

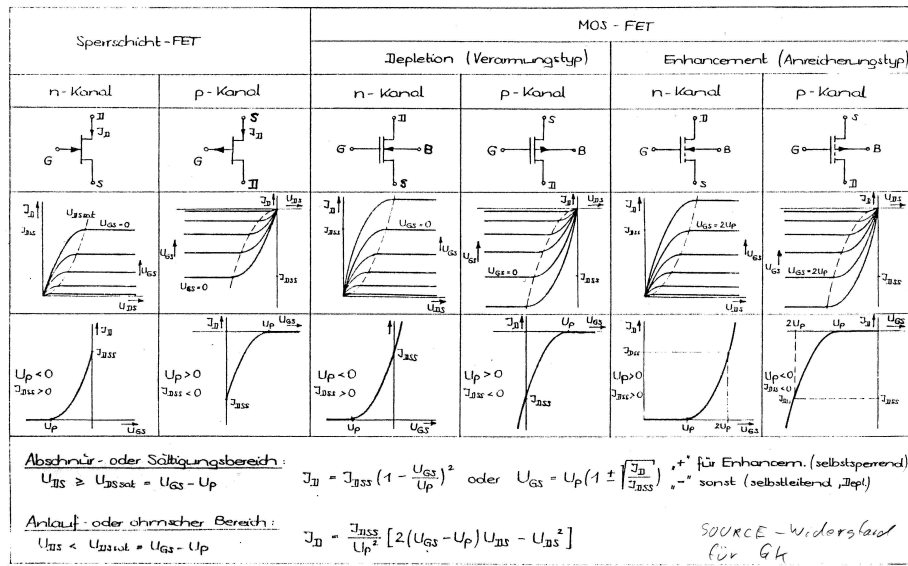


Bild 4.5: Schaltbilder, Kennlinien und einfache Modellgleichungen für Feldeffekt-Transistoren

Grundeigenschaften des Differenzverstärkers bei symmetrischer und unsymmetrischer Signalauskopplung

$\Delta r_{be} = r_{be} - r_{be}$
 $m_{0,5} \in \text{ist } R_E = r_{be}$

ideale Transistoren
 Verst.-Hälften identisch:

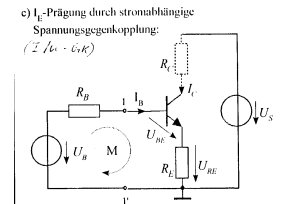
$r_{os} = r_{ob}$
 $I_a = I_b$

reale Transistoren
 Verst.-Hälften nicht identisch:

$r_{os} \approx r_{ob}$
 $I_a \approx I_b$

A_D	$-g_m \cdot r_a'$	$-g_m \cdot r_a'$
A_G	0	$-r_a / 2R_E$
A_{CMR}	∞	$g_m \cdot R_E$
A_D	$-g_m \cdot r_a'$	$-g_m \cdot r_a'$
A_G	$-\Delta r_a / 2R_E$	$-r_a / 2R_E$
A_{CMR}	$-2 \cdot g_m \cdot R_E$ $\Delta r_a / r_a$	$g_m \cdot R_E$

wobei: $r_a = (r_{as} + r_{ab}) / 2$
 $\Delta r_a = r_{as} - r_{ab}$
 $g_m = (g_{m1} + g_{m2}) / 2$



$U_H = -I_E \cdot R_E + U_{BE} + I_E \cdot R_E$

vernachlässigbar bei niederohmigem Teiler *) und $B \gg 1$

$I_E' \approx -I_E'' = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{U_B - 0.6V}{R_E}$

$U_{CE} = U_S - I_E' \cdot (R_E + R_L)$

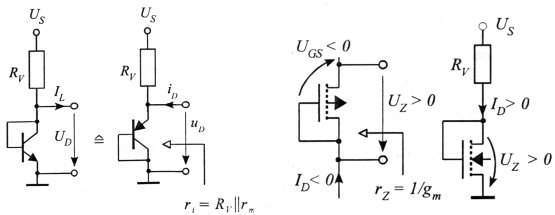
*) Dimensionierung: $R_E \ll B \cdot R_E$ z.B. $R_E \leq 30 R_E$

Wirkungsfolge bei Temperaturerhöhung:

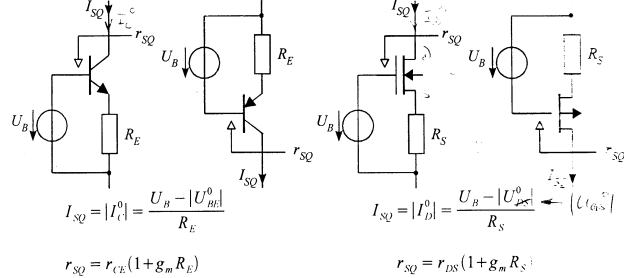
$1 \uparrow \rightarrow I_E' \uparrow \rightarrow U_{BE} \uparrow \rightarrow U_{CE} \downarrow \rightarrow I_E' \downarrow$
 (Gegenkopplung)

Praxistip: Spannungsabfall an $R_E = (I_E \cdot R_E)$ soll ca. $0,1 - 0,2 \cdot U_S$ betragen! U_S ersetzen durch Z-Diode, dadurch Eingangsspg. stabil!

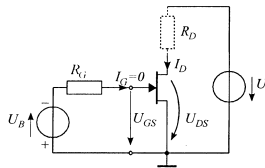
Spannungsquellen



Stromquellen



a) Prinzipielle Einstellung des AP



Da $I_G = 0$: $U_G = -U_B < 0$;
 beliebiger Wert für R_G möglich

$I_D' = I_{DSS} (1 - U_{GS} / U_p)^2$

Falls I_D^0 gegeben, U_{GS}^0 mit Umkehrformel.

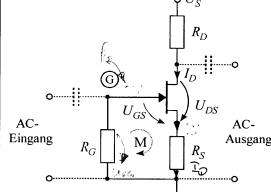
I_D^0 wird geprägt und es ergibt sich

$U_{GS}^0 = U_G - R_D \cdot I_D^0$
 solange $U_{GS}^0 \geq U_{DS,sat}$ gilt.

Ab welchem R_{Dmax} gerät der AP in den Anlaufbereich?

$R_{Dmax} = \frac{U_G - U_{GS}^0}{I_D^0}$
 mit $U_{GS}^0 = U_G - U_p$

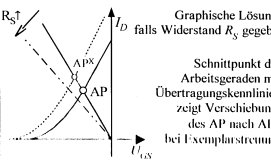
b) Automatische Einstellung des AP bei J-FETs und MOS-D-FETs



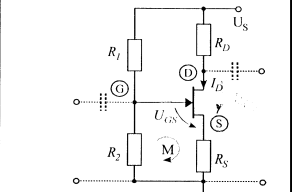
$I_G = 0 \Rightarrow \varphi_G = I_{RG} R_G = 0!$

I_D^0 gegeben: $U_{GS}^0 = U_p (1 - \sqrt{\frac{I_D^0}{I_{DSS}}})$

$\varphi_G = U_{GS} + I_D R_S = 0 \Rightarrow R_S = \frac{-U_{GS}^0}{I_D^0}$

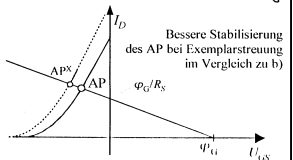


c) Schaltung mit Spannungsgegenkopplung zur AP-Einstellung für alle Typen von n-Kanal-FETs



Falls I_D^0 als Sollwert gegeben, Berechnung von U_{GS}^0 und φ_G wie unter b), dann Auslegung des Teilers R_1 und R_2 gemäß $\varphi_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

Verwendung der Übertragungskennlinie nur zulässig, falls $U_{GS}^0 = U_S - I_D^0 (R_S + R_D) \geq U_{GS,sat} \cdot U_G$

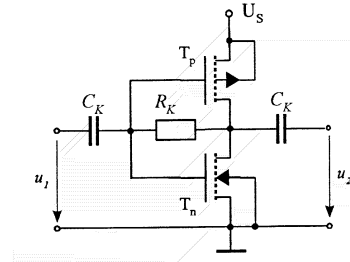


CMOS-Inverter als Kleinsignalverstärker

$A_U = \frac{u_1}{u_2} = -(g_{m1n} + g_{m1p}) \cdot (r_{DS1n} \parallel r_{DS1p})$

$r_{1V} \approx \frac{R_K}{A_U}$ für $|A_U| \gg 1$

$r_{2V} = r_{DS1n} \parallel r_{DS1p}$



$U_T = 26mV$ Annahmen: $IC' \leq 2mA$; $B_0 > 1$			
$g_m = \frac{1}{r_m} = \frac{ J_C^0 }{U_T}$ $r_{CE} \approx \frac{U_T}{ J_C^0 }$; $U_Y = 60 - 200V$ $r_a' = R_a \parallel r_{CE}$			
	E-GS	B-GS	C-GS
$A_u = \frac{u_2}{u_1}$	$-g_m r_a'$	$g_m r_a'$	$\frac{r_a'}{r_m + r_a'} \approx 1$
$A_i = \frac{i_2}{i_1}$	$\beta \frac{r_a'}{r_a}$	$\frac{-\beta}{1 + \beta + g_{CE} r_a} \approx -1$	$-(1 + \beta) \frac{r_a'}{r_a}$
$r_{1T} = \frac{u_1}{i_1}$	$\beta r_m (r_a < r_{CE})$	$r_m (r_a < r_{CE})$	$\beta (r_m + r_a')$ $\beta r_{CE} / 2$ für $r_a \rightarrow \infty$
$r_{2T} = \frac{u_2}{i_2}$	$r_{CE} (r_0 < \beta r_m)$ $r_{CE} / 2 (r_0 > \beta r_m)$	$\frac{r_0 r_{CE}}{r_m} (r_m < r_0 < \beta r_m)$ $\beta r_{CE} / 2 (r_0 > \beta r_m)$	$r_m + r_0 \cdot \beta$ $r_{CE} / 2$ für $r_0 \rightarrow \infty$
$1/\lambda = 30V$ $1/\lambda = 150V$	$g_m = \frac{2 \sqrt{J_D^0 \cdot J_{DSS}}}{ U_P }$ $r_{DS} = \frac{U_T}{ J_D^0 }$ oder $r_{DS} = \frac{1 - \lambda \cdot U_{GS}^0}{\lambda \cdot J_D^0}$ $r_a' = R_a \parallel r_{DS} (\lambda \approx 0,5 \cdot 10^{-4})$		
	S-GS	G-GS	D-GS
$A_u = \frac{u_2}{u_1}$	$-g_m r_a'$	$g_m r_a'$	$\frac{r_a'}{r_a' + 1/g_m}$
$A_i = \frac{i_2}{i_1}$	—	-1	—
$r_{1T} = \frac{u_1}{i_1}$	$\rightarrow \infty$	$\frac{1}{g_m}$	$\rightarrow \infty$
$r_{2T} = \frac{u_2}{i_2}$	$\approx r_{DS}$	$r_{DS} (1 + g_m r_0)$	—

R_S jede Größe außer 0 Ω

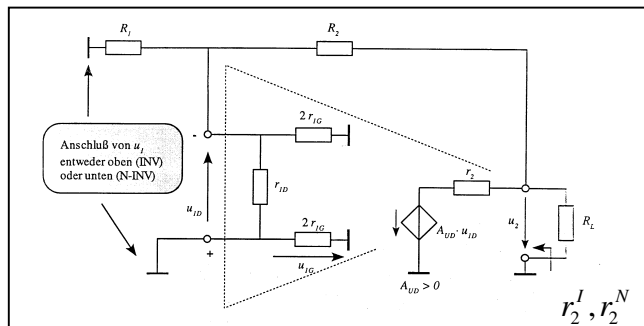


Bild 1.31 Realer OPV in nichtinvertierender oder invertierender Grundschaltung

Betriebseigenschaften

N-INV Verstärker		INV Verstärker	
$A_U = u_O / u_I$	$A_U^N = \frac{A_{UD}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}}$	$A_U^I = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{A_{UD}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}}$	
$1/A_U = u_I / u_O$	$\frac{1}{A_U^N} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{A_{UD}}$	$\frac{1}{A_U^I} = -\left[\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{A_{UD}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \right]$	
$r_i = u_I / i_i$	$r_i^N = 2r_{IG} \parallel r_{ID} \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}\right)$	$r_i^I = R_1 + \frac{R_2}{1 + A_{UD}}$	
$r_o = u_O / i_o$	$r_o^N = \frac{r_o}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}}$		

Tabelle 1.5 Betriebseigenschaften des nichtinvertierenden und des invertierenden Verstärkers unter Berücksichtigung der nichtidealen Eigenschaften ($A_{UD}, r_{ID}, r_{IG} \neq \infty$; $r_2 \neq 0$).

Die Berechnungen in Tabelle 1.5 wurden mit folgenden Näherungen durchgeführt, die in der Praxis im allgemeinen erfüllt sind: $R_1 \parallel R_2 \ll r_{ID} \parallel 2r_{IG}$ und $r_2 \ll R_2 \parallel R_1$.

A_S (vorne auftrennen)

X/U-GK	X/I-GK
Ansatz: $A_S = \frac{u_{2K}}{u_1}$	Ansatz: $A_S = \frac{i_{2K}}{i_1}$
Für N-INV gilt: $A_S = A_U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = A_U \cdot K$	Für INV gilt: $A_S = r_i \cdot A_U \cdot G_2$

A_{SR} (hinten auftrennen)

U/X-GK	I/X-GK
Ansatz: $A_{SR} = -\frac{u_{2K}}{u_{1K}}$	Ansatz: $A_{SR} = -\frac{i_{2K}}{i_{1K}}$

Differenzverstärker

Differenzspg.: $u_{ID} = u_{Ia} - u_{Ib}$

Gleichtaktspg.: $u_{IG} = \frac{u_{Ia} + u_{Ib}}{2}$

Gemischte Aussteuerung:

$u_{2a} = A_{Du} \cdot u_{ID} + A_{Gu} \cdot u_{IG}$

$u_2 = A_D \cdot u_{ID} + A_G \cdot u_{IG}$

Differenzverst.: $A_D^{sym} = \frac{u_2}{u_{ID}}, A_{Du}^{unsym} = \frac{u_{2a}}{u_{ID}}$

Gleichtaktverst.: $A_G^{sym} = \frac{u_2}{u_{IG}}, A_{Gu}^{unsym} = \frac{u_{2a}}{u_{IG}}$

Eingangswiderstände:

$r_{ID} = 2 \cdot \beta \cdot r_m$ mit $r_m = \frac{U_T}{I_C}$

$r_{IG} = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot (r_m + 2 \cdot R_E)$

Gegenkopplung

Reelle GK:

$f_G^I = f_G^N = \frac{f_T}{\frac{R_2}{R_1} + 1} = f_{ST}$

$A_{U^{OPV}} = \frac{A_{U0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_A}}; A_{U0}^N = \frac{R_2}{R_1} + 1; A_{U0}^{INV} = -\frac{R_2}{R_1}$

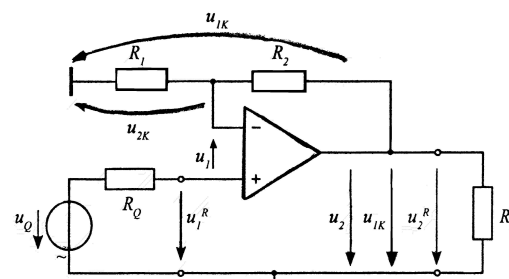
Überschwingen in %: $q = \frac{u_{2max} - u_{2\infty}}{u_{2\infty}} \cdot 100\%$

Überhöhungsmaß in dB:

$\ddot{u}_{HM} = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{2 \cdot \sin \left(\frac{\rho}{2} \right)} \right)$

Widerstand $\Rightarrow$ Leitwert Umformung

$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}; \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{G_2}{G_1 + G_2}$



Leistungsbandbreite

$f_p = \frac{Slew Rate}{2 \cdot \pi \cdot u_{2max}}$

Anstiegszeit

$t_r = 2,2 \cdot \tau = \frac{0,35}{f_G^N}$

$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_G^N}$

Ruhestromkompensation

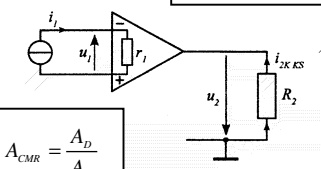
$R_3 = R_1 \parallel R_2$

Transistor Grundschaltung

E-GS: Signal in Basis, Signal aus Collector
B-GS: Signal in Emitter, Signal aus Collector
C-GS: Signal in Basis, Signal aus Emitter
FET-Grundschaltung
S-GS: Signal in Gate, Signal aus Drain
D-GS: Signal in Gate, Signal aus Source
G-GS: Signal in Source, Signal aus Drain

U/I-Gegenkopplung

$A_I = -A_U \cdot \frac{r_i}{R_L}$



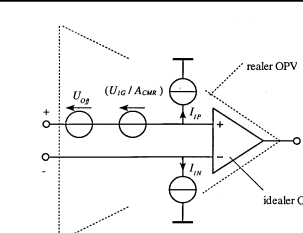
$A_{CMR} = \frac{A_D}{A_G}$

Stromspiegel

B-C Verbindung Bipolar

$\frac{I_{D1}}{I_{DSS1}} = \frac{I_{D2}}{I_{DSS2}}$

G-D Verbindung FET



$I_{OFF} = I_P - I_N$

$I_{IP} = I_B + I_{off} / 2;$

$I_{IN} = I_B \cdot I_{off} / 2$

$A_{CMR} = 10^{(CMRR / 20)}$

$I_B = \frac{I_{IP} + I_{IN}}{2}$

DC-Fehlgrößen

$U_{2E}(I_{IP}) = -I_{IP} \cdot R_3 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

$U_{2E}(I_{IN}) = -I_{IN} \cdot R_2$

$U_{2E}(U_{off}) = U_{off} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

$U_{2E}(A_{CMR}) = \frac{U_{IG}}{A_{CMR}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

Gleichtakteingangsspannung ist die Spannung die am Pluseingang anliegt!

$U_{IG} = U_{IP}$

Verstärker-Eigenschaft	Rückkopplungsart			
	U/U-RK	U/I-RK	I/U-RK	I/I-RK
Spannungs-Verstärkung A_U^R :	$\frac{A_U}{1 + A_S}$	A_U	$\frac{A_U}{1 + A_S}$	A_U
Strom-Verstärkung A_I^R :	A_I	$\frac{A_I}{1 + A_S}$	A_I	$\frac{A_I}{1 + A_S}$
Eingangs-Widerstand r_i^R :	$r_i(1 + A_S)$	$\frac{r_i}{1 + A_S}$	$r_i(1 + A_S)$	$\frac{r_i}{1 + A_S}$
Ausgangs-Widerstand r_o^R :	$\frac{r_o}{1 + A_S}$	$\frac{r_o}{1 + A_S}$	$r_o(1 + A_S)$	$r_o(1 + A_S)$
Bandbreite b^R :	$b(1 + A_S)$			
Änderungsfaktor für Rauschen und Klären	$\frac{1}{1 + A_S}$			
Stabilisierungsfaktor (Empfindlichkeit gegen Parameterstreuungen)	$\frac{1}{1 + A_S}$			
Gültig für alle Rückkopplungsarten, unmittelbar jedoch nur für die statilierte Übertragungsfunktion. z. B.: Die Bandbreite der Spannungsverstärkung wird unter Wirkung der U/U-GK, aber nicht unter I/I-GK mit dem Faktor $(1 + A_S)$ vergrößert.				
Änderung der Ein- und Ausgangswiderstände unter Einfluß der GK oder MK				
Eingangswiderstand	↑ ↓	↓ ↑	↑ ↓	↓ ↑
Ausgangswiderstand	↓ ↑	↓ ↑	↓ ↑	↓ ↑

Nullstelle $\Rightarrow$ knick nach oben! (HP = f_{gu})
Polstelle $\Rightarrow$ knick nach unten! (TP = f_{go})

Verstärkungs-Bandbreite-Produkt

$A_{U0} \cdot f_G = A_{U0}^N \cdot f_G^N = f_T = GBW$

