

Diöden

$$I_d = I_s \cdot \left(e^{\frac{U_d}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \approx \underbrace{I_s \cdot e^{\frac{U_d}{m \cdot V_T}}}_{\text{für } U_d > 0,2V}$$

$$r_d = \frac{m \cdot V_T}{I_d} = \frac{dV}{dI}$$

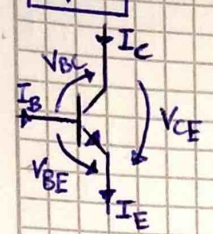
I_d = Strom im Arbeitspunkt

U_d = Spannung im Arbeitspunkt

I_s = Sättigungsstrom der Diode

nnp

Bipolartransistor



$$I_B = I_S \cdot (e^{\frac{V_{BE}}{m \cdot V_T}} - 1) \approx I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{m \cdot V_T}} \quad \text{wenn } V_{BE} > 0,2V$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (\approx 26mV \text{ bei } 300K)$$

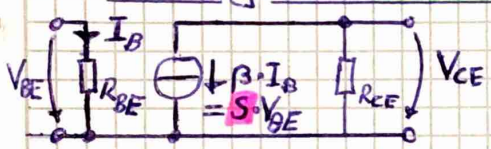
$$I_S = \frac{q \cdot D_n \cdot n_i^2 \cdot A_E}{W_B \cdot N_A}$$

V_T = Thermospannung (25-26mV) $\rightarrow k$ = Boltzmannkonstante $[1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}]$ $\rightarrow T$ = Temperatur [K]
 $\rightarrow q$ = Elementarladung $[1,602 \cdot 10^{-19} As]$

I_S = Sättigungsstrom (Transistorparameter) $\rightarrow m$ = Emissionskoeffizient ($1 < m < 2$)
 $\rightarrow D_n$ = Diffusionskonstante $[38 \frac{cm^2}{s}]$ $\rightarrow n_i$ = Ladungsträgerdichte $[1,5 \cdot 10^{10} \frac{1}{cm^3}]$

$\rightarrow W_B$ = Basisweite [Abstand C & E] $\rightarrow N_A$ = Dotierungsdichte Basis $\rightarrow A_E$ = Fläche zwischen E & B

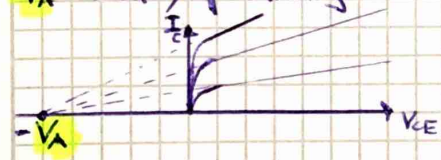
Kleinsignersatzschaltung



$$R_{BE} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} \bigg|_{\Delta V_{CE}=0} = \frac{m \cdot V_T}{I_{BQ}}$$

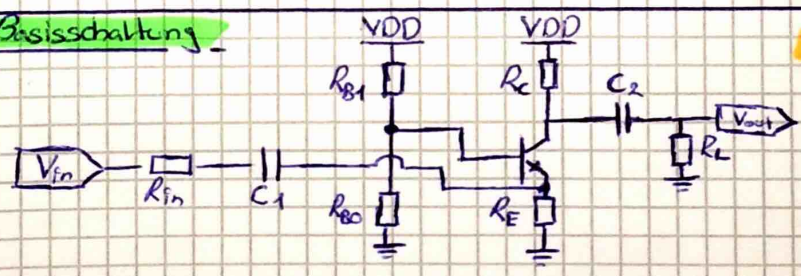
$$R_{CE} = \frac{dV_{CE}}{dI_{CE}} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \approx \frac{V_A}{I_C} \quad \text{wenn } V_A \gg V_{CE}$$

V_A = Earlyspannung

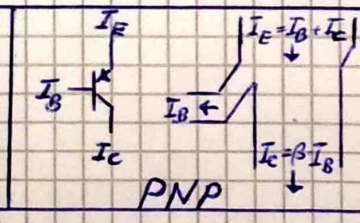
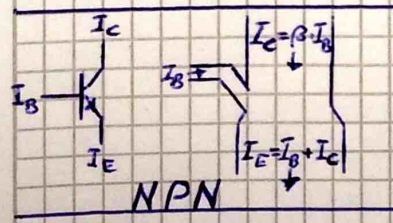


$$S = \frac{I_C}{V_{BE}} \bigg|_{V_{CE}=0} = \frac{\beta}{r_{BE}} = \frac{I_{CQ}}{m \cdot V_T}$$

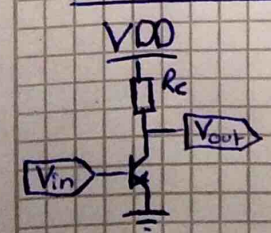
Basisschaltung



$$V_{out} \approx \frac{R_C \cdot R_L}{R_{in}(R_C + R_L)} \cdot V_{in}$$



Emitterschaltung



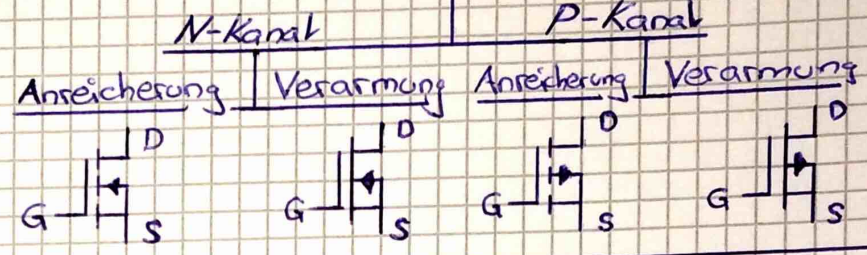
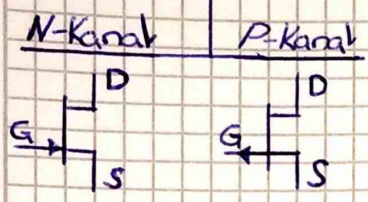
$$A = \frac{dV_{out}}{dV_{in}} = - \frac{R_C \cdot I_C}{m \cdot V_T}$$

Feldeffekttransistoren

D = Drain
G = Gate
S = Source

Sperrschicht FET's

MOSFET



Verstärkungsfaktor Gate-Source-Spannung

$$I_D = \frac{\beta}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

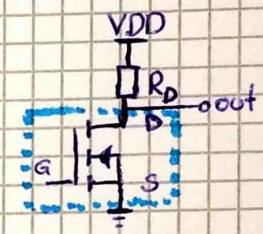
Drainstrom Schwellenspannung zwischen Gate & Source (0,3V...1,5V)

Transkonduktanz = Steilheit

$$g_m = S = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \frac{1}{r_{DS0}} = \beta \cdot (V_{GS0} - V_{TH}) = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot I_{D0}}$$

$$[\beta] = \frac{A}{V^2}$$

$$[S] = \frac{A}{V}$$



FET-Verstärkung

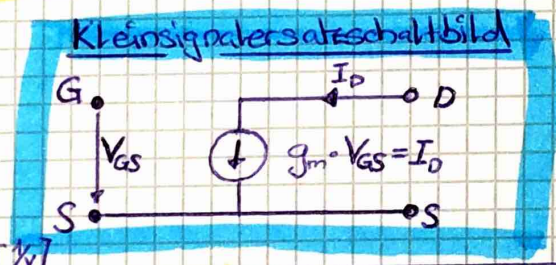
$$A = R_D \cdot S$$

Early-Spannung

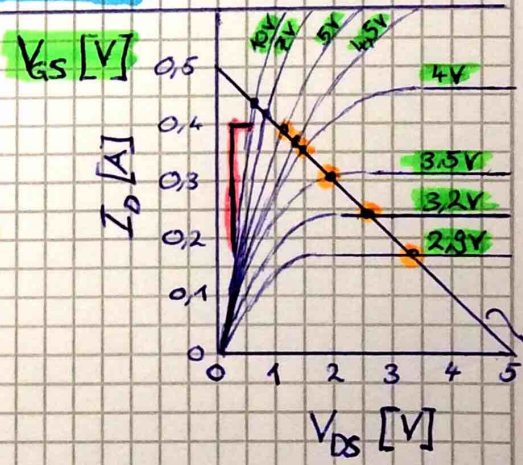
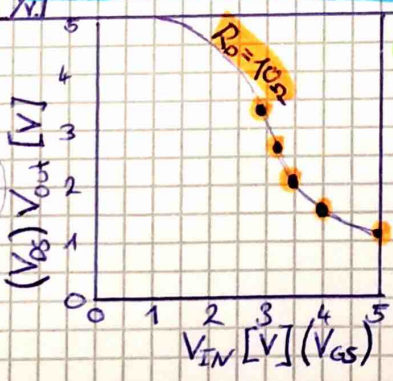
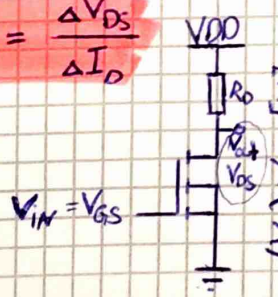
$$r_{DS} = \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D}$$

Modulationsfaktor [%]

$$R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D}$$



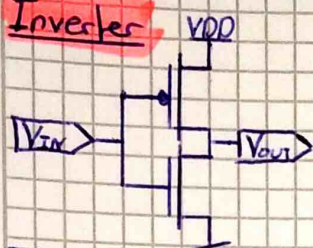
Parallelimmerwiderstand zur Ersatzstromquelle



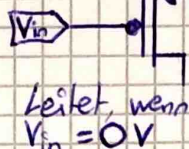
Lastenlinie für R_D = 10k

Transistor - Logik

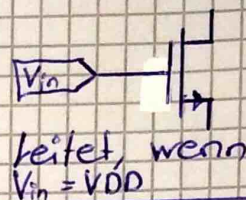
Inverter



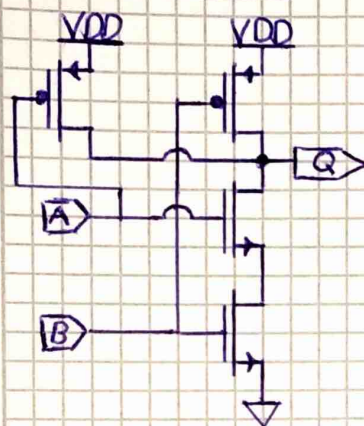
PNP (P-MOS)



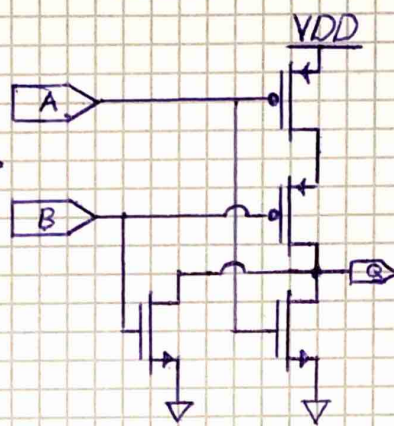
NPN (N-MOS)



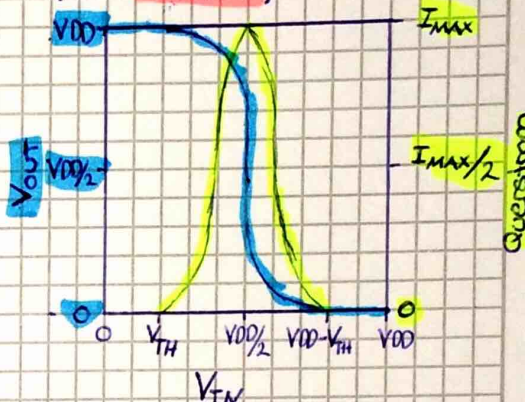
NAND



NOR



Ausgangsspannung / Querschnitt
bei zusammengeschalteten Eingängen
(bzw. Inverter)



Current Mode Logic CML (differentielle Logik)

- Vorteile:
- High-Speed
 - konstanter Strom d.h. kaum Speisungseinbrüche
 - differentiell: weniger störungsempfindlicher Schaltungsbauteile
 - kann Kabel treiben

- Nachteile:
- hoher Stromverbrauch
 - benötigt Doppelt so viele Leitungen, da differentiell
 - aufwändiges PCB-Layout, wegen kontrollierter Leitungsimpedanzen nötig

Bei Differential-Output-Voltage = 800 mV_{pp} gibt es zwei Zustände

$\text{OUT1} = V_{CC} \text{ \& \; } \text{OUT2} = V_{CC} - 400\text{ mV}$
 oder
 $\text{OUT1} = V_{CC} - 400\text{ mV} \text{ \& \; } \text{OUT2} = V_{CC}$

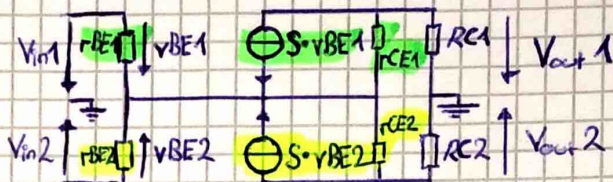
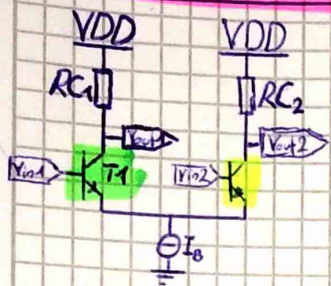
Das heißt jeweils beim -400 mV -OUT, einen Spannungsabfall von 400 mV über den beiden parallelen Widerständen gegen V_{CC}

Bei CML können beide Eingänge der Differentialstufe variiert werden, bei ECL (Emitter Coupled Logic) ist der zweite Eingang fix gesetzt!

Transistorverstärker

Differenzverstärker

⇒ Kleinsignal-Ersatzschaltung



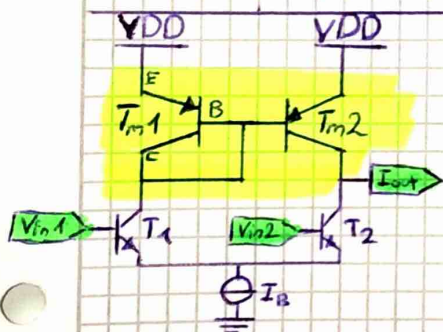
$$\left. \begin{array}{l} V_{in1} = V_{in2} \Rightarrow \\ R_{C1} = R_{C2} \Rightarrow \end{array} \right\} V_{out1} = V_{out2} = \frac{I_{D1}}{2} \cdot R_C \Rightarrow \text{Arbeitspunktspannungen}$$

$$V_{BE1} = \frac{V_{in1} - V_{in2}}{r_{BE1} + r_{BE2}} \cdot r_{BE1} \quad V_{BE2} = - \frac{V_{in1} - V_{in2}}{r_{BE1} + r_{BE2}} \cdot r_{BE1}$$

$$V_{out1, \text{klein}} = - S \cdot V_{BE1} \cdot (r_{CE1} \parallel R_{C1}) \Rightarrow V_{out1} = V_{out1} + V_{out1, \text{klein}}$$

$$V_{out2, \text{klein}} = - S \cdot V_{BE2} \cdot (r_{CE2} \parallel R_{C2}) \Rightarrow V_{out2} = V_{out2} + V_{out2, \text{klein}}$$

$$A = S \cdot (r_{CE1} \parallel R_{C1})$$



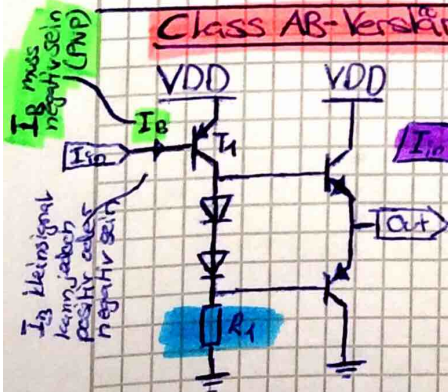
Transkonduktanz gm bzw S

$$g_m = \frac{I_{out}}{V_{in1} - V_{in2}} = \frac{I_{CT1}}{m \cdot V_T} \quad I_{CT1} = \frac{\beta}{2\beta + 2} \cdot I_B \approx \frac{I_B}{2}$$

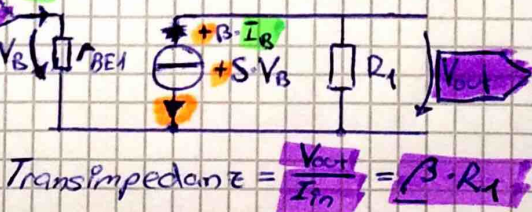
Arbeitspunkt, leichte Spannungsverschiebungen bewirken noch kaum Änderungen im Strom, weshalb dieser als konstant angenommen werden kann

Über einem Stromspiegel fällt immer die Spannung V_{BE} (meist 0,7V) ab.

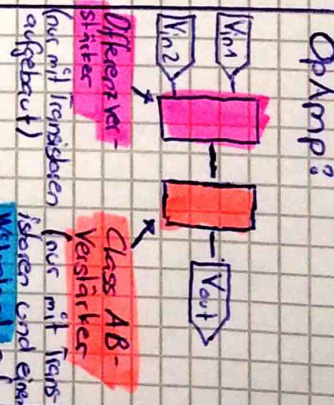
Class AB-Verstärker



Kleinsignal:



$$\text{Transimpedanz} = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \beta \cdot R_1$$

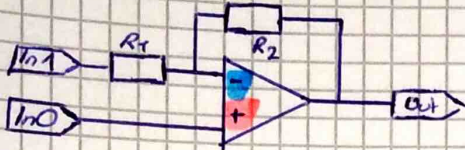


Bestimmen von Min & Max bei (verschiedenen) Vin

Min. so wählen, dass alle unterhalb gelegenen Bauteile mit ihren Offsetspannungen getrieben werden können (0,7V + 0,2V + ... etc.)

Max. so wählen, dass alle oberhalb gelegenen Bauteile mit ihren Offsetspannungen getrieben werden können (VDD - 0,7V - 0,2V ... etc.)

OpAmps



Wenn $V_{In0} \rightarrow \text{Fix}$: OpAmp invertierend

$V_{In1} \rightarrow \text{Fix}$: OpAmp nicht invertierend

wenn Rückkopplung auf $-$: negativ Feedback $\rightarrow$ OpAmp

$+$: positiv Feedback $\rightarrow$ Komparator

Bei Idealem OpAmp:

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{In0} - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In1}$$

Bei endlicher Verstärkung:

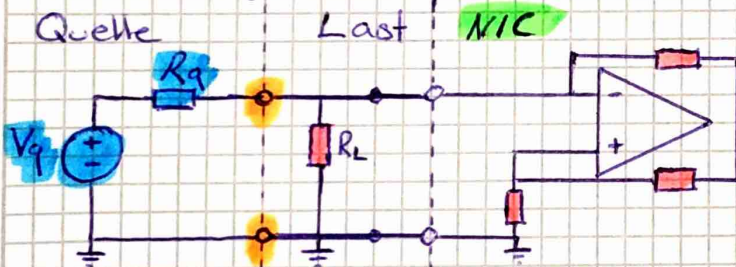
$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}} \cdot V_{In0} - \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}} \cdot V_{In1}$$

Mit Offsetspannung

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot (V_{In0} + V_{os}) - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In1}$$

Einfach immer zur Spannung, die am $+$ des Op-Amps anliegt die Offsetspannung addieren.

NIC Negativ-Impedanz-Converter



Müssen alle den gleichen Widerstand haben wie R_L

Mit dieser Schaltung wird der Strom der normalerweise von V_q erzeugt durch R_L fließt nun vom NIC erzeugt. So fließt kein Strom mehr durch R_q und an den Klemmen kann das reine V_q gemessen werden