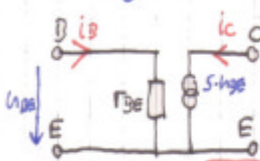
$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_E}$$

Großgleichsignale

Kleinwechselsignale

Kleinsignal-Ersatzschaltbild:



$$i_C = \beta \cdot i_B = S \cdot u_{BE}$$

$$S = \frac{I_C}{u_T} \text{ (Steilheit)}$$

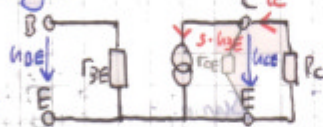
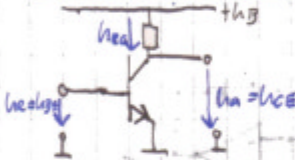
$u_T = 25 \text{ mV}$, Änderung mit 2 mV/K

$$r_{BE} = \frac{u_{BE}}{i_B} = \frac{\beta}{S}$$

$$S \sim I_C$$

$$r_{BE} \sim \frac{1}{I_C}$$

Emitter-Grundschaltung:



$$u_{CE} = -S \cdot u_{BE} \cdot R_C = i_C \cdot R_C$$

$$\Rightarrow V = \frac{u_{CE}}{u_{BE}} = -S \cdot R_C \text{ Verstärkungsfaktor}$$

$$r_{CE} = \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} = \frac{u_T}{I_C}$$

$$\Rightarrow V = -S \cdot (R_C \parallel r_{CE})$$

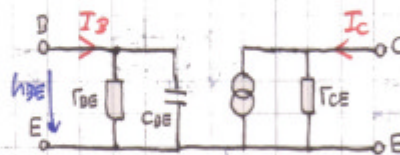
$$V_{max} = -\frac{u_T}{u_T} = -S \cdot r_{CE}$$

für R_C kann man auch
ein Stromquelle mit
 $R_i \rightarrow \infty$ wählen $\Rightarrow V_{max}$

Frequenzabhängigkeit:

$\beta = \frac{I_C}{I_B}$ ist frequenzabhängig

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}$$

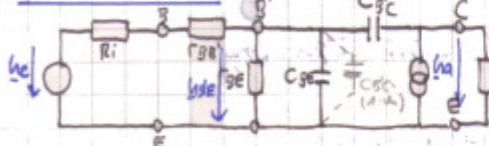


$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$C_{BE} = \frac{1}{2\pi \cdot f_\beta \cdot r_{BE}}$$

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \cdot \frac{r_{BE}}{1 + j \omega \cdot r_{BE} \cdot C_{BE}}$$

Miller-Effekt:



$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot [(R_i + r_{BE}) \parallel r_{BE}] \cdot [C_{BE} + C_{CE} \cdot (1 + |V_{CE}|)]}$$

$$f_B = \frac{1}{2\pi \cdot r_{BE} \cdot C_{BE}}$$

(f_B Grenzfrequenz ohne Miller Effekt)

$$f_s = \frac{1}{2\pi \cdot [(R_i + r_{BE}) \parallel r_{BE}] \cdot r_{CE}}$$

(Steilheits- Grenzfrequenz, $R_i = 0$; ohne Miller-Eff.)

$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot r_{BE} \cdot C_{BE}}$$